



18. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik

Nachhaltige Produktentwicklung

Burkhard Corves, Kilian Gericke, Karl-Heinrich Grote, Armin Lohrengel, Manuel Löwer, Arun Nagarajah, Frank Rieg, Gerhard Scharr, Ralph Stelzer

KT-KOLLOQUIUM

KT 2020

18. Gemeinsames Kolloquium

Konstruktionstechnik

01. und 02. Oktober 2020 in Duisburg

Nachhaltige Produktentwicklung

- **Modellbasierte Systementwicklung (MBSE)**
- **Virtual Reality und Augmented Reality**
- **Produktdatenmanagement**
- **Simulationen in der virtuellen Produktentwicklung (FEM, Topologieoptimierung etc.)**
- **KI-Methoden in der Produktentwicklung**
- **Agile Vorgehensweisen in der physischen Produktentwicklung**
- **Ressourceneffiziente Produkte (Eco Design)**
- **Produktsicherheit**

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.dnb.de> abrufbar.

Herausgeber:



Prof. Dr.-Ing. Karl-Heinrich Grote



Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Burkhard Corves



Prof. Dr.-Ing. Armin Lohrengel



Prof. Dr.-Ing. habil. Ralph H. Stelzer



Prof. Dr.-Ing. Frank Rieg



Prof. Dr.-Ing. Arun Nagarajah



Prof. Dr.-Ing. Kilian Gericke
Prof. Dr.-Ing. Gerhard Scharr



Prof. Dr.-Ing. Manuel Löwer

ISBN 978-3-940402-43-1

DOI: 10.17185/dupublico/73094

Universität Duisburg-Essen 2020

Universitätsbibliothek

Universitätsstraße 9-11

45141 Essen

Vorwort

Seit Anfang des Jahres hat das Coronavirus innerhalb kürzester Zeit unser wirtschaftliches und öffentliches Leben in seinen Grundfesten erschüttert. Seitdem befinden wir uns in einem permanenten Krisenzustand, und Ereignisse wie unsere Tagung können nicht in der gewohnten Weise stattfinden.

Das Wort Krise setzt sich im Chinesischen aus zwei Zeichen zusammen (危機) - das eine bedeutet Gefahr, das andere Chance. Während die Pandemie weiterhin eine große Gefahr für unsere Gesundheit darstellt, schafft sie auch Chancen, insbesondere im Bereich der Digitalisierung. Nicht nur Bereiche wie die Bildung, sondern auch die Wirtschaft werden durch digitale Technologien einen stärkeren Schub erhalten. In den Entwicklungs- und Konstruktionsabteilungen zum Beispiel bieten sie vielversprechende Möglichkeiten, Arbeitsabläufe nachhaltig zu optimieren.

Langfristig wird sich sowohl die räumliche als auch die zeitliche Verteilung der Arbeit an den während der Krise neu festgelegten Standards orientieren. Mobiles Arbeiten wird sich als alternative Arbeitsform etablieren. Neben den offensichtlichen Vorteilen wird das mobile Arbeiten aber auch die Kommunikation zwischen den verschiedenen Akteuren der Produktentwicklung weiter erschweren.

Neben den Veränderungen in der Zusammenarbeit zwischen den verschiedenen Akteuren wird auch die Zusammenarbeit zwischen Mensch und Maschine weiter forciert. Die Etablierung von autonomen Prozessen für Maschinen und Anlagen oder die Möglichkeit ihrer Fernwartung schafft eine hohe Flexibilität des Personals in Bezug auf seinen Arbeitsplatz und wird damit stärker in den Fokus rücken.

Eine weitere Anstrengung wird darin bestehen, die Zuverlässigkeit der Modellierung und Simulationen weiter zu verbessern und die Lücke zwischen dem realen Verhalten des Produkts und dem Verhalten seines virtuellen Abbildes zu schließen. Dadurch wird es möglich sein, die Anzahl der physischen Muster zu reduzieren, was nicht nur die Kosten senken, sondern auch die Flexibilität des Arbeitsplatzes erhöhen würde.

All diese Herausforderungen verlangen von IngenieurInnen in Wissenschaft und Wirtschaft, Lösungen für die aktuellen Herausforderungen zu entwickeln. Es ist erfreulich zu sehen, dass sich Beiträge im Tagungsband bereits mit diesen Themen befassen. Auch wenn die Konferenz in diesem Jahr nicht wie üblich stattfinden kann, um die Themen persönlich zu diskutieren, so bietet der Tagungsband doch zumindest die Möglichkeit, den interessierten Leserinnen und Leser über die Themen zu informieren.

Als Hauptredner der Tagung war mein geschätzter Kollege em. Prof. Dr.-Ing. Klaus Ehrlenspiel vorgesehen. Auch wenn der Vortrag nicht stattgefunden hat, freue ich mich, dass er einen Beitrag verfasst hat, um aus seiner langjährigen Erfahrung abgeleitete Ansätze für eine zukünftige Ausrichtung der Konstruktionsforschung mit uns zu teilen.

Ich möchte allen Autoren danken und hoffe, dass Sie alle die Corona-Pandemie bei guter Gesundheit überstehen.

Duisburg, im Oktober 2020

Arun Nagarajah

Inhalt

Das Wechselspiel zwischen Unbewusstem und Rationalität in der Produktentwicklung	1
Klaus Ehrlenspiel TU München	
Optimierung der Materialausnutzung in der direkten Additiven Fertigung topologieoptimierter Strukturen	27
Tobias Rosnitschek, Tobias Siegel, David Linke, Philippa Mailänder, Dominik Kamp, Frank Rieg Universität Bayreuth	
Anwendung des Eliminationsverfahrens zur automatisierten Auslegung von Presspassungen mittels der Finite-Elemente-Analyse	41
Christopher Lange, Aljoscha Zahn, Tobias Rosnitschek, Frank Rieg Universität Bayreuth	
Nennspannungsermittlung für gerändelte Bauteile	55
Florian Mörz, Günter Schäfer Technische Universität Clausthal	
Einfluss gekerbter z-Pins auf die bruchmechanischen sowie In-plane Eigenschaften z-Pin verstärkter Prepreg-Laminat	67
André Knopp, Gerhard Scharr Universität Rostock	
Automatisierte Modellerstellung von Mehrkörpersystemen in Modelica	79
Lukas Klimmeck, Jan Thiede*, Carina Fresemann, Günther Battenberg*, Rainer Stark Technische Universität Berlin / *Battenberg ROBOTIC GmbH & Co. KG	
Reduktion der Berechnungskomplexität zusammengesetzter Produkte durch physikgetriebene Modellbildung	89
Hans-Peter Prüfer Ruhr-Universität Bochum	
Detektion von Konstruktionsfehlern durch eine automatisierte Objekterkennung mittels Deep Learning	101
Patrik Müller, Paul Christoph Gembarski, Roland Lachmayer Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover	
Potential ungenutzter Rechenleistung Mikrocluster für Forschungsinstitute	113
Henrik Stromberg, Viktor Martinewski Technische Universität Clausthal	

Implementierung einer direkten und hochflexiblen Netz-Kontur-Kopplung zur Formoptimierung strömungsdynamischer Profile	125
M.Sc. Stephan Trautsch, Prof. Dr.-Ing. Heike Mrech*, Prof. Dr.-Ing. Karl-Heinrich Grote Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg / *Hochschule Merseburg	
Validierung gedruckter Kurvenscheiben für einen Kurvenscheibenprüfstand in der Lehre	139
B. Corves, E. Hüsing, V. Bolte, M. Hüsing RWTH Aachen	
Methodisches Vorgehen bei der Entwicklung eines Kernmaterialkonzeptes für Rotorblätter einer Großwindkraftanlage	151
Nele Kayser, Stefan Zorn, Hendrik Klein*, Kilian Gericke Universität Rostock / *Nordex Energy GmbH	
Die Einbettung kreislaufgerechter Konstruktionsansätze in den Produktentstehungsprozess	163
Phillip Wallat, Armin Lohrengel Technische Universität Clausthal	
Entwicklung einer Gamification-Strategie zur Motivationssteigerung von Mitarbeitern in der Produktion während der digitalen Transformation	175
David Kessing, Huong Ly Hoang*, Christoph Benninghaus*, Manuel Löwer Bergische Universität Wuppertal / *Construction Company	
Konzeptionierung einer Methodik zur effizienten Entwicklung von Exoskeletten	187
Tobias Drees, Robin Pluhnau, Arun Nagarajah Universität Duisburg-Essen	
Anwendung wissensbasierter Konstruktionssysteme zur Lösungsbewertung von CAD-Konstruktionen	199
Lukas Valentin Hoppe, Paul Christoph Gembarski, Stefan Plappert, Roland Lachmayer Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover	
Vergleich der Ansätze von Product Lifecycle Management und Digitalen Zwilling	209
Dmytro Adamenko, Steffen Kunnen, Arun Nagarajah Universität Duisburg-Essen	
Charakterisierung der Entwicklungsaufgabe zur methodischen Potentialfindung in der standortverteilten Produktentwicklung	221
Katharina Duehr, Bernhard Nix, Albert Albers Karlsruher Institut für Technologie	
Entwicklung und Aufbau eines Virtual Reality Regalsystem zur Verwaltung von Produktdaten	233
Steffen Kunnen, Dmytro Adamenko, Robin Pluhnau, Sebastian Sonntag, Arun Nagarajah Universität Duisburg-Essen	

Herausforderungen des agilen und sequentiellen Zielsystem- und Anforderungsmanagements	245
Valentin Zimmermann, Jonas Heimicke, Rebecca Bohn, Lucas Schuhmacher, Sebastian Trost, Albert Albers Karlsruher Institut für Technologie	
Potentiale des Additive Tooling zur Steigerung der Effizienz und Agilität von Validierungsaktivitäten in der frühen Phase der Produktentwicklung	259
Steffen Schrock*, Fang-Wei Chang*, Stefan Junka, Albert Albers Hochschule Offenburg, Karlsruher Institut für Technologie	
Akustische Qualifizierung von neuartigen Verbundwerkstoffen auf Basis von stärkehaltigen Granulaten	271
Raphael Rehmet, Armin Lohrengel, Florian Freundt*, Alireza Kharazipour* Technische Universität Clausthal, *Georg-August-Universität Göttingen	
SMART Standards: Automatisierungsansatz – Methodik zur Wissensrepräsentation durch Graphdatenbanken	283
Dominik Ehring, André Loibl, Leyao Zhou, Arun Nagarajah Universität Duisburg-Essen	
Digitale Analyse und Dokumentation von Tragbildern und Flankenschäden an Kegelradverzahnungen	295
A. Hilbig, F. Müller, H. Sardemann, S. Holtzhausen, H.-G. Maas, B. Schlecht Technische Universität Dresden	
Betrachtung von Konfigurationsdateiformaten und GUI-Frameworks für Programme zur Aufbereitung von Austauschdateien	309
Johannes Mohr, Claudia Kleinschrodt, Pascal Diwisch, Frank Rieg Universität Bayreuth	
Nachhaltigkeit messbar machen –eine neue Kennzahl für Repurpose-Prozesse	321
Franz Wieck, Norina Schmidtseifer, Philipp Kronenberg, Friederike Deuerler, Manuel Löwer Bergische Universität Wuppertal	
Reverse-Engineering Vorgehen zur Analyse von Systemarchitekturen	333
Robin Pluhnau, Jan Lübke, Arun Nagarajah Universität Duisburg-Essen	

Das Wechselspiel zwischen Unbewusstem und Rationalität in der Produktentwicklung

Klaus Ehrlenspiel

Prof. em. Dr.-Ing., Lehrstuhl für Produktentwicklung und Leichtbau, TU München

Boltzmannstr. 15, 85748 Garching;

Privat: Zugspitzstr. 18; 82327 Tutzing

Email: ehrlenspiel@mytum.de

Inhalt: *Unbewusst aus der Erfahrung konstruieren geht schneller als mit „mühsamem“ methodischem Vorgehen. Ein Erfahrungsbericht über die Kombinationen beider Bereiche.*

Stichworte: *Produktentwicklung; unbewusstes Vorgehen; methodisches Vorgehen*

Abstract: *Designing unconsciously from experience is faster than with a "tedious" methodical procedure. Combining both areas, experiences are presented*

Keywords: *industrial design; tacit knowledge; methodical approach*

Vorwort

Albert Einstein zum Beginn: „Der intuitive Geist ist ein heiliges Geschenk und der rationale Geist sein treuer Diener“. Also gibt's nach ihm keine Dominanz der Rationalität, sondern diese ist dem Unbewussten untergeordnet. – Unter dem Unbewussten wird hier im Sinne der Gehirnforschung das nicht Kommunizierbare (durch Wort, Schrift und Gestik) verstanden. – Beispiel: „Wie fahren Sie Fahrrad? Beschreiben Sie mal detaillierter, wie Sie, ohne umzufallen, vorgehen!“

Ich habe schon einmal vor 17 Jahren einen Vortrag mit einem ähnlichen Thema [1] gehalten. 2012 ist das wegweisende Buch „Schnelles Denken, langsames Denken“ von Daniel Kahneman (Nobelpreis für Wirtschaft 2002) [2] erschienen und 2008 das Buch „Bauchentscheidungen“ [3] von Gerd Gigerenzer (Max-Planck-Institut für Bildungsforschung), so dass heute die Erkenntnisse in diesem Bereich viel klarer sind. Ich werde nachfolgend unter 1 stichwortartig drei Thesen bringen, die in 2 begründet werden, um am Schluss mit These C anzudeuten, wie man mit guter Qualität „schnell“ konstruieren kann. – Kahneman bezeichnet beim „Schnellen Denken“ das unbewusste Vorgehen mit „System 1“ und das rationale „Langsame Denken“ mit „System 2“.

Mein Interesse an diesem Thema

Die moderne Erforschung des schnellen versus langsames Denken hat nach Kahneman und J. Müller ungefähr 1985 eingesetzt [2; 4]. Die Untersuchungen [4] habe ich übernommen und weiter ausgebaut. Ich habe mich nach 10 Jahren Industriepraxis seit 1970 mit der in Deutschland beginnenden Konstruktionslehre intensiver beschäftigt und habe dann 1976 den im Jahr 1965 in Deutschland zuerst gegründeten Methodiklehrstuhl von Prof. Rodenacker an der TH München übernommen. Mit vielen Kollegen habe ich das methodische Entwickeln und Konstruieren weiter gefördert. Ergebnisse sind vor allem das IPE-Buch von 1995 [5] und das bereits 1985 erschienene Buch „Kostengünstig Entwickeln und Konstruieren“, das mittlerweile seine 8. Auflage erlebt. Mit Prof. G. Pahl habe ich jahrelang eng im Bereich Kosten zusammengearbeitet [6]. Mit ihm und Prof. D. Dörner aus Bamberg arbeiteten wir 18 Jahre (einschließlich unserer Nachfolger H. Birkhofer und U. Lindemann) in einem

gemeinsamen DFG-Projekt über denkpsychologische Vorgänge beim Konstruieren zusammen [9]. So habe ich 45 Jahre einen Großteil der rationalen Methodik-entwicklung mit erlebt und gestaltet. (Literatur u.a. [18]). Die Frage ist immer noch: „Wissen wir eigentlich, wie unser Denken und (unbewusstes) Handeln zustande kommen?“

An wen wendet sich dieser Aufsatz? An Personen, die sich für die Hintergründe des Konstruierens interessieren. Also mit unsrer Art in diesem Bereich zu Denken und zu Handeln. Nicht an Personen, die das methodische Produktentwickeln lernen wollen. Dies wird hier vorausgesetzt.

1 Zentrale Aussagen

These A: Menschen denken und handeln zunächst unbewusst, auch wenn sie meinen, sie seien immer völlig rational. (s.u.: „Erinnerungsverzerrung“)

These B: Unbewusste Prozesse – auch das Konstruieren – verlaufen viel schneller als rationale, Schritt für Schritt überlegte. Aber man muss um die Grenzen wissen.

These C: Ein gemischtes Vorgehen kann beim Produktentwickeln je nach Situation sinnvoll sein.

2 Begründungen

2.1 Begründungen zur These A:

Menschen denken und handeln zunächst unbewusst, auch wenn sie meinen sie seien immer völlig rational.

Die folgenden Erkenntnisse sind aus Beobachtungen und Befragungen von 70 bis 120 Personen entstanden – etwa bei Kahneman [2]. Es wird beim Denken vor allem seit Kahneman unterschieden: Das unbewusste, aber schnelle System 1 (oder: „Normal-betrieb“ nach Ehrlenspiel, IPE [5] 2.Aufl. 2002 bzw. J. Müller [4] 1991). Das bewusste, aber langsame System 2 (oder: „Rationalbetrieb“ nach Ehrlenspiel). Ähnliche Begriffspaare sind implizit / explizit oder intuitiv / rational.

Die Aussagen hier gelten auch in Zeiten des Rechners. Denn, wie einmal der Gehirnforscher G. Roth im Hinblick auf das Unbewusste überspitzt formulierte: „Wir werden gelebt“ [15]. Die Hilfsmittel, die wir dazu verwenden, z.B. Rechnerwerkzeuge wie CAx oder KI verändern zwar unser Leben und Denken, aber nicht grundsätzlich im Sinne des Themas. Man denke nur an unsere heutige elektronische Kommunikation im Vergleich zur Zeit der mechanischen Schreibmaschine. [16]

Zur Rationalität: Die moderne, an den Hochschulen entstandene Lehre des Entwickelns und Konstruierens [6] und [7] (oder z.B. Entwerfens von Software) geht seit ca. Mitte des 20. Jahrhunderts von rationalen, also z.B. systemtechnischen Verfahren aus. In diesem Bereich, der System 2 zuzurechnen ist, wird ein lediglich rational entscheidender Mensch vorausgesetzt. Ähnlich ist es in Wirtschafts- und Sozialwissenschaften, wenn Kahneman betont: „Das Modell vom rationalen Agenten ist bis heute die wichtigste Theorie der Sozialwissenschaften. Sie aber weist gravierende Mängel auf“ ([2], S.332; 341).

Mein Anliegen ist es, darauf hinzuweisen, dass auch im Ingenieurbereich die Vorstellung des rein rational handelnden Menschen ein Irrtum ist. „Unsere Gedanken und Handlungen werden routinemäßig vom unbewussten System 1 gesteuert und sie liegen im Allgemeinen richtig.“ [2, S.514]. Die zögerliche Haltung der Industriepraxis, die an den Hochschulen entwickelte moderne rationale Entwicklungs- und Konstruktionslehre voll zu übernehmen, hat darin ihren Grund. Denn meist ist der Weg der Industrie: „Wir brauchen schnell eine machbare Lösung.“ Das rationale System 2 ist aber zu langsam, solange es nicht durch intensives Üben fast ins Unbewusste und damit ins System 1 eingedrungen ist [16].

Das Unbewusste in System 1 ist sozusagen die laufend aktive und schnelle Basis des Lebens, auf der das langsamere Rationalsystem 2 aufbaut.

Der einflussreiche Physiologe und Physiker Hermann von Helmholtz erklärte bereits 1885 „dass ein Großteil der geistigen Prozesse, die mit visueller Wahrnehmung und mit Handeln zusammenhängen, auf unbewusster Ebene stattfinden“ ([8], S.151). Konstruiert wird seit jeher und auch heute aus dem Unbewussten heraus mit rationalen Einlagen – z.B. mit analytischen Berechnungsverfahren und „wenn ... dann“-Überlegungen. Die ganze Technik ist bisher so entstanden, vor allem bei einzelnen Personen. Bei Gruppen (Teams) ist das rationale Vorgehen (z.B. in der Projektplanung) etwas mehr im Vordergrund, da man sich abstimmen und gemeinsam planen muss. – Der Hauptvorteil des Denkens und Konstruierens im System 1 mit rationalen Einlagen ist, dass es routinemäßig schnell geht und damit „denkökonomisch“ abläuft ([2], S.50). So erfolgt das schnelle Denken im System 1 sachkundig, heuristisch und mit automatisierten Wahrnehmungs- und Gedächtnisprozessen. Dazu ist allerdings Voraussetzung, dass „der Experte“ sich sein implizit verankertes Wissen in einer Umgebung gebildet hat, die einigermaßen regelmäßig war und in der er eine langjährige Übung erlangt hat ([2], S.296). – Alle Informationen, die uns erreichen, werden unbewusst zunächst im Gehirn gefühlmäßig, bewertet und dementsprechend weiter bearbeitet oder ausgeschieden. Welche Neurotransmitter wie daran beteiligt sind, zeigt Eric Kandel [8a] ab S.488 eindrucksvoll. – Alles was uns über die Sinnesorgane erreicht, ist zunächst unbewusst. So lassen sich schon Eindrücke des Riechens, Schmeckens oder Tastens inhaltlich – also sprachlich – schwer beschreiben. Auch das Hörerlebnis etwa von Musik rational zu beschreiben ist für einen musikalisch Ungeschulten nahezu unmöglich. Lediglich erlernte Sprachen erreichen uns rational. Aber auch Sprechen selbst geschieht zum großen Teil unbewusst: Die Grammatik und Wortbildung verlaufen weitgehend automatisiert. Die Haupt-Informationsquelle Sehen geschieht auch zunächst unbewusst, solange ich dem Gegenstand nicht meine Aufmerksamkeit dezidiert zuwende, wie etwa beim Lesen, Erkennen mathematischer Zeichen oder Schreiben.

Dieses Wechselspiel zwischen Unbewusstem und Rationalität ist am altbekannten Symbol des Eisbergs in Bild 1 dargestellt.

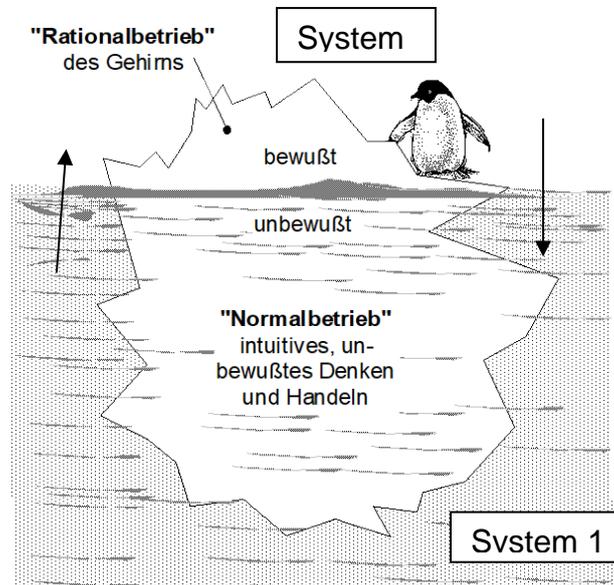


Bild 1: Eisberg-Gleichnis erwähnt bei S. Freud: Ein Großteil unserer Handlungen ist aus dem Unbewussten gesteuert. Der Normalbetrieb läuft routiniert im Unbewussten ab (unter Wasser). Der Rationalbetrieb (über der Wasserlinie) baut darauf auf. Zwischen beiden Bereichen findet ein fortwährender Austausch statt ([5] 1. Aufl 1995). Um diesen geht's hier. Um die Pfeile im Bild.

Viele Kollegen und ich haben versierte Konstrukteure in der Praxis erlebt, die nicht konstruktionsmethodisch geschult waren und die kaum beschreiben konnten, was sie wie zustande gebracht haben. Sie sagen dann: „Wozu fragen Sie? Das macht man eben so.“ Das ist eine Fähigkeit von Fachleuten mit langjähriger Erfahrung in einem bestimmten Produktbereich. Sie denken nach und vergleichen ihre Entwürfe mit Produkten der Konkurrenz.

Und viele hatten plötzlich gute Einfälle. Sie doch auch!? Sie fragen sich dann: „Wie bin ich jetzt da draufgekommen?“ Ihr Unbewusstes war aktiv. Das Thema ist aktuell: In ARD alpha ist seit 28.7.20 (bis 13.8.) eine Sendung in 13 Folgen zu sehen mit dem Titel „Auf den Spuren der Intuition“. Diese alte Fähigkeit entsteht ebenfalls im Unbewussten und tritt daraus hervor. Aber im Unterschied zum aktuellen Thema, wo es um die Schnelligkeit des Ablaufs geht, finden neue intuitive und kreative Prozesse in einer Atmosphäre der Entschleunigung statt. Direkt gegensätzlich zum Thema dieser Zeilen! Zu sich kommen, sich in andere einfühlen, braucht Zeit! Es ist klar: Intuition ist wichtiger als das schnelle Denken. Damit habe auch ich viel erfahren: an die 35 Patente im Bereich Planetengetriebe und Gelenkkupplungen, die meist durch und nach Gesprächen mit Bekannten entstanden. Sie

wurden z.T. praktisch eingesetzt. Wie auch meine vielen künstlerischen Bilder und Zeichnungen, mit denen ich z.T. eine Schule in Ecuador finanziert habe.

Grundsätzliche Eigenschaften des Unbewussten

Frei nach Kahneman: „Beide Systeme sind immer aktiv, wenn wir wach sind. System 1 läuft automatisch und System 2 befindet sich normalerweise in einem Modus geringer Anstrengung, in dem nur ein Teil seiner Kapazität in Anspruch genommen wird. System 1 generiert fortwährend Vorschläge für System 2: Eindrücke, Intuitionen, Absichten und Gefühle. Wenn diese von System 2 unterstützt werden, werden sie zu Überzeugungen, Impulsen und zu willentlich gesteuerten Handlungen. Wenn alles glatt läuft – was meistens der Fall ist – macht sich System 2 die Vorschläge von System 1 ohne größere Modifikationen zu eigen. Im Allgemeinen vertraut man seinen Eindrücken und gibt seinen Wünschen nach. Und das ist für gewöhnlich in Ordnung so“. ([2], S. 37).

Wenn System 1 in Schwierigkeiten gerät, fordert es vom System 2 eine detailliertere und spezifischere Verarbeitung an, die das anstehende Problem möglicherweise lösen wird. Wenn etwa die Rechenaufgabe 171×24 lautet, statt 7×24 , was im System 1 noch einigermaßen einfach (ohne Notizen) gelöst werden könnte. „Außerdem ist System 2 für die fortlaufende Überwachung des Verhaltens zuständig – etwa die Kontrolle, dass man höflich bleibt, wenn man wütend ist und dass man hellwach bleibt, wenn man nachts Auto fährt. Der größte Teil dessen, was Sie denken und tun (Ihr System 2), geht aus System 1 hervor. System 2 übernimmt, sobald es schwierig wird, und hat normalerweise das letzte Wort“.

2.2 Begründungen zur These B:

Unbewusste Prozesse – auch das Konstruieren – verlaufen viel schneller, als rational, Schritt für Schritt überlegte. Aber man muss um die Grenzen wissen.

Konstruktionsbeispiel zum schnellen / langsamen Arbeiten

In Zusammenarbeit mit dem experimentellen Psychologen Prof. Dr. Dörner / Uni Bamberg [9] wurde von Günther [10] ein Forschungsvorhaben mit folgendem Ziel bearbeitet: Gesucht war der Vergleich von Konstruktionsprozessen zwischen Hochschulingenieuren und reinen Praktikern. Alle untersuchten Einzelpersonen bekamen als gleiche Aufgabe, eine Vorrichtung zu konstruieren. Dazu sollte eine Entwurfszeichnung erstellt werden (damals an der Zeichenmaschine). Dies geschah in Einzelarbeit mit lautem Denken unter

Videobeobachtung. Die Zeit war freigestellt. Für die gestellte Aufgabe benötigten die Personen 5 bis 15 Stunden.

Versuchspersonen waren fünf Praktiker (z.B. Zeichner, Techniker, Meister), die lange Jahre in der Industrie konstruiert, aber überhaupt keine Hochschulausbildung hatten und zwei Hochschulingenieure als Methodiker. Aus 25 möglichen Versuchspersonen wurden nur zwei ausgewählt, da sie Prozesse mitbrachten, die der Methodik-Richtlinie VDI 2221 [7] (1993) am ehesten nahekamen und gleichzeitig eine gewisse Praxiserfahrung hatten. Die Praktiker werden im Folgenden als **p-Konstrukteure** bezeichnet, die methodischen Hochschulleute als **m-Konstrukteure**.

Die zu konstruierende Vorrichtung ist in Bild 2 bereits als eine von einer Versuchsperson erarbeitete Konstruktion gezeigt (Aber nachträglich als 3D Bild umgezeichnet).

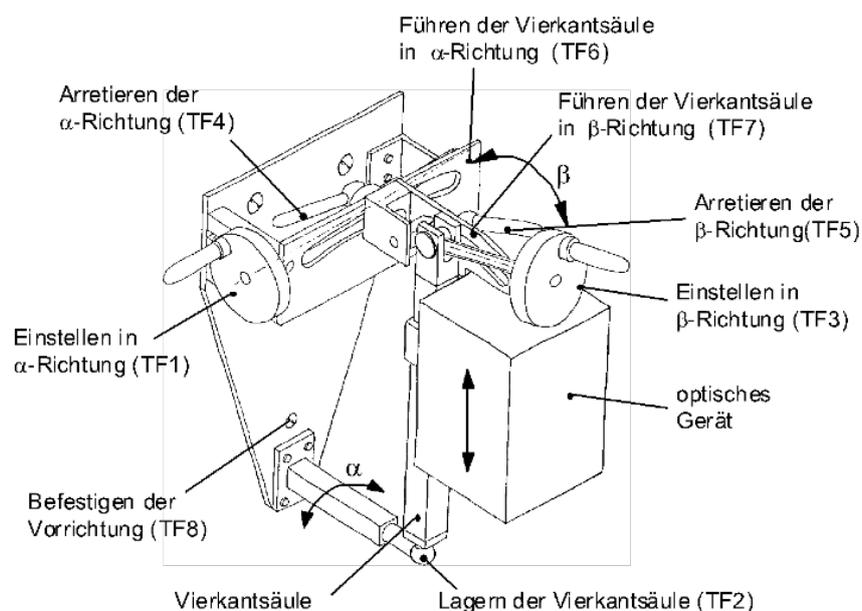


Bild 2: Vorrichtung für das Verstellen eines optischen Geräts mit Angabe von Funktionen der Funktionsträger bzw. Bauteile [5].

An der Vierkantsäule kann ein optisches Gerät für die Entzerrung von Bildern auf und ab bewegt werden. Sie soll in α -Richtung und senkrecht dazu in β -Richtung geschwenkt werden und ist zu lagern. Sie muss fein eingestellt und arretiert werden können. Die Vorrichtung muss an der Wand befestigt werden. Diese Aufgabe war für die Versuchspersonen neu und nicht zu komplex. Sie enthält die acht im Bild dargestellten Teilfunktionen, die aber den Versuchspersonen nicht genannt wurden. Diese erhielten nur einen Text und eine Anordnungsskizze. Die p-Konstrukteure wurden nach Abschluss ihrer Arbeit gefragt, ob sie wüssten, wie sie vorgegangen seien und warum. Sie waren über die

Frage sehr erstaunt und sagten: „Warum fragen Sie? Das macht man eben so!“ Sie waren sich also der von Ihnen verfolgten Abläufe kaum bewusst. Sicher waren dazwischen bewusste Anteile enthalten, offenbar aber nicht hinsichtlich des grundsätzlichen Vorgehens.

Ergebnisse der Konstruktionsarbeit (Siehe Tabelle 1)

Hans, als ein Beispiel für einen „Methodiker“, also m-Konstrukteur, arbeitet wie folgt:

- In einem phasenorientierten Ablauf entsprechend dem Plan nach VDI-Richtlinie 2221 (1993) geht er stufenweise jeweils alle acht Teilprobleme gleichmäßig durch. Phasen sind dabei: Aufgabenklärung, Konzeptphase, und die Entwurfsphase (grob und fein).
- Nach der anfänglichen Aufgabenklärung sucht er also mehrere Lösungen für jede Teilfunktion, die er schließlich zu mehreren Konzeptvarianten kombiniert. Daraus wählt er jeweils wieder eine vielversprechende aus. Dies ist eine sogenannte „generierende Vorgehensweise“.
- Dieser Prozess ist ähnlich zum Multitasking am PC, da gleichzeitig mehrere Probleme und Lösungen in einer gedanklichen „Schwebe“ gehalten werden müssen. (Auch „offen-es Konstruieren“ genannt im Gegensatz zu dem „abschließenden Konstruieren“ der nachfolgend beschriebenen p-Versuchsperson Rolf). Dies benötigt viel Speicherplatz im Arbeits-Gedächtnis, weshalb auch immer wieder dokumentiert (skizziert) werden muss. Entsprechend zeitaufwändig ist das Vorgehen.

Hans benötigt etwa zwölf Stunden für seine Konstruktion, im Gegensatz zu Rolf, der nur 5,3 Stunden braucht. Offenbar leben p-Konstrukteure mit und aus dem Zeitdruck der Praxis und streben eine „akzeptable“ Lösung in kurzer Zeit an. Sie verfolgen schon unbewusst zeitsparende Strategien, während die m-Konstrukteure eher qualitäts-orientiert arbeiten. Zeitverbrauch ist für sie nicht im Vordergrund.

Rolf, der Praktiker (p-Konstrukteur) versucht also, in kurzer Zeit eine akzeptable Lösung zu erreichen und arbeitet wie folgt:

Mit einer Schwerpunktbildung bzw. einem teilproblem-orientierten Vorgehen sucht er erst das für ihn zentrale Problem, die Lagerung der senkrechten Säule zu lösen und geht dabei durch alle Phasen hindurch bis zur gestalteten Entwurfszeichnung. Für ihn ist das zentrale Problem also die Lagerung der Säule. Er überspringt sogar die Phase des Grobentwurfs der zuerst gefundenen Teillösung. Die weiteren Lösungen für die anderen Teilprobleme werden

anschließend gesucht und an die zuerst gefundene Teillösung korrigierend angepasst („korrigierende Vorgehensweise“).

Typisch für Rolf ist: Die kurze Aufgabenklärung am Anfang; die wenigen Lösungsvarianten; das Auswählen der Besten mit einer sehr kurzen, intuitiven Bewertung und die knappe Dokumentation: Alles ist auf die schließlich verlangte Entwurfszeichnung ausgerichtet. Dies und die meist unbewusst ablaufenden Prozesse sparen Zeit: Der Zeitaufwand beträgt nur 44% von Hans. Trotzdem erreicht er 98% der Qualität von Hans.

In Bild 3 sind die Mittelwerte aller m- und p-Konstrukteure einander gegenübergestellt. Die Bewertung der Konstruktionsergebnisse wurde von zwei unabhängigen Teams der TU München und TU Darmstadt durchgeführt. Links ist die Arbeitszeit und rechts die Konstruktionsqualität der einzelnen Versuchspersonen aufgetragen. Auch die obigen beispielhaften Konstrukteure Hans und Rolf sind aufgeführt. Man sieht, dass die Arbeitszeit der fünf p-Konstrukteure im Mittel nur 60% der m-Konstrukteure beträgt. Die Praktiker sind also wesentlich schneller. Ihre relative Konstruktionsqualität ist 87%, d.h. sie ist nur 13% geringer als die der m-Konstrukteure. Die „relative Denkökonomie“ als Verhältnis von relativem Nutzen (Qualität) zu Aufwand (Arbeitszeit) ([5],S.157) beträgt also $87/60 = 1,45$. Das heißt also, dass die p-Konstrukteure um 45% ökonomischer - (besser: effizienter) - denken bzw. ihre Informationsverarbeitung gestalten. Das ist vornehmlich durch deren Zeitorientierung bedingt und die entsprechende Strategie: Schnelles, abschließendes Konstruieren (bei jedem Teilproblem) mit intuitivem, erfahrungsgelitetem Arbeiten bei möglichst geringer Zwischendokumentation. Allerdings fehlt noch der Vergleich mit konstruktionsmethodisch geschulten Ingenieuren (m-Konstrukteuren), die eine ausreichende Zeit in Unternehmen Industrieerfahrung sammeln konnten. Außerdem ist natürlich die Zahl der Probanden und die Unterschiedlichkeit der Objekte viel zu gering. (Die Versuche wurden am Ende meiner aktiven Dienstzeit gemacht).

In Tabelle 1 sind die Unterschiede zwischen den beiden Versuchsgruppen gegenübergestellt. Leider können aus Umfangsgründen hier nicht alle Begriffe erläutert werden, finden sich aber in der Literatur [5]. Die Methoden links wurden bisher konstruktionsmethodisch in der BRD nicht gelehrt. (Ausnahme: korrigierendes Vorgehen bei der Produkt-Generationen-Entwicklung im KIT Karlsruhe [17] und Problemanalyse [19]).

Vorbehaltlich weiterer Untersuchungen scheint es so, dass die Strategie der m-Konstrukteure besser geeignet ist für Innovation und hohe Qualitätsansprüche, während die der p-Konstrukteure eher für im wesentlichen bekannte Produktvarianten bei knappen

Zeitvorgaben sinnvoll ist. Hier liegen aber die meisten Aufgaben in der Praxis! Es ist sehr wahrscheinlich, dass je nach Veranlagung und Erfahrung des Konstrukteurs ein Mischprozess von generierendem und korrigierendem Vorgehen stattfindet [12].

Folgerungen aus dem Konstruktionsbeispiel

Es ist klar, dass die p-Konstrukteure in der Praxis natürlich auch Methoden einsetzen, aber eben unbewusst, wenn auch teilweise andere als die generell von der Konstruktionsmethodik gelehrt (siehe Tabelle 1 links). Die hier beobachtete teilproblemorientierte Vorgehensweise und das korrigierende Konstruieren sind zwei davon.

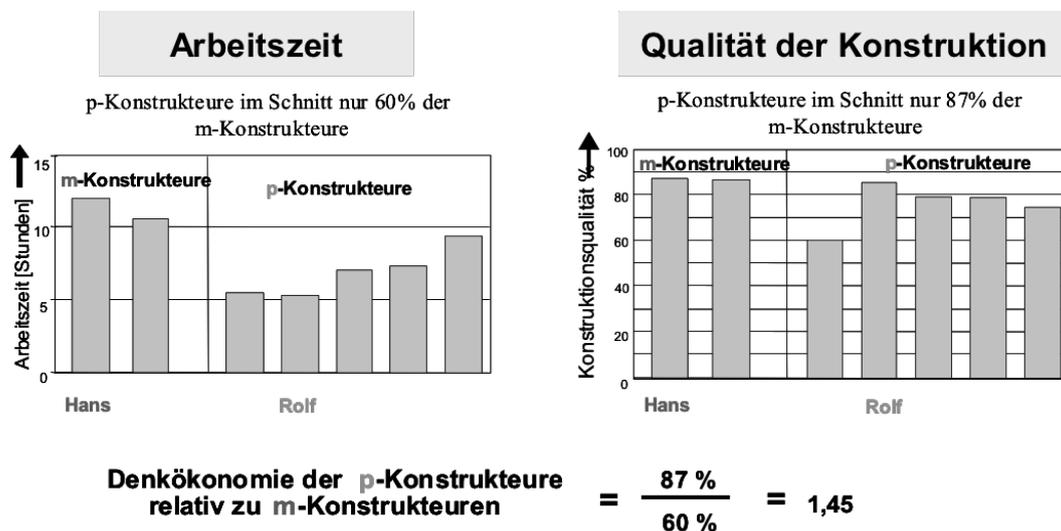


Bild 3: Arbeitszeit und Qualität der m- und p-Konstrukteure im Vergleich (Günther und Ehrlenspiel 1999)

Tabelle 1: Unterschiede im Vorgehen zwischen m- und p-Konstrukteuren

p-Konstrukteur (Praktiker z.B. Rolf)	m-Konstrukteur (Methodiker z.B. Hans)
teilproblem-orientiertes Vorgehen	phasenorientiertes Vorgehen
korrigierendes Vorgehen	generierendes Vorgehen
schnell abschließendes Konstruieren	offenes Konstruieren
zeitorientierte Strategie	qualitätsorientierte Strategie

Diese Methoden bilden sich im Lauf der Zeit aus der praktischen Erfahrung durch trial and error, durch Übernahme aus der Tradition oder von befähigten Vorbildern. Sie sind sicher subjektiv sehr unterschiedlich, ähnlich wie persönliche „Schwimmstile“. Bild 4 zeigt, welche Vielfalt an konstruktiven Ausführungen bei dieser Aufgabe von 9 unterschiedlichen

Bearbeitern entstanden ist. Je nach den individuellen Einfällen und Entscheidungen. (Es sind zu den 5 Personen in Bild 3 noch 4 von ersten Versuchen dazu gekommen).

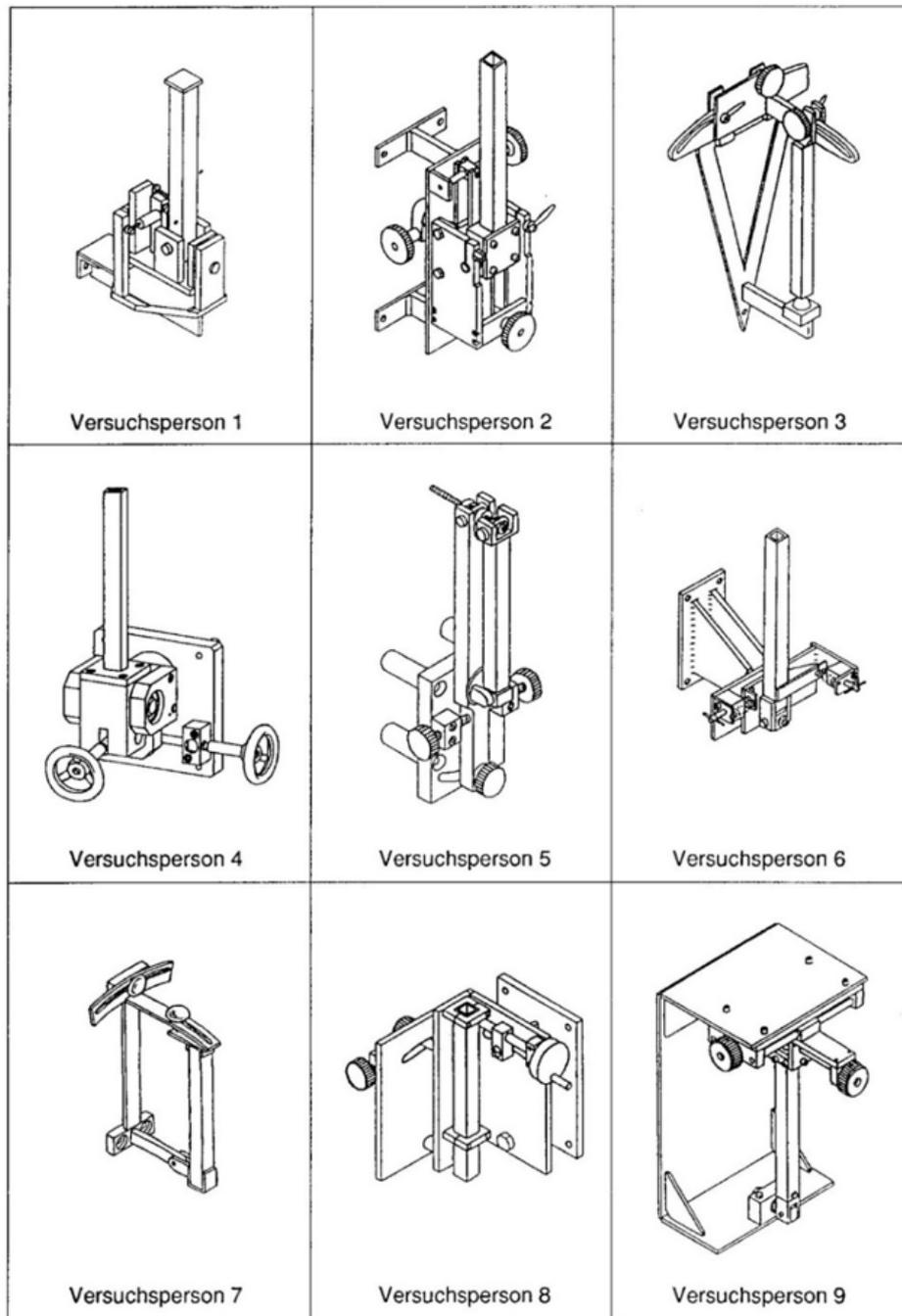


Bild 4: Beispiele für Vorrichtungen, die verschiedene Versuchspersonen entwickelt haben. Zur besseren Übersicht ist jeweils nur die Vierkantsäule ohne optisches Gerät dargestellt.

Einschränkungen des unbewussten Denkens im System 1

„Die Leistungsfähigkeit von System 1 wird jedoch durch kognitive Verzerrungen beeinträchtigt. Das sind systematische Fehler, für die es unter besonderen Umständen in

hohem Maße anfällig ist. Es kann darauf hereinfallen und erzeugt kein Warnsignal, wenn es unzuverlässig wird“. ([2], S.516). Es vereinfacht eine komplexe Wirklichkeit. Beispiele sind: Eine optische Verzerrung: In Bild 5 ist es die Linie mit Pfeilspitzen (unten) bzw. mit Schwanzflossen (oben): Man meint die obere sei länger und die untere kürzer. („Müller-Lyer-Illusion“ bei gleich langen Linien). ([2], S.41). Oder: Auch im rötlichen Abendsonnenschein ist ein weißes Papier weiß und nicht rötlich. – Man kann so etwas nur schwer korrigieren.

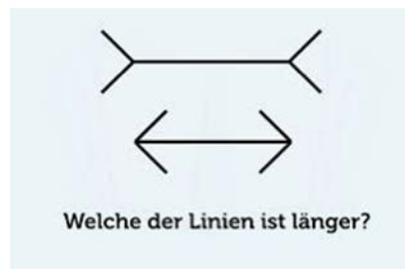


Bild 5: „magische“ Linien

Eine kognitive Verzerrung kommt z.B. durch den HALO-Effekt zustande: Wenn man Jemanden mag, der zudem noch gut aussieht, wird alles, was er sagt und tut, positiv und gültig gesehen. Man „glaubt ihm“. Bei einem Anderen, der nicht „diesen Heiligenschein“ hat, ist man bei gleichen Worten oder Taten skeptisch. Das ist typisch für das unbewusst arbeitende System 1. - System 1, das Unbewusste, hat die Tendenz, aus einem beschränkten Informationsangebot eine einfache, leicht zu merkende Geschichte zu machen. Es konstruiert „wenn-dann“ Zusammenhänge (Ursache-Wirkung), obwohl es auf Grund des beschränkten Info-Angebots problematisch ist. Kahneman nannte das die „WYSIATI“-Regel: **“What You See Is All There Is “**. (Mehr gibt’s nicht als das, was da ist). Offenbar kann System 1 chaotische Vorkommnisse nicht ertragen. ([2], S.112).

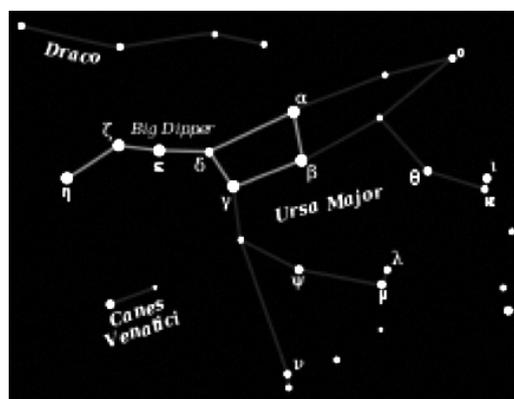


Bild 6: Sternbilder im Umfeld des Großen Bären (Ursa Major)

Typisch dafür ist die Konstruktion von Sternbildern wie z.B. dem „Große Wagen“, ob-wohl die Sterne darin gar keinen physikalischen Zusammenhang haben. (Z.B. von den 7 Sternen im Großen Wagen ist η Ursae Majoris von α Dubhe 101 Lichtjahre entfernt. (Bild 6). Auf der gleichen Linie liegt die Konstruktion von Verschwörungstheorien: „Endlich ist klar, woher die weltweite Corona-Pandemie kommt: Von Bill Gates, der seine Macht aus irgendwelchen dubiosen Gründen ausweiten will.“ System 1 (das Unbewusste) verträgt bei vielen Leuten offenbar schlecht die Vielfalt der Einflüsse und der ungeklärten Zusammenhänge, wie die Corona-Pandemie entstanden sein könnte. Sie wird dann eben durch eine leicht zu merkende und einfach zusammenhängende Geschichte beseitigt. Nach Kahneman ist das Unbewusste eine Art „Sinngemachungs-maschine“, das den großen Einfluss des Zufalls, des Glücks / Pechs ungern akzeptiert. Es will lieber Zusammenhänge, die es dann als „Superzeichen“ (nach Dörner)

abspeichert. Das gilt auch für die „Erinnerungsverzerrung, für Rückschaufehler“: Das Gewesene wird in einen nachträglich „konstruierten bewussten Zusammenhang“ aus bisherigen Überzeugungen eingebaut, in dem das jeweilige Individuum gestärkt und erhalten wird. Bis zur Selbstüberschätzung! Ähnlich: der „Bestätigungsfehler (engl. Confirmation Bias)“ (Dieser systematische Denkfehler wird durch System 1 ausgelöst. Hierbei werden Informationen so gesucht und interpretiert, dass sie der eigenen Ansicht entsprechen [19; 19a]). – Ferner: Eine 4-Augen-Umfrage unter Managern ergab, dass die Hälfte aller Entscheidungen „aus dem Bauch raus“ geschahen. Aber sie würden diese Aussage nie öffentlich machen“. Siehe [3]. - Auch die bisherige (weltweite) Technik- und Produktentwicklung wird so von Vielen als streng logische Entwicklung betrachtet, bei der Zufälle, Chaos, Gefühle oder gar Unbewusstes nichts zu suchen haben. - Das System1 tendiert zur Erhaltung des gegenwärtigen Zustands und hütet sich davor Risiken einzugehen. System 1 nimmt also eher ganzheitlich wahr, es vereinfacht den wahrgenommenen Gegenstand und konzentriert sich darauf. Alternative Sichten oder Varianten erhöhen den Denkaufwand und werden eher unterdrückt. (Anhang 1 mit K1; K2; K4). So wird beim obigen Bild 5 mit den Pfeilspitzen dies insgesamt kürzer wahrgenommen bzw. das mit Schwanzflossen ist äußerlich länger. Das wird einfach auch für die horizontalen Striche übernommen. Beim Vexierbild mit der alten und jungen Frau (Bild 7) konzentriert sich oft der unbewusst und dann bei längerem Hinsehen der bewusste Inhalt z.B. auf die alte Frau, die nach unten links schaut. Die junge Frau, nach hinten schauend, wird erst spät wahrgenommen und nur mit Mühe, nehme ich an. System 1 „mag einfache Formen“ und

nicht wechselnde Inhalte. Entsprechend in Anhang 1, oben K6: „Es unterdrückt Unbestimmtheit und chaotische Zustände“ und K4: „Es liebt eine einfache Sprache und einfache bekannte Begriffe“ bzw. hier: einfache, klare Bildinformationen. Bei Kandel ([8a] S.250; 252) gibt es eine Rubrik „Das Gehirn als Kreativitätsmaschine“. Dort schreibt er sinngemäß, dass es eine schon beachtliche Leistung ist, aus der 2D Struktur von schwarzen Flecken und Linien, die das Auge zunächst sieht, eine 3D Vorstellung eines Kopfs zu generieren. Aber da die im Gehirn bewusst verarbeitbare Informationsmenge für 2 Köpfe zu groß sei, kann es kein gleichzeitiges Sehen beider geben. - Gleiches gilt übrigens für die Vorrichtungen in Bild 4. Das „kreative“ Gehirn kann sogar die Bewegungen der Teile und deren Fertigung und Montage generieren.- Es gilt wohl allgemein: Wir denken und leben in und mit den von uns generierten Modellen! Die Wirklichkeit kann ganz anders sein. –Im System 1 sind auch psychische Grundbefindlichkeiten wie Optimismus / Pessimismus verankert. ([2] S.315). Es wird dort ausführlich gezeigt, welche enormen Auswirkungen sich daraus für den Einzelnen und die Gemeinschaft ergeben.



Bild 7: Im Vexierbild wird jeweils nur eine der beiden Frauen wahrgenommen.

Zusammenfassung der Aussagen zu System 1 / System 2

Das System 1 ist spontan, schnell, leicht, während System 2 durch die Aufmerksamkeit gesteuert wird, mühsam, langsam und manchmal sogar nicht streng logisch ist. ([2], S.514).

2.3 Begründungen zur These C:

Ein gemischtes Vorgehen kann beim Produktentwickeln je nach Situation sinnvoll sein.

In Tabelle 2 sind die zwei Vorgehensweisen des Konstruierens hart gegeneinandergestellt. Links das weitgehend intuitive Konstruieren (à la Rolf) und rechts das systematische Vorgehen. Die Frage ist, bei welchen äußeren Umständen das übliche Arbeiten im

„Normalbetrieb“, System 1), d.h. intuitives, unbewusstes Arbeiten verlassen werden soll, zugunsten eines methodischen, rationalen, diskursiven

Tabelle 2: Wann methodisches, rationales, bewusstes (explizites) Arbeiten im „Rationalbetrieb“ (System 2) wann intuitives, z. T. unbewusstes (implizites) Arbeiten im „Normalbetrieb“ (System1)

Vorgehen Kriterien	Normalbetrieb intuitiv, unbewusst; System 1 , wenn...	Rationalbetrieb explizit, bewusst, System 2 , wenn...
Wichtigkeit des Problems	<ul style="list-style-type: none"> • Problem nicht so wichtig • Fehlentscheidung leicht kontrollierbar 	<ul style="list-style-type: none"> • wichtiges Problem (z.B. hoher Umsatz) • Entscheidung von hoher Tragweite
Neuheit des Problems	<ul style="list-style-type: none"> • altes Problem; es genügt, übliche Lösungen zu verwenden 	<ul style="list-style-type: none"> • vollkommen neue Lösung gesucht • keine ähnliche Lösung bekannt
Komplexität des Problems	<ul style="list-style-type: none"> • eher einfach, klar zu durchschauen • zeitlich konstant, "statisch" 	<ul style="list-style-type: none"> • hohe Komplexität, schwer durchschaubar • zeitlich sich ändernd, „dynamisch“ • unklare, widersprüchliche Ziele
Dringlichkeit des Problems (verfügbare Zeit)	<ul style="list-style-type: none"> • es eilt • Aufwand lohnt nicht 	bei wichtigem, und/oder neuem Problem sollt selbst unter Zeitdruck ein Minimum an Methodik angewandt werden
Organisation der Problembearbeitung	<ul style="list-style-type: none"> • nur wenige aufeinander eingespielte Mitarbeiter, die kaum wechseln 	Wenn Koordination von vielen oder im Lauf der Zeit wechselnden Mitarbeitern nötig ist

Vorgehens im „Rationalbetrieb“ (System 2). Im Bild sind dazu Angaben gemacht z. B. in Abhängigkeit von der Wichtigkeit, Neuheit und Dringlichkeit des Problems, die eigentlich auf der Hand liegen und auch in der Praxis bestätigt werden.– Intuition kann jedoch nicht erzwungen werden. Das Ergebnis ist stark vom Bearbeiter abhängig. Der Weg ist nicht nachvollziehbar, und es besteht die Gefahr, durch Vorfixiertheit Lösungen nur innerhalb eines gewissen fachlichen Horizonts zu finden. (Anhang1 mit K1; K2; K4). Bei mangelndem Wissen und Training können durch vornehmlich intuitives Arbeiten natürlich auch sehr schlechte Lösungen entstehen.

Vor / Nachteile des diskursiven, methodischen Arbeitens im „Rationalbetrieb“ - (System 2). Mit der seit den 60 iger Jahren entwickelten Konstruktionsmethodik.

Diskursives Arbeiten (im System 2) verbessert die Qualität des Produkts, schließt die jedoch die Intuition niemals aus. Dies gilt für viele unterschiedliche diskursive Methoden, die versuchen im Detail die Intuition anzuregen. Durch diskursives Arbeiten werden bessere

Lösungen wahrscheinlicher, die Lösungsvielfalt wird größer und dadurch auch die Sicherheit, keine guten Lösungen vergessen zu haben. Außerdem wird der gesamte Problemlöseprozess dokumentierbar, was das Lösen nachfolgender, ähnlicher Probleme erleichtert und den Lösungsprozess für sich selbst und für andere einsichtig und außerdem lehrbar macht. Methoden helfen bei der Überwindung von Ideenfixierung, Gewohnheitsbremsen oder Betriebsblindheit, aber auch bei der zielgerichteten Lösungssuche, die sich so bei komplexen Problemen auf das Wesentliche konzentriert. Die Methoden müssten auch produkt- und betriebsspezifisch angepasst werden. Nachteilig ist vor allem der höhere Zeitaufwand.

Welch hohen rationalen Anspruch die Konstruktionsmethodik hat, zeigt ein Ausspruch des damals berühmtesten Methodikentwicklers mir gegenüber bei einer Konferenz. Er sagte: "Da hat doch ein Praktiker in meinem letzten Methodikseminar eine sehr gute Lösung eingebracht, auf die wir trotz vorheriger intensiver methodischer Durcharbeit nicht gekommen waren!" Er war sehr nachdenklich und ärgerlich.

Der Anspruch der Konstruktionsmethodik war (und ist heute noch) eben: für ein definiertes Problem das ganze mögliche Lösungsfeld auszubreiten. Und daraus wurde dann methodisch die am besten geeignete Lösung ausgewählt. Die dafür notwendige Arbeitszeit oder gar „Denkökonomie“ war außerhalb aller Diskussion.

Intuitiv Konstruieren am Beispiel Rolf

Nachfolgend ist in Tabelle 3 links (grau) der vorwiegend intuitive Ablauf der Praktiker (Beispiel „Rolf“) dargestellt und rechts daneben Erkenntnisse von [2] Kahneman und [3] Gigerenzer aus der Untersuchung des Unbewussten, soweit sie auf die Erzeugung von Bildern (technische Zeichnungen) übertragbar sind. Danach rechts der Spalte „Was sagt die Konstruktionsmethodik KM (System 2) dazu?“ Ein weiterer Effekt ist die Entlastung des Arbeitsgedächtnisses, wodurch zeitraubende Zwischennotizen eingespart werden.

Tabelle 3: Der vorwiegend intuitive Ablauf der Praktiker (links) und ein Kommentar aus Sicht Kahneman und Gigerenzer bzw. Methodisches Konstruieren

Intuitiv Konstruieren mit Begrenzung des meist unbewussten Arbeitsgedächtnisses			
Wie gehen Praktiker beim Entwickeln vor? Beispiel Rolf	Erkenntnisse von [2] Kahneman und [3] Gigerenzer	Was sagt KM dazu? [7] VDI-Richtlinie 2221.	Erläuterungen (Siehe Anhang 1 und 2)
1	Aufgabenklärung (nur kurz; nur Lesen und erste Fragen)	-	KM: Eine „lebende“ Anforderungsliste ist immer eine Notwendigkeit!
2	schrittweises Arbeiten	Wiedererkennungs-Heuristik WH nach [3] Gigerenzer ist dominierend (WH: Anhang 2)	das Arbeitsgedächtnis hat eine geringe Kapazität von 7+/-2 Chunks. Deshalb kann es nur schrittweise vorgehen und muss nach jedem Schritt neu abspeichern. (Ein Chunk ist eine zusammenhängende Denkeinheit, ein Symbol: (sprachlich oder bildhaft) Z.B. eine Formel oder z.B. eine Fahrradgangschaltung
3	iteratives Arbeiten	ebenso	Langzeitgedächtnis kommt durch laufende Wiederholungen von Denkvorgängen zustande: [8] Kandel, S. 237
4	Pendeln zwischen dem Ganzen und dem Detail	ebenso	
5	Pendeln zwischen dem Abstrakten und Konkreten	ebenso	
6	das intuitiv Wichtigste zuerst tun. z.B. was als wichtigstes Teilproblem auffällt	ähnlich K3 nach [2] Kahneman: Aufmerksamkeit in Stufen	Das Langzeitgedächtnis kommt durch laufende Wiederholungen von Denkvorgängen zustande: [8] Kandel, S. 237
7	teilproblemorientiertes Konstruieren	K3 und K8 WYSIATI-Regel: was ist verfügbar?	systematisches, generierendes Vorgehen empfohlen
8	korrigierendes Konstruieren	K13 assoziatives Denken	eher untergeordnet
10	Verringerung von alternativen Lösungen	K8 Konzentration auf verfügbare Informationen	Suche und Bearbeitung von Alternativen ist wesentlich
11	Bewertung von Lösungen ohne tiefergehende Analyse	D7 und D8 entsprechend gefühlmäßiger Erfahrung	Bei KM ist eine gute Analyse wesentlich für anschließende Bewertung

2.4 Zusammenfassend vier Thesen zur Produktentwicklung

- Denken und Handeln im routiniert, unbewusst gesteuerten „Normalbetrieb“ (**System 1**) sind wegen ihrer Effektivität zu bevorzugen.

- Auch beim „Normalbetrieb“ ist von Zeit zu Zeit eine methodische Orientierung zweckmäßig: „Wo stehen wir im Prozess? Was sind die weiteren Schritte? Wo können sich Probleme ergeben?“ Siehe auch unten: „Minimalmethodik“.
- Den „**Rationalbetrieb**“ (**System 2**), also methodenbewusstes, laufend reflektiertes und kontrolliertes Denken und Handeln nur in Problemsituationen anwenden, wo es nötig ist. Also z.B. bei komplexen und besonders innovativen, sowie arbeitsteilig in der Gruppe vollzogenen Projekten.
- **Neue Produkte, Systeme** zu konzipieren, zu entwerfen ist kein „exakter“, zwangsläufiger, wissenschaftlich begründbarer Prozess, der unabhängig von Personen immer das gleich gute Ergebnis hervorbringt, wie es z.B. bei physikalischen Berechnungen möglich ist. Dies deshalb, da der teilweise unberechenbare Mensch ein Teil dieses Prozesses (KM) ist. [16]. – Dagegen ist die Optimierung und Berechnung des aus diesem Prozess entstandenen „physikalischen“ Produktes durchaus ein „exakt“ nachvollziehbarer Prozess (Siehe Vorgehensweise im Bereich „Maschinenelemente“). **Es existiert eine prinzipielle Trennung von KM und ME!**

3 Vorschlag zur Ergänzung intuitiven Vorgehens mit einer „Minimalmethodik“

In Tabelle 3 wurde der intuitive Ablauf am Beispiel Rolf dargestellt. Die 4 Forderungen unten in Tabelle 4 sind nach meiner Erfahrung am wichtigsten, um grobe Fehler zu vermeiden.

Der Zeitaufwand lohnt sich, da man damit oft eine erneute Überarbeitung spart. Es geht also um eine Kombination von System 1 und 2. Im Übrigen sind die realisierten Vorgangsweisen in der Praxis ohnehin unterschiedlich, je nach Unternehmen, Produktart, Person.

Tabelle 4: Wenn man schon aus Zeitgründen intuitiv vorgehen will, wie in Tabelle 3 links, sollte man zur Qualitätsabsicherung eine Art „Minimalmethodik“ einhalten.

„Minimalmethodik“ beim intuitiven Vorgehen; auch im Team	
laufende Aufgabenklärung (Schritt 1) mit dem Kunden	eine der wichtigsten Aufgaben. Ergebnis: lebende Anforderungsliste
ein oder zwei Alternativen überlegen	mindestens für die wichtigsten Lösungselemente
diese begründet auswählen (Schritt 10)	
gesamtes Produkt relativ zur Anforderungsliste bewerten (Schritt 11)	

3.1 SCRUM als eine weitere Kombination von System 1 und 2

Japanische Firmen bevorzugen **SCRUM**, als eine Vorgehensweise, bei der kleine, selbstorganisierte Einheiten, selbst die Taktik bestimmen, wie sie ihr gemeinsames Ziel erreichen und im fortwährenden Kontakt mit dem Kunden die optimale Lösung finden. – Sie würden in der geschilderten rationalen Konstruktionsmethodik KM nur die Spitze eines Eisbergs sehen (Siehe Bild 1). Für sie ist Wissen über das Vorgehen und die Lösungssuche viel breiter verankert und in erster Linie unbewusst (implizit oder „tacit“). Dieses implizite Wissen ist subjektiv und intuitiv. Unternehmen wie Toyota, Canon oder z.B. Miele profitieren so vom impliziten Wissen ihrer Mitarbeiter, indem sie hohen Wert auf die Interaktion zwischen ihren Mitarbeitern legen. – Es ist nach meiner Meinung eine gute Kombination zwischen System 1 und 2 (Unbewusstem und Rationalität), bei dem 3 bis 9 Entwickler in einem Team ihr Wissens- und Kreativitätspotenzial in Eigenregie „agil“ zur Entfaltung bringen. Entstanden im Software-Bereich wird es immer mehr im in der „Hardware-Technik“ eingesetzt. - Sollte man nach [16] nicht den Versuch wagen, die klassische KM mit der Agilen Entwicklungsmethodik zu verschmelzen? – Für Einzelheiten als Literatur z.B. Jeff Sutherland [13] und B. Gloger [14] ; A. Schröder [14a] und ein Link: <https://www.it-agile.de/wissen/einstieg-und-ueberblick/was-ist-agile-produktentwicklung>

3.2 Fragen zum Schluss

- Wie kann eine Forschungsintegration für U&R (Unbewusstes und Rationales Arbeiten) von z.B. Neuropsychologie, Hirnforschung, Ingenieurmethodik und -praxis, Datenverarbeitung und KI zustande kommen?
- Es müsste untersucht werden: U&R-Arbeit bei individuellem Konstruieren; beim Konstruieren im Team (Beispiel [19; 19a]); wie bewährt sich die neue Methodik in der Praxis, wie im Unterricht?
- Welche Ergebnisse könnten daraus allgemein und für die Ingenieur-Praxis entstehen? (z.B. Vermeidung typischer Denkfehler [19]; auch eine Rangfolge alternativer Methoden hinsichtlich ihrer „Denk- und Durchführungs-Ökonomie“ [5] Kap. 3.6). Einen Input für einen besseren Start von KI beim Konstruieren. (Wir sind noch am weiterdenken!)

4 Anhang

Anhang 1 Wichtige Eigenschaften von System 1 nach Kahneman [2] (S.136; Auswahl)

- K1 System 1 erzeugt Eindrücke, Gefühle und Neigungen. Mit Unterstützung von System 2 werden diese zu Überzeugungen, Einstellungen und Intentionen.
- K2 Es arbeitet automatisch und schnell, weitgehend mühelos und ohne willentliche Steuerung. Das Gefühl der momentanen Stimmungslage spielt eine große Rolle. – System 2 bewährt sich dagegen mit Selbstkritik und dem Zweifel an Aussagen! [ebd., S.133]
- K3 Es kann von System 2 so programmiert werden, dass Aufmerksamkeit mobilisiert wird, etwa für die Suche nach einem bestimmten Muster.
- K4 Es verbindet ein Gefühl kognitiver Leichtigkeit mit Wahrheitsillusionen, angenehmen Gefühlen und verminderter Vigilanz (Daueraufmerksamkeit). Die Leicht-gläubigkeit von System 1 wird unterstützt, wenn eine einfache Sprache und einfache bekannte Begriffe gewählt wurden, wenn die Info öfter wiederholt wird, wenn sie mit einprägsamen Bildern verknüpft wird (Siehe K7 Halo-Effekt; K12. Framing in [ebd.,S.86]).
- K5 Es unterscheidet das Überraschende vom Normalen. (Siehe unten K10.)

- K6 Es schließt auf Ursachen und Absichten und erfindet (sic!) beide. (Wenn ... Dann-Aktivität). Es unterdrückt so Unbestimmtheit und chaotische Zustände. Siehe zuvor K4. Dazu: Es vernachlässigt Mehrdeutigkeit und unterdrückt Zweifel.
- K7 Es hat die Tendenz (auch zweifelhaften) Informationen zu glauben und sie zu bestätigen. Dazu: Es überzeichnet die emotionale Konsistenz (Halo-Effekt) [ebd., S.17]. Siehe oben K4.
- K8 Es konzentriert sich auf verfügbare Informationen und blendet fehlende aus. („WYSIATI“-Regel [ebd., S.112]. Siehe oben K7 und K12.
- K9 Es ersetzt manchmal eine schwierige Frage durch eine leichtere: Heuristik [ebd., S.127].
- K10 Es übergewichtet niedrige Wahrscheinlichkeiten (z.B. durch einen momentanen „Gefühlsüberschwang“). Dazu: Es reagiert empfindlicher auf Veränderungen als auf sich widersprechende Zustände.
- K11 Es reagiert stärker auf Verluste als auf Gewinne (Vermeidung von Verlusten ist wichtiger als ein Zuwachs bei Gewinnen: „Verlustaversion“; der Mensch bevorzugt lieber niedere, aber sichere Gewinne „Risikoaversion“ Z.B. beim Aktienhandel: Prospect-Theorie). [ebd. S.547].
- K12 Es spielt eine Rolle, wie ein Entscheidungstext formuliert ist. Das sogenannte Framing: Je nachdem ist ein Glas halbvoll oder halbleer [ebd., S.72, 78, 552].
- K13 Es bewegt sich assoziativ in einem jeweiligen Gedankenbereich (Priming). Z.B. wenn es im Gespräch über das Alter ging, fallen einem unmittelbar die Worte „langsam“ oder „vergesslich“ ein. Junge Leute, die das in einem Seminar thematisierten, gingen danach messbar langsamer [ebd. S.72].
- K14 Es hat ein assoziatives Gedächtnis: in einem bestimmten Gedankenbereich fallen zu Worten und Gesehenem zugehörige (auch bildhafte) Verknüpfungen ein. Z.B. beim Stichwort Befestigen im Maschinenbau kommen Assoziationen „Kleben statt Bohren“ oder „Umwickeln“. Das System 1 kann dabei kreativ werden [ebd. S.71]. Siehe unten die Wiedererkennungsheuristik bei G2.

Anhang 2 Welche Erkenntnisse kann man Gigerenzer [3] entnehmen?

G1. Das Unbewusste arbeitet mit einem „Adaptiven (intelligentem) Werkzeugkasten“ (AW), in dem „Bauchregeln“ bestimmte Fähigkeiten je nach Situation aufrufen. Beispiele: Beim Problem, einen fliegenden Ball zu fangen, werden folgende *Fähigkeiten in einer

Bauchregel verknüpft [3, S.71]: *Ball mit den Augen fixieren und verfolgen,*Laufen beginnen, so dass der Sichtwinkel zum Ball möglichst konstant bleibt, *Laufgeschwindigkeit danach anpassen, *Ball mit Händen fangen.– Beim Problem Fahrradfahren, d.h. Gleichgewicht halten, schon beim Aufsteigen aufs Rad: *kompensieren von auftretenden Seitenneigungen durch Lenkereinschlag in die Fallrichtung, *dann möglichst Geschwindigkeit erreichen, damit der Lenkereinschlag etwas bewirken kann. (Der Lenkereinschlag in die Fallrichtung ergibt eine Fliehkraft entgegen der Fallrichtung).

Die Bauchregeln können, wie beim Schwimmen oder Handschreiben, zunächst gelehrt und erprobt werden, dann aber ins Unbewusste absinken ([8] Eric Kandel, S.151), oder aber sie werden nur durch Probieren gebildet und verbleiben, nicht rational verbalisierbar, im Unbewussten. (Wie meist oben beim Ball fangen oder Rad fahren). Besonders gut funktionieren Bauchentscheidungen, wenn sie auf Fachwissen beruhen. Der Werkzeugkasten ist insofern intelligent, weil aus dem Unbewussten nach entsprechender Übung die geeigneten Regeln bereitgestellt werden.

G2 Wiedererkennungsheuristik WH (Rekognitionsheuristik): Statt Heuristik könnte auch von "Lösungs-Suchverfahren" gesprochen werden. Dies ist ein einfaches Werkzeug, eine Faustregel, die als Richtschnur für intuitive Urteile als auch persönliche Entscheidungen dienen kann. (z.B. bei der Wahl eines Kleides, eines Lebensstils oder eines Partners) ([3], S.122).

Wenn es um den Kauf eines Gerätes geht und man keine Zeit hat (und keinen TEST), oder alle Beschreibungen zu lesen, dann wähle die Marke, die du wiedererkennst. Dann liegt man im Mittel nicht ganz falsch. Dazu gehört natürlich eine Rekognitions-Validität, d.h. wieviel Geräte oder Marken kennst du überhaupt? Wie lange hast du Erfahrung in diesem Bereich? Wieviel hast du in Medien darüber gelesen? Gigerenzer schreibt (S.135): „Wir beginnen langsam zu verstehen, dass kognitive Beschränkungen nicht einfach Schwächen sind, sondern unserer Urteilsfähigkeit zugutekommen können.“ Unsere beschränkte Speicherkapazität – vor allem im Hinblick auf die digitale des Rechners – bedingt eine Auswahl auf das für uns wesentliche! Es gibt folgende Grenzen dafür: Siehe oben K12 /13 die Vorgänge beim (Priming bzw Framing): „Das Lieblingsbier fällt bei einer neutralen Geschmacksprobe gegenüber anderen Bieren ab!“ ([3] S.144): „Trotzdem ist einer Vielzahl von Fällen die Bauchentscheidung, sich an das zu halten, was man kennt, eine nützliche Richtschnur im Leben“. Zur Wiedererkennungsheuristik WH gehört auch z.B. Wiedererkennung von Gefühlen aus den Details der Mimik von Gesichtern. Dies ist ja ein

täglich auftretender Fall! Geringe Veränderungen im Gesicht geben uns Hinweise aus eigener langjähriger Erfahrung.

Zur Wiedererkennungsheuristik WH gehört auch die Zuordnung von Gesichtern und zugehörigem Eigennamen. Beides ist im Gehirn unbewusst gespeichert, aber nicht ausreichend verknüpft. Die automatische Mimikererkennung ist heute ein Gebiet der Künstlichen Intelligenz. Deshalb muss es mit System 2 gelernt werden, z.B. durch besondere Aufmerksamkeit mit Nachfragen und Eselsbrücken bilden (Beruf, Herkunft, Namensanalogie).

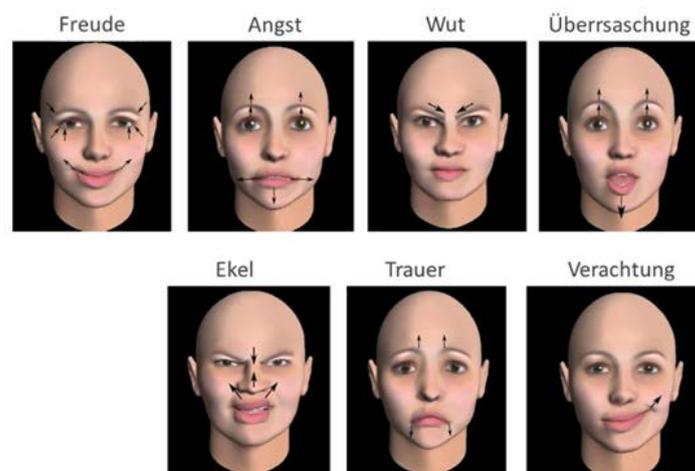


Bild 8: Das Unbewusste erkennt aus der Mimik Gefühlregungen

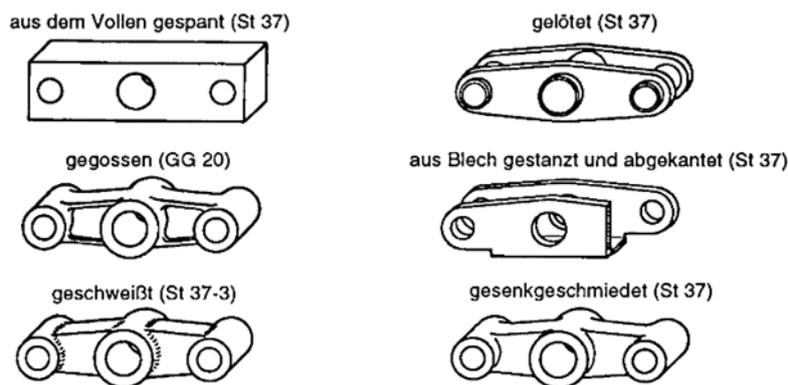


Bild 9: Ein Doppelhebel mit unterschiedlichen Fertigungsarten [5]

In der Technik (Bild 9) werden in ähnlicher Weise im Langzeitgedächtnis des Gehirns typische Gestaltanordnungen als Bilder, teilweise mit Eigenschaften gespeichert und bei einer jeweiligen Problemsituation abgerufen und ausgewählt. Gigerenzer spricht auf S. 142 von einer „Intelligenz des Unbewussten“.

Elektroniker rufen so wohl Schaltungen mit Schaltungsdetails oder Programmelemente aus ihrem unbewussten Speicher ab. Das kann für einen Spezialkonstrukteur auch eine ganze „Wolke“ von Bauteilen und deren Anordnungen seines Spezialproduktes, z.B. eines Getriebes sein.

Literatur

- [1] Ehrlenspiel, K.: Zur Rolle des Unbewussten und der Denkökonomie beim Konstruieren. Vortrag Tagung „Human Behaviour in Design 2003“ 9.-13.3.2003 Hohenkammer, Bayern. (Veröffentlichung in englischer Version in einem gleichnamigen Buch „London: Springer 2003)
- [2] Kahnemann, D.: Schnelles Denken, langsames Denken. München: Siedler /Pantheon 2012/2014
- [3] Gigerenzer, G: Bauchentscheidungen. München: Goldmann 2008
- [4] Müller, J.: Akzeptanzbarrieren als berechtigte und ernstzunehmende Notwehr kreativer Konstrukteure. Nicht immer nur böser Wille, Denkrägheit oder alter Zopf. In: Hubka, V. (Hrsg.): Proceedings of ICED 1991; Zürich: Edition Heurista 1991, S.769–776. (Schriftenreihe WDK 20) in Hubka,V.: Proceedings of ICED 1991, Zürich, Edition Heurista 1991 S.769-776 (Schriftenreihe WDK 20)
- [5] Ehrlenspiel, K.: Integrierte Produktentwicklung. (IPE) München: Hanser 2017
- [6] G. Pahl, W. Beitz, J. Feldhusen, K.-H. Grote: Konstruktionslehre – Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung Methoden und Anwendung. 8. Aufl. Springer, Berlin 2013,
- [7] VDI-Richtlinie 2221. Entwicklung technischer Produkte und Systeme. Düsseldorf: VDI-Verlag 2016
- [8] Kandel, E.: Auf der Suche nach dem Gedächtnis. München: Siedler 2006
- [8a] Kandel, E.: Das Zeitalter der Erkenntnis. München: Siedler 2012
- [9] Dörner, D.: Die Logik des Misslingens. Reinbeck: Rowohlt 1989
- [10] Günther, J.: Individuelle Einflüsse auf den Konstruktionsprozess. Diss. TU München 1998; Aachen: Shaker 1998.
- [11] Pöppel, E.: Informationsverarbeitung im Gehirn. Der GMD Spiegel 3; S. 48-51
- [12] Hacker, W.: Denken in der Produktentwicklung. Mering: Hampp 2002
- [13] Sutherland, J: Die Scrum Revolution: Management mit der bahnbrechenden Methode der erfolgreichsten Unternehmen. Frankfurt, Campus Verlag: 2015
- [14] Gloger,B.: Scrum, Produkte zuverlässig und schnell entwickeln. München, Hanser: 2016, 5. Aufl.
- [14a] Schröder, A.: Agile Produktentwicklung: München, Hanser 2018, 2.Aufl.
- [15] Roth, Gerhard: „Wir werden gelebt“; persönliche Bemerkung ca. 1982
- [16] Birkhofer, H.; Darmstadt: persönliche Email-Kommunikation 2020
- [17] Albers, A.; Bursac, N.; Rapp, S.: PGE – Produktgenerationsentwicklung am Beispiel des Zweimassenschwungrads 2017. Forschung im Ingenieurwesen, 81 (1), 13–31. doi:10.1007/s10010-016-0210-0
- [18] Badke Schaub, P.; Frankenberger, E. : Analysis of design projects. 1999 Design Studies, 20(5), 465–480.

-
- [19] Nelius, T. & Matthiesen, S. (2019). Experimental Evaluation of a Debiasing Method for Analysis in Engineering Design. In S. Wartzack & B. Schleich (Hrsg.), DS 94: Proceedings of the Design Society: 22nd International Conference on Engineering Design (ICED19) (S. 489–498). Cambridge: Cambridge University Press.
- [19a] Nelius, T., Eisenmann, M., Grauberger, P. u. Matthiesen, S.: Tatort Technik – Herausforderungen bei der Problemanalyse beim Konstruieren. Konstruktion - Zeitschrift für Produktentwicklung und Ingenieur-Werkstoffe (eingereicht 2020)

Wer Prof. Gigerenzer selbst hören will, kann das in der Radiosendung BR2 von 2017 tun. Der Link ist: <https://www.br.de/mediathek/podcast/radiowissen/intuition-gefuehltes-wissen-aus-dem-unbewussten/31966>

Optimierung der Materialausnutzung in der direkten Additiven Fertigung topologieoptimierter Strukturen

**Tobias Rosnitschek, Tobias Siegel, David Linke, Philippa Mailänder, Dominik Kamp,
Frank Rieg**

Lehrstuhl für Konstruktionslehre und CAD, Universität Bayreuth

Universitätsstr. 30, 95447 Bayreuth

Email: tobias.rosnitschek@uni-bayreuth.de; Internet: <https://www.konstruktionslehre.uni-bayreuth.de>

Inhalt: Die Topologieoptimierung ermöglicht die Identifikation einer optimalen Materialverteilung innerhalb eines definierten Bauraums unter vorgegebenen Randbedingungen. Daher eignet sie sich außerordentlich zur Realisierung von Leichtbaupotentialen und strukturoptimierten Komponenten. Die resultierenden Designvorschläge sind jedoch oft schwer zu interpretieren und lassen sich aufgrund ihrer Struktur nur selten über konventionelle formgebende Prozesse fertigen. In diesem Beitrag wird aufgezeigt, wie anhand finiter Kugeln Fertigungsrestriktionen bei der Topologieoptimierung berücksichtigt werden, sodass die notwendige Stützstruktur der optimierten Bauteile in der Additiven Fertigung minimiert wird. Zur weiteren Minimierung des Materialeinsatzes in der Fertigung wird ein Ansatz zur automatisierten Bauteilorientierung und Stützstrukturgeneration vorgestellt.

Stichwörter: Additive Fertigung, DfAM, Digitale Produktentwicklung, Leichtbau, Topologieoptimierung

Optimizing material exploitation in the direct additive manufacturing of topology-optimized structures

Abstract: Topology optimization allows the identification of an optimal material distribution within a defined design domain under given boundary conditions. It is therefore extremely suitable for realizing lightweight construction potentials and structurally optimized components. However, the resulting design proposals are often difficult to interpret and, due to their structure, can rarely be produced using conventional forming processes. This paper shows how finite spheres can be used to consider manufacturing restrictions in topology optimization, so that the necessary support structure of the optimized parts obtained is minimized in additive manufacturing. To further minimize the material usage in manufacturing, an approach for automated component orientation and support structure generation is presented.

Keywords: Additive Manufacturing, DfAM, Digital Product Development, Lightweight Engineering, Topology Optimization

1 Einleitung und Motivation

Gesellschaftliche und politische Entwicklungen führen dazu, dass der Leichtbau zunehmend an Bedeutung gewinnt. Beinahe alle Branchen profitieren von den Vorteilen der resultierenden Materialersparnis in Fertigung und Betrieb [1]. Daher spielt im Zuge eines stärker werdenden Umweltbewusstseins das Ausnutzen von Leichtbaupotentialen in der Produktentwicklung eine immer wichtigere Rolle. Um diese Potentiale zu heben, ist die Kopplung von Topologieoptimierung und Additiver Fertigung (AM, Additive Manufacturing) geeignet. Dies ermöglicht einen digitalen Produktentstehungsprozess, wobei das AM als dessen physischer Arm verstanden werden kann. Grundsätzlich lassen sich so nahezu beliebig komplexe Strukturen fertigen. Jedoch wird dafür in den meisten Fällen ein nicht unerheblicher Anteil an Stützstrukturen benötigt. Diese wirken der ansonsten hohen Materialausnutzung des Prozesses entgegen und müssen im Kontext einer nachhaltigen Produktentwicklung zwingend berücksichtigt werden. Der notwendige Stützstrukturanteil ist abhängig von der Geometrie des Bauteils und seiner Orientierung innerhalb des Bauraums. Folglich gliedert sich der Ansatz zur Optimierung der Materialausnutzung in zwei Bereiche: Zum einen können durch selbststützende Bauteile Stützstrukturen allgemein vermieden werden und zum anderen kann der notwendige Anteil der Stützstruktur durch eine optimale Bauteilorientierung reduziert werden. Mithilfe dieser beiden Prozesse kann eine Prozesskette zur direkten Fertigung optimierter Designvorschläge, basierend auf der Vorgabe eines Bauraummodells, mit den zugehörigen Randbedingungen aufgestellt werden. So werden Schleifen in der Produktentwicklung vermieden und infolgedessen die Produktivität deutlich erhöht [2]. In diesem Beitrag werden zunächst bestehende Lösungsstrategien zur Effizienzsteigerung in der Additiven Fertigung vorgestellt. Im Anschluss wird gezeigt, wie mithilfe finiter Kugeln Fertigungsrestriktionen implementiert und für verschiedene Fertigungsverfahren interpretiert werden. Hierbei wird ein kritischer Überhangswinkel definiert, um Stützstrukturen zu vermeiden. Weiterführend wird ein Ansatz vorgestellt, der es erlaubt, im Anschluss an die Topologieoptimierung die optimale Bauteilorientierung zu identifizieren, um Produktionszeit und Stützmaterial zu minimieren.

2 Lösungsstrategien zur Effizienzsteigerung in der Additiven Fertigung

Die allgemeine Konstruktionsmethode zur Bauteilerstellung für das AM wird als Design for Additive Manufacturing (DfAM) bezeichnet. Dabei ist unter einer Konstruktionsmethode das

planmäßige Vorgehen unter der Verwendung verschiedener Methoden und Werkzeuge zu verstehen [3]. Enggefasst beschreibt dies im Bereich des AM Methoden zur Nutzung der Potentiale oder Einhaltung der (Fertigungs-)Randbedingungen. Dabei ergeben sich je nach Material und Prozess für die jeweilige AM-Anlage spezifische Restriktionen. Beispiele hierfür sind Wandstärken, Überhänge oder Druckgeschwindigkeiten [3 - 5]. Im Kontext des DfAM wird dies als restriktiver Ansatz beschrieben. Die Topologieoptimierung auf der anderen Seite orientiert sich an den Potentialen des AM [6] und wird daher als opportunistischer DfAM Ansatz bezeichnet. Die Berücksichtigung der spezifischen Restriktionen in der Topologieoptimierung stellt folglich einen kombinierten Ansatz dar, der sowohl die Potentiale des AM nutzt als auch zeitgleich dessen Restriktionen beachtet. Auf diese Weise werden Designvorschläge in herstellbare Bauteile überführt, die nach geeigneter Glättung direkt gefertigt werden können [7]. Die Übertragung von Fertigungsrestriktionen in Randbedingungen, die sinnvoll in den Topologieoptimierungsprozess eingebaut werden können, wurde bereits ausführlich für die Designfindung bei Gussbauteilen beschrieben [8, 9]. Da die Herangehensweise und auch die Problemstellung in weiten Teilen identisch sind, können diese Ergebnisse auf die Anwendung im AM übertragen werden.

Die Effizienzsteigerung des AM ist derzeit intensiver Forschungsgegenstand. Dabei wird sich nicht nur auf Materialentwicklung und Prozessoptimierung beschränkt, sondern es werden auch ganzheitliche Ansätze entlang des Gesamtprozesses betrachtet. Durch die Minimierung von Kosten, Materialeinsatz und Produktionskosten, entsteht ein Mehrwert, der das Potential des AM in seiner Gesamtheit anhebt. Einen Parameter, der sich signifikant auf all diese Bereiche auswirkt, stellen Stützstrukturen dar, weshalb sich zahlreiche Publikationen mit deren Generierung bzw. Optimierung beschäftigen [10 – 12].

Insbesondere Stützstrukturen haben eine hohe Auswirkung auf verschiedene Kostenparameter des AM (Produktionszeit, Gesamtkosten, Qualität des Bauteils, Materialverwendung). Ebenso hinterlässt die Entfernung der Stützstrukturen im Nachbearbeitungsprozess Artefakte auf der Oberfläche, welche zu Unebenheiten oder Kerben bzw. initialen Rissen führen können [13, 14]. Während der Formgebung erfüllt die Stützstruktur sowohl mechanische als auch thermische Funktionen. Letztere sind hauptsächlich in den laser- bzw. elektronen-strahlbasierten AM-Prozessen notwendig und dienen zur Wärmeableitung. Auf diese Weise werden hohe Eigenspannungen im Bauteil aufgrund hoher thermischer Gradienten vermieden. Fehlerhafte oder ein zu geringer Anteil an Stützstrukturen führt in diesen Prozessen konsequent zu Verzügen und Rissen bis hin

zum Gesamtversagen des Bauteils [10]. Die mechanische Funktion der Stützstrukturen ist bei den meisten AM-Prozessen relevant und dient dazu überhängende Bereiche zu stützen [4, 15]. Bereits die Bestimmung eines Grenzwerts des Überhangwinkels ist dabei abhängig von Material, Anlage und Druckparameter [11] und entsprechend aufwändig zu ermitteln. Topologieoptimierte Bauteile haben in der Regel komplexe, ungleichmäßige und überhängende Strukturen, die als Resultat der optimalen Materialverteilung entstehen [6]. Daher sind ausreichend Stützstrukturen nötig, um die Stabilität während des Druckprozesses zu gewährleisten. Ein naheliegender Ansatz zur Stützstrukturminimierung besteht demnach darin, die Stützstrukturen in das Bauteil zu integrieren und somit selbststützende Strukturen zu generieren. Diese Methode wird beispielsweise in [16] oder [13] verfolgt und wird auch im Rahmen dieses Beitrags aufgegriffen.

Der vollständige Verzicht auf Stützstrukturen ist dabei nicht uneingeschränkt zielführend. Daher ist ein weiterer Schritt zur Minimierung des Gesamtmaterialverbrauchs die optimale Wahl von Stützstrukturen und Designorientierung [4] und eine entsprechende Orientierung des Bauteils, damit dieses so auf der Bauplatte ausgerichtet wird, dass die geringste Anzahl an überhängenden Abschnitten entsteht [5].

Sind die Ansätze der selbsttragenden Struktur und der optimalen Bauteilorientierung bereits ausgenutzt, verbleibt als letzte Optimierungsgröße die Stützstruktur selbst. Dies wird beispielsweise in [10] und [11] demonstriert. Dabei liegt das Hauptaugenmerk auf der Optimierung von Gitterstrukturen und ihren Zellen, deren Basis eine Stützstruktur mit optimierten thermischen Eigenschaften generiert wird. Im Bereich der mechanischen Optimierung kann der bereits erwähnte kritische Überhangswinkel eingesetzt werden, um verzweigte Stützstrukturen zu erzeugen. Mithilfe dieser erhaltenen Baumstruktur kann gegenüber senkrechtstehenden Stützen eine hohe Materialeinsparung erzielt und dadurch die Ressourceneffizienz des Prozesses gesteigert werden [11].

3 Fertigungsrestriktionen auf Basis finiter Kugeln

Hinterschneidungen und im allgemeinen Entformungskonflikte sind bei vielen Fertigungsverfahren häufig auftretende Restriktionen. Dabei steht Formmaterial der Entformung des Bauteils im Weg. In der Topologieoptimierung werden Elemente deaktiviert, die dann ein Negativ des Bauteils bilden und damit als Formmaterial betrachtet werden können. Diese Vorgehensweise kann abstrahiert auch für die Berücksichtigung von AM-Restriktionen verwendet werden. Existiert ein kritischer Überhangswinkel, so sind

Strukturen, die diesen überschreiten, nicht ohne Stützstrukturen herstellbar. In diesem Kontext können demnach die deaktivierten Elemente als Begrenzung angesehen werden, innerhalb derer das Bauteil selbststützend ist, während die Entformungsrichtung als Aufbaurichtung verstanden werden kann. Somit wird aus dem Entformungskonflikt ein Stützkonflikt.

Ein Bauteil ist dann hinterschneidungsfrei, wenn sich kein Element der Form in Richtung der Entformung mit einem Bauteilelement überlappt. Dabei sind für eine geteilte Form positive und negative Entformungsrichtung zu beachten. Unter Berücksichtigung eines Entformungswinkels lässt sich so für jedes Element jeweils ein Kegel in positive und negative Entformungsrichtung finden. Die Bedingung für ein hinterschneidungsfreies Bauteil ist dann erfüllt, wenn für alle Formelemente mindestens einer der Kegel kein Bauteilelement enthält.

Ein hinterschneidungsfreies Bauteil lässt sich im Umkehrschluss finden, indem diese Kegel für alle vorgegebenen Bauteilelemente (Fixsets) betrachtet werden. Dabei wird je eine Menge K^+ und K^- gebildet, die alle solche Kegel in positiver bzw. negativer Entformungsrichtung vereint. Die Schnittmengen dieser Kegel umfassen alle Elemente, die für ein hinterschneidungsfreies Bauteil zwangsweise im Bauteil erhalten bleiben müssen. Bild 1 veranschaulicht diesen Prozess: In a) ist ein Bauteil mit Hinterschneidungen (schwarz) innerhalb eines Designraums (grau) gezeigt. Die Entformungsrichtung sei senkrecht nach oben. In diesem Fall ergeben sich die Mengen K^+ bzw. K^- wie in b) bzw. c) gezeigt. Die in d) und e) verdeutlichte Schnittmenge dieser beiden Mengen zeigen, welche Bereiche noch zum Bauteil hinzugefügt werden müssen, sodass keine Hinterschneidungen mehr auftreten. In f) ist der Entformungsvorgang mit geteilter Form dargestellt. Dieses Minimalbauteil wird sukzessive erweitert, wobei der Bauteilrand optimal an das Optimierungsergebnis angeglichen wird. Dies geschieht unter der Bedingung, dass das Bauteil in jeder Iteration hinterschneidungsfrei bleibt.

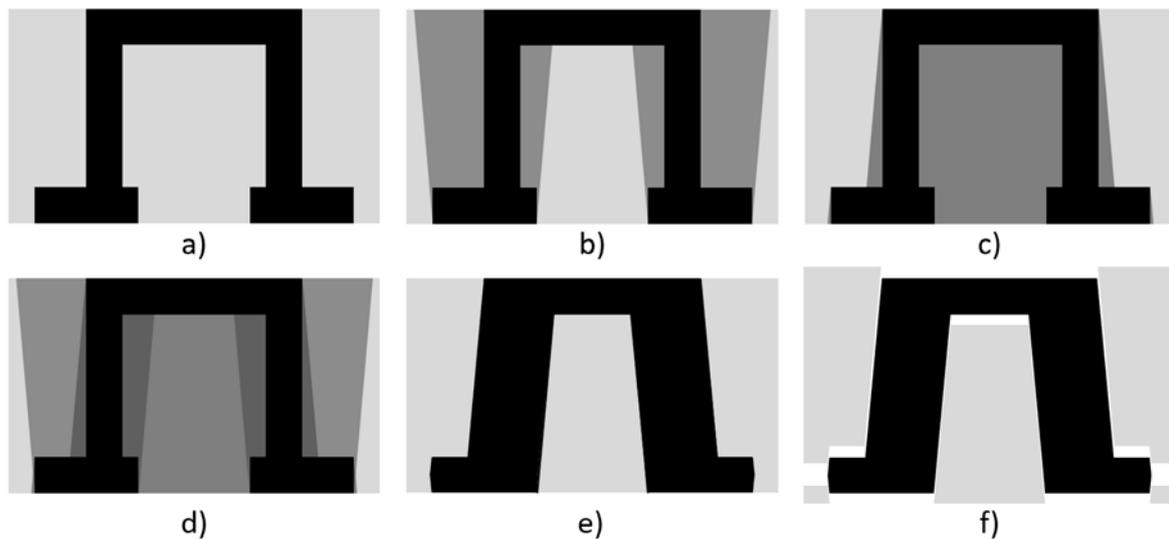


Bild 1: Erzeugung eines hinterschneidungsfreien Bauteils

Durch die unregelmäßige Form der Elemente bildet sich durch deren Entfernung bei der Optimierung eine zerklüftete Bauteiloberfläche. Daher lassen sich kleine Hinterschneidungen der Oberflächenelemente praktisch nicht verhindern. Diese wird jedoch in der Regel nach dem Optimierungsprozess geglättet. Deshalb spielen diese Oberflächenhinterschneidungen für die Entformbarkeit eines Bauteils keine Rolle. Aus diesem Grund genügt es, die Elemente für die Hinterschneidungsfreiheit vereinfacht als Kugeln zu betrachten. Dabei wird jedem Element gedanklich eine Kugel mit dem Volumen und dem Schwerpunkt des Elements zugewiesen. Erst durch diese finiten Kugeln lassen sich gegenseitige Überlappungen über einen Abgleich der Radien und Schwerpunktskoordinaten unter Berücksichtigung der Entformungsrichtung detektieren, wie in Bild 2 veranschaulicht. Zudem lässt sich über eine Verkleinerung der Radien ein Toleranzwinkel einstellen, unter dem eine Überlappung toleriert wird. Sei $\vec{v} \in \mathbb{R}^3 \setminus \{\vec{0}\}$ die Entformungsrichtung, $w \in [0^\circ, 90^\circ]$ der Entformungswinkel, r_i und r_j die Radien der finiten Kugeln der Elemente i und j und $S_{ij} := S_j - S_i$ der Vektor zwischen den Schwerpunkten S_i und S_j der beiden Elemente.

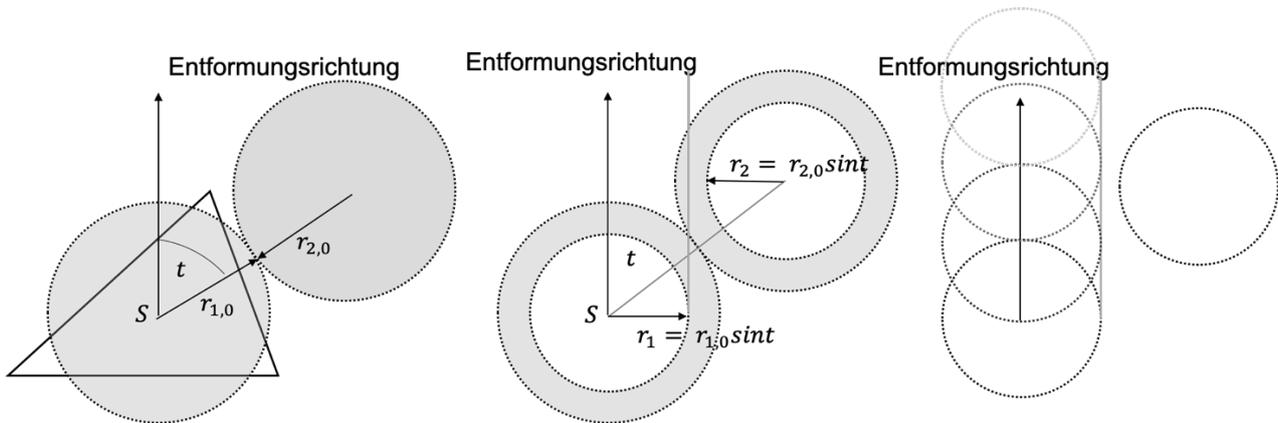


Bild 2: Konzept der finiten Kugeln

Dann sind die Mengen K_i^\pm der möglichen Konfliktelemente für das Element i beschrieben durch Gleichung (1).

$$K_i^\pm := \left\{ j : \pm v \cdot S_{ij} > 0 \wedge (1 - \sin^2 w) \left(\|v\|_2^2 \|S_{ij}\|_2^2 - (v \cdot S_{ij})^2 \right) < \left(\|v\|_2 (r_i + r_j) \pm v \cdot S_{ij} \sin w \right)^2 \right\} \quad (1)$$

Diese beiden Mengen stellen die zuvor beschriebenen Kegel in positiver bzw. negativer Entformungsrichtung dar. Eine absolute Enthinterschneidungsstriktheit ist dabei nicht in allen Fällen sinnvoll, da diese unter Umständen den Designvorschlag stark von der optimalen Lösung abwandelt. Im Falle des AM ist eine absolute Striktheit auch nicht notwendig, da mit Stützstrukturen gearbeitet werden kann. Daher wird die Enthinterschneidungsrate $g \in [0,1]$ definiert. Diese wird im Algorithmus auf die aktivierende Anpassung a^1 der durch die Topologieoptimierung festgelegten Designvariable x angewendet, wie in der Definition der Funktion (2) dargestellt.

$$a^1: [0,1] \rightarrow [0,1], x \mapsto x + \frac{1-x}{1 + \frac{4x(1-g)}{g^2}} \quad (2)$$

Für den Fall $g = 0$ soll überhaupt keine Enthinterschneidung stattfinden. Die Funktion steigt in g punktweise monoton an, weshalb g ein Maß für die Enthinterschneidungsstriktheit darstellt. Somit kann mithilfe der Enthinterschneidungsrate eine fast stufenlose Regelung der Enthinterschneidung erfolgen. Übertragen auf das AM bedeutet dies, dass anhand der Wahl von g allgemein zwischen restriktiveren ($g \approx 1$) und opportunistischeren ($g \approx 0$) Vorgehen variiert werden kann. Auf diese Weise kann erreicht werden, dass der optimierte Designvorschlag möglichst nah am mathematischen Optimum liegt und dennoch

überwiegend selbststützend ist. Die exemplarische Anwendung des Enthinterschneidungsalgorithmus auf einen additiv zu fertigenden Fahrwerksumlenker ist in Bild 3 gezeigt.

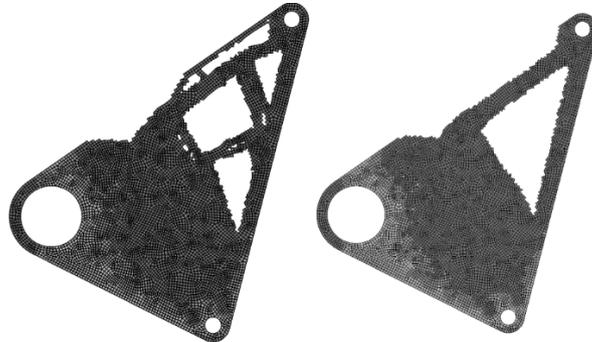


Bild 3: Anwendung des Enthinterschneidungsalgorithmus am Beispiel eines Fahrwerksumlenkers. Ohne Berücksichtigung der Enthinterschneidung (links); der DfAM-orientierte Designvorschlag (rechts).

4 Optimale Bauteilorientierung zur Minimierung von Stützstrukturen

Da die Bauteilorientierung und Berücksichtigung von Stützstrukturen zum einen zeitaufwändig ist und sich zum anderen sensibel auf den Prozess und die anschließende Nacharbeit auswirkt, trägt die automatisierte Bauteilorientierung und Generierung von Stützstrukturen wesentlich zur Effizienzsteigerung in der Produktentwicklung bei. Dazu wird ein Ansatz vorgestellt, um die zu stützenden Flächen einer Balkenstruktur, stellvertretend für allgemeine Geometrien, zu erkennen und ihre Orientierung im Raum zu optimieren, sodass der Materialeinsatz und die Druckzeit der Stützstrukturen minimiert werden können. Der vereinfachte Programmablaufplan der Software ist in Bild 4 skizziert.

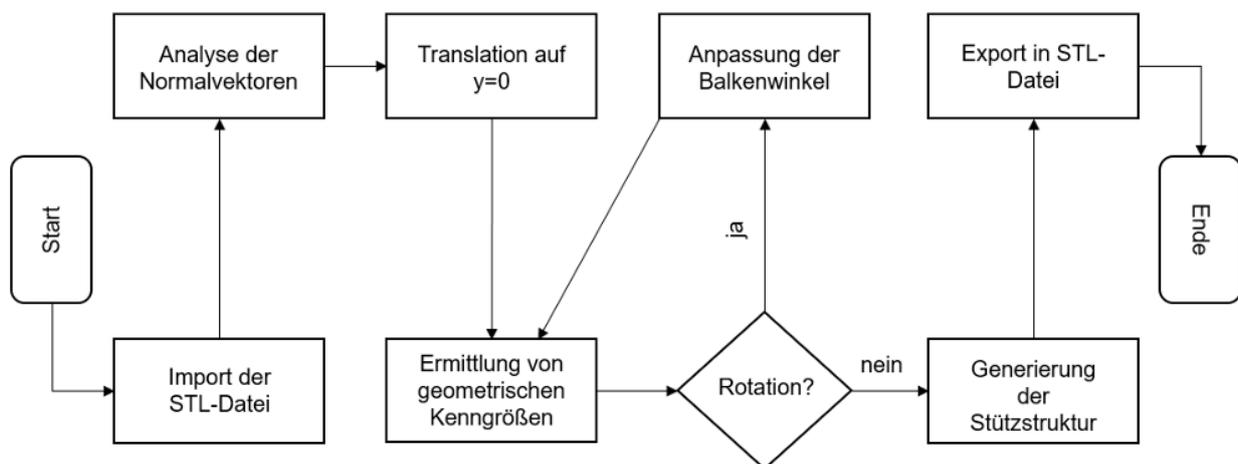


Bild 4: Schematische Darstellung des Programmablaufs

Nach dem Import der STL-Datei wird die Lage der Dreiecksfacetten des Bauteils analysiert. Dazu erfolgt die Berechnung der Winkel der Normalvektoren der Dreiecksfacetten zur horizontalen und vertikalen Achse [17] sowie die Überprüfung ihrer Richtung. Um die stützende Kante zu ermitteln, werden Dreiecksfacetten, welche entgegengesetzt der Aufbaurichtung, im Anwendungsbeispiel in negative y-Richtung, ausgerichtet sind und Überhänge, für einen flexiblen Grenzwinkel, im Anwendungsbeispiel von 45° , separat klassifiziert. Das Bauteil wird als Balken kategorisiert, wenn die Struktur 6 unterschiedliche Normalvektoren besitzt und für jeden Normalvektor mindestens ein Pendant in entgegengesetzte Richtung vorhanden ist. Die Häufigkeit der einzelnen Normalvektoren hat indes eine Aussagekraft über die Feinheit der Triangulation an der jeweiligen Fläche [18]. Im Anschluss wird eine Translation des Balkens auf die y-Achse durchgeführt, um das Volumen der Stützstruktur zu minimieren. Nachfolgend werden die Eckpunkte des Balkens und seine geometrischen Kenngrößen, Tiefe, Höhe und Gesamtbreite bestimmt. Die Berechnung der Kantenlängen gibt Aufschluss darüber, ob der Balken zur Generierung von Stützstrukturen an der kürzeren Kante gedreht werden muss. Die Rotation wird am tiefsten Punkt des Balkens, bei $y = 0$, durchgeführt und die neuen Eckpunkte und Normalvektoren berechnet. Im letzten Schritt wird an der kürzeren Kante des Bauteils eine Stützstruktur erstellt. Die Stützstruktur teilt sich in x sowie in z-Richtung in einzelne Stützbalken auf, wobei der rechteckige Querschnitt, die Anzahl und der Abstand zwischen den Stützbalken variabel sind. In Bild 5 wird die Generierung der Stützstruktur anhand eines Balkens veranschaulicht.

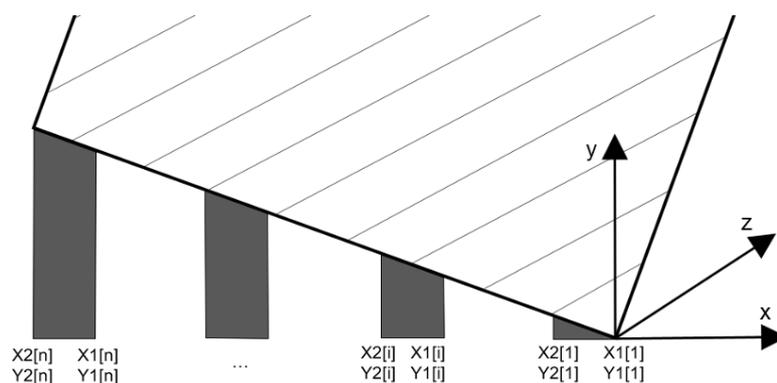


Bild 5: Generierung der Stützbalken

Mithilfe des in Bild 6 gezeigten Programmierbeispiels können durch die Aufstellung der Geradengleichung an der kürzeren Kante des Balkens die einzelnen Koordinaten der Stützbalken innerhalb eines Schleifen-Blocks berechnet werden. Da die Koordinaten des ersten Stützbalkens durch die Eckpunkte des Balkens vor der Schleife festgelegt werden,

beginnt der Schleifenzähler i bei 2. Analog zu der Iteration in x -Richtung werden die Stützbalken in z -Richtung hinzugefügt. Ein einzelner Stützbalken besteht aus einem Quader (12 Dreiecksfacetten) und einem rechtwinkligen Prisma (8 Dreiecksfacetten). Sowohl der Querschnitt als auch die Abstände zwischen den einzelnen Stützbalken werden in Abhängigkeit von der Geometrie des Balkens angepasst.

Algorithmus 1: Generierung der Stützstruktur

Require: n ▸ Anzahl der Stützbalken
Require: $Breite_SB, Abstand_SB$ ▸ Breite und Abstand zwischen den Stützbalken
Require: $Steigung, t$ ▸ Steigung und y -Achsenabschnitt der Kantengeraden
Require: $X1, X2, Y1, Y2$ ▸ Vektoren zur Speicherung der Koordinaten

```

1: for (int i = 2; i < n + 1; i++) ▸ Schleife zur iterativen Berechnung der Koordinaten der Stützbalken
2: {
3:   X1[i] = X2[i-1] - Abstand_SB;
4:   X2[i] = X1[i] - Breite_SB;
5:   Y1[i] = Steigung * X1[i] + t;
6:   Y2[i] = Steigung * X2[i] + t;
7: }
```

Bild 6: Pseudo-Code Beispiel zur Generierung der Stützstrukturen

Um beliebig komplexe Strukturen optimal zu orientieren und abzustützen, kann die Krümmung des Bauteils in allen Bereichen durch quadratische Polynome angenähert werden [19]. Dadurch lassen sich Dreiecksfacetten in der gleichen Region markieren und somit beispielsweise einzelne zylindrische Oberflächen identifizieren [17]. Als Stützstrukturen können in diesem Zusammenhang Prismen mit Rundungen, orientiert an der Krümmung des zu stützenden Bereichs, eingesetzt werden.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Durch die vorgestellte Methode zur Berücksichtigung von Fertigungsrestriktionen ist ein Werkzeug entstanden, um effizient und automatisch Fertigungsrestriktionen in der Topologieoptimierung zu berücksichtigen und somit möglichst selbsttragende Strukturen zu generieren. Dabei werden zunächst finite Kugeln definiert, mit deren Hilfe sich Entformungs- bzw. Stützkonflikte beschreiben lassen. Dieses Verfahren ist in der kommenden Version der Topologieoptimierungs-Freeware Z88Arion integriert. Dabei ist das Verfahren sehr allgemein gehalten und kann auf verschiedene Fertigungsverfahren angewandt werden. Im Kontext des AM wird es verwendet, um möglichst selbststützende Strukturen zu erzeugen.

Effizienz und Produktivität des AM sind zudem maßgeblich abhängig von der Fertigungszeit sowie der benötigten Nacharbeit. Beide Faktoren sind stark abhängig von der benötigten Stützstruktur.

Anhand des gezeigten Ansatzes kann die optimale Bauteilorientierung zur Minimierung der Stützstruktur gefunden werden. Dies stellt kein vollständiges Slicing im Sinne der Druckvorbereitung dar und ist auch nicht als solches zu verstehen. Viele Hersteller von AM-Anlagen verwenden spezifische Software zur Druckvorbereitung, weshalb der Weg über das Bereitstellen der Daten im STL-Format aktuell der allgemeingültigste ist. Die Stützstrukturen sind zum aktuellen Entwicklungsstand einfache Säulen und nicht mit den Methoden kommerzieller Software vergleichbar. Nichtsdestotrotz gibt die Menge der benötigten Stützstruktur Auskunft über eine geeignete Orientierung und kann daher zur Prozessplanung herangezogen werden. Die automatisierte Bauteilorientierung im Anschluss an Topologieoptimierung und Glättung ermöglicht eine ideale Ausgangssituation für die anschließende Additive Fertigung, die Übernahme der erzeugten Stützstruktur ist dabei optional. Entsprechend tragen die vorgestellten Methoden zu einem effizienten Digitalen Produktentwicklungsprozess additiv gefertigter Bauteile bei und bilden eine Ausgangsbasis für weitere wissenschaftliche Forschung und Optimierung der nachhaltigen Produktentwicklung.

6 Danksagung

Dieser Beitrag entstand im Kontext des Forschungsprojekts „OptiOnEn: Optimale One Click Entwicklung – Einsatz von bionischen Optimierungsprogrammen für nachhaltiges Wachstum von KMU“ gefördert durch den Europäischen Sozialfonds (EFRE) und die Oberfrankenstiftung.

Literatur

- [1] Deese, K.; Geilen, M.; and Rieg, F. “A Two-Step Smoothing Algorithm for an Automated Product Development Process,” In: International Journal of Simulation Modelling. 2018, Bd. 17, 2, pp. 308–317.
- [2] Frisch, M.; Dörnhöfer, A.; Neidnicht, M.; Rieg, F.: *Fertigungsrestriktionen in der Topologieoptimierung*. In: Brökel, K.; Feldhusen, J.; Grote, K.H.; Rieg, F.; Stelzer, R. (Hrsg.): Integrierte Produktentwicklung für einen globalen Markt. Aachen: Shaker, 2011. S.42-49. (Konstruktionstechnik) ISBN 978-3-8440-0381-9

- [3] Kumke, M. *Methodisches Konstruieren von additiv gefertigten Bauteilen*. Wiesbaden : Springer Fachmedien Wiesbaden, 2018. S. 263. 978-3-658-22208-6.
- [4] Thompson, M.K.; Moroni, G.; Vaneker, T.; Fadel, G.; Campbell, R.; Gibson, I.; Bernard, A.; Schulz, J.; Graf, P.; Ahuja, B.; Martina, F.: *Design for Additive Manufacturing: Trends, opportunities, considerations, and constraints*. In: CIRP Annals. 2016, Bd. 65, 2, S. 737–760.
- [5] Das, P.; Chandran, R.; Samant, R.; Anand, S.: *Optimum Part Build Orientation in Additive Manufacturing for Minimizing Part Errors and Support Structures*. In: Procedia Manufacturing. 2015, Bd. 1, S. 343–354.
- [6] Berrocal, L.; Fernández, R.; Gonzáles, S.; Perinan, A; Tudela, S.; Vilanova, J.; Rubio, L.; Márquez, J.; Guerrero, J.; Lasagni, F.: *Topology optimization and additive manufacturing for aerospace components*. In: Progress in Additive Manufacturing. 2019, Bd. 4, 2, S. 83–95.
- [7] Liu, S.; Li, Q.; Liu, J.; Cheng, W.; Zhang, Y.: *A Realization Method for Transforming a Topology Optimization Design into Additive Manufacturing Structures*. In: Engineering. 2018, Bd. 4, 2, S. 277–285.
- [8] Harzheim, L.; Graf, G.: *A review of optimization of cast parts using topology optimization*. In: Structural and Multidisciplinary Optimization. 2005, Bd. 30, 6, S. 491–497.
- [9] Harzheim, L.; Graf, G.: *A review of optimization of cast parts using topology optimization*. In: Structural and Multidisciplinary Optimization. 2006, Bd. 31, 5, S. 388–399.
- [10] Hussein, A.; Hao, L.; Yan, C.; Young, P.: *Advanced lattice support structures for metal additive manufacturing*. In: Journal of Materials Processing Technology. 2013, Bd. 213, 7, S. 1019–1026.
- [11] Jiang, J.; Stringer, J.: *Support Structures for Additive Manufacturing: A Review*. In: Journal of Manufacturing and Materials Processing. 2018, Bd. 2, 4, S. 64.
- [12] Strano, G.; Hao, L.; Everson, R.; Evans, K.: *A new approach to the design and optimisation of support structures in additive manufacturing*. In: The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2013, Bd. 66, 9-12, S. 1247–1254.
- [13] Gaynor, A.; Guest, J.: *Topology optimization considering overhang constraints: Eliminating sacrificial support material in additive manufacturing through design*. In: Structural and Multidisciplinary Optimization. 2016, Bd. 54, 5, S. 1157–1172.
- [14] Kranz, J.; Emmelmann, C.; Herzog, D.: *Design guidelines for laser additive manufacturing of lightweight structures in TiAl6V4*. In: Journal of Laser Applications, Bd. 27, Nr. S1, S. S14001, Feb. 2015.
- [15] Fernandez-Vicente, M.; Canyada, M; Conejero, A.: *Identifying limitations for design for manufacturing with desktop FFF 3D printers*. In: Int. J. Rapid Manufacturing. 2015, Bd. 5, 1, S. 116–128.
- [16] Leary, M.; Merli, L.; Torti, F; Mazur, M.; Brandt, M.: *Optimal topology for additive manufacture: A method for enabling additive manufacture of support-free optimal structures*. In: Materials & Design. 2014, Bd. 63, S. 678–690.
- [17] Moroni, G.; Syam, W.; Petrò, S.: *Functionality-based part orientation for additive manufacturing*. CIRP 25th Design Conference. In: Innovative Product Creation, 2015, 36, 217–222.
- [18] Gebhardt, Andreas.: *Additive Fertigungsverfahren: Additive Manufacturing und 3D-Drucken für Prototyping – Tooling – Produktion*. 5. Aufl. München: Hanser, 2016. – ISBN 978-3-446-44401-0

-
- [19] Hamann, B.: *Curvature Approximation for Triangulated Surfaces*. In: Computing Suppl. 1993, 8, S. 139–154.

Anwendung des Eliminationsverfahrens zur automatisierten Auslegung von Presspassungen mittels der Finite-Elemente-Analyse

Christopher Lange, Aljoscha Zahn, Tobias Rosnitschek, Frank Rieg

Lehrstuhl für Konstruktionslehre und CAD, Universität Bayreuth

Universitätsstraße 30, 95447 Bayreuth

Email: christopher.lange@uni-bayreuth.de; Internet: www.lscad.de

Inhalt: Die Auslegung von Presspassungen ist aufgrund ihrer standardisierten Vorgehensweise für eine Automatisierung gut geeignet. Analytische Ansätze wie die Auslegung nach DIN 7190 unterliegen meist Einschränkungen, weshalb große Sicherheiten in Kauf genommen werden. Sollen Kostensenkungspotentiale realisiert werden, kann die Finite-Elemente-Analyse (FEA) verwendet werden. Zum Einbau der Kontaktbedingung in der Fuge wird dabei häufig die Methode der Lagrange-Multiplikatoren oder die Penalty-Methode eingesetzt. Das bisher wenig verwendete Eliminationsverfahren kann die Vorteile der beiden Verfahren kombinieren, da es einerseits exakte Ergebnisse liefert und gleichzeitig das zu lösende Gleichungssystem reduziert, was sich positiv auf die Berechnungszeiten auswirken kann. Insbesondere für wiederholende Problemstellungen - wie das Prüfen geeigneter Passungen - können Skalierungseffekte erzielt werden. Dieser Beitrag stellt das Eliminationsverfahren vor und validiert seine Ergebnisgüte. Anschließend wird ein Ansatz zur automatisierten Auslegung von Presspassungen vorgestellt und die Effektivität an einem Praxisbeispiel aus dem Leichtbau demonstriert.

Stichwörter: Presspassung, Finite-Elemente-Analyse, Eliminationsverfahren, Multi-Point-Constraints

Using the elimination method for automated dimensioning of interference fits by means of finite element analysis

Abstract: The design of interference fits is well suited for automation due to its standardized approach. Analytical approaches such as the dimensioning according to DIN 7190 are usually limited, which is why high safety margins are accepted. If cost savings should be realized, finite element analysis (FEA) may be used. The Lagrange multiplier method or the penalty method are frequently used for the modelling. The elimination method, can combine the advantages of both methods, as it provides exact results and reduces the system of equations on the other hand. This can have a positive effect on computation times. Especially for repetitive problems - such as dimensioning fits - additional scaling effects can be realized. This contribution introduces and validates the elimination method. An approach for the automated design of interference fits is presented and its effectiveness is demonstrated using a practical example from the field of lightweight construction.

Keywords: interference fits, finite element analysis, elimination method, multi-point-constraints.

1 Einleitung

Zur Übertragung von Drehmomenten zwischen drehbar gelagerten Bauteilen werden sogenannte Welle-Nabe-Verbindungen genutzt. Je nach Art der Kraftübertragung wird zwischen formschlüssigen, vorgespannt formschlüssigen, reib- bzw. kraftschlüssigen Verbindungen unterschieden [1]. Pressverbände sind den reibschlüssigen Verbindungen zuzuordnen, da sie äußere Kräfte durch Reibung aufgrund geometrischer Übermaße übertragen. Die Auslegung von Pressverbänden kann analytisch mit DIN 7190-1 [2] oder simulationsgestützt, beispielsweise mit der Finite-Elemente-Analyse (FEA) erfolgen. Ein Ziel bei der Auslegung von Pressverbänden ist die Gewährleistung einer sicheren Drehmomentübertragung. Diese hängt, neben Material- und Reibungseigenschaften der Komponenten, maßgeblich von dem vorhandenen Übermaß ab. Im Zuge der sicheren Drehmomentübertragung wäre aufgrund der größeren Fugendrucke ein großes Übermaß vorzuziehen. Dabei wird in der Regel eine rein elastische Beanspruchung des Außenteils angestrebt [3]. Für die analytische Auslegung liegen standardisierte Berechnungsvorschriften vor. Diese treffen jedoch einige Einschränkungen: So geht die DIN 7190-1 beispielsweise von zylindrischen Pressverbänden mit konstanten Querschnitt und konstanten Fugendrucken aus [2]. Dies stellt die Realität jedoch unzureichend dar, da beispielsweise Spannungserhöhungen im Randbereich der Nabe nicht berücksichtigt werden. Dieser Umstand führt daher zu eher konservativen Dimensionierungen mit größeren Sicherheiten, was dem Bestreben von Kostensenkungen oder Leichtbau häufig entgegensteht. Die Auslegung mittels FEA hat den Vorteil, dass die der DIN 7190-1 zu Grunde gelegten Einschränkungen nicht gelten. Es könnten also auch nicht-rotationssymmetrische Geometrien (z.B. Leichtbauradkörper) gerechnet werden. Nachteilig ist jedoch, dass die Auslegung mit FEA zeitintensiver ist. Da der FEA-basierte Auslegungsprozess stark von repetitiven Aufgaben (Geometrieerstellung, Modellaufbereitung, Berechnung, Auswertung, Variation der Eingangsparameter) geprägt ist, gilt eine Automatisierung in Form einer Optimierung als allgemein hin sinnvoll. In diesem Beitrag soll ein neuer Ansatz zur automatisierten Auslegung von Pressverbänden mittels Finite-Elemente-Analyse und des Eliminationsverfahrens aufgezeigt werden. Übergeordnetes Ziel ist es, den Auslegungsprozess zu beschleunigen und weitere Effizienzsteigerungen in der virtuellen Produktentwicklung zu realisieren.

2 Stand der Technik

Die Grundidee der FEA besteht darin, komplexe Geometrien in viele finite Elemente zu zerlegen. Für jedes finite Element wird eine partielle Differentialgleichung formuliert, die auf der Analyseart zugrundeliegenden Materialgesetzen basiert. Im einfachsten Fall der linearstatischen Analyse werden eine Steifigkeitsmatrix \mathbf{K} , ein Verschiebungsvektor \mathbf{u} und ein Kraftvektor \mathbf{f} aus dem Hookeschen Gesetz abgeleitet und in das charakteristische lineare Gleichungssystem

$$\mathbf{K} \cdot \mathbf{u} = \mathbf{f} \quad (1)$$

überführt [3]. Bei der Auslegung von Pressverbänden mittels FEA kann die Modellierung des Übermaßes, gegebenenfalls unter Berücksichtigung eines Übermaßverlustes durch Glättung, geometrisch oder mathematisch erfolgen. Bei der geometrischen Modellierung ist das Übermaß U explizit in der Geometrie berücksichtigt. Das heißt, es liegt eine Geometrieüberschneidung g vor. Hierbei ist nach [4] eine radiale Durchdringung von $g = \frac{U}{2}$ zu modellieren, wie in Bild 1 schematisch dargestellt ist.

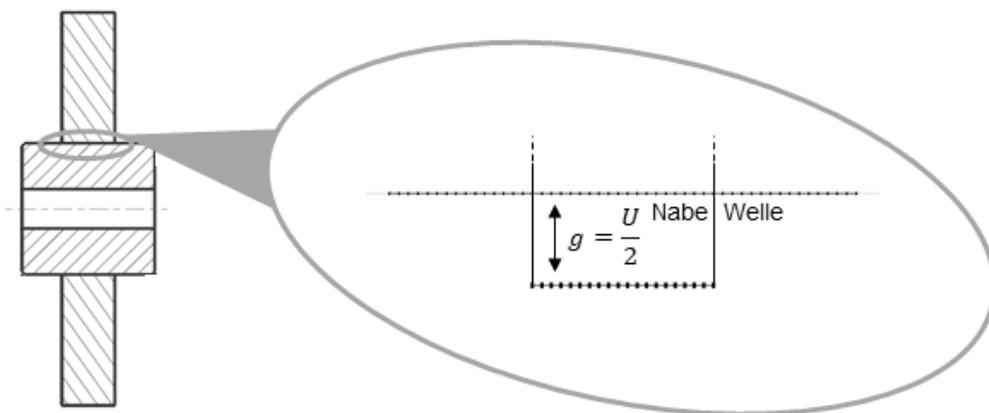


Bild 1: Prinzip der geometrischen Modellierungsmethode. Dargestellt ist ein Pressverband (links) und eine Detailsicht der oberen Fugenkante (rechts). Bei der geometrischen Modellierung durchdringen sich Welle und Nabe um $g = 0,5 \cdot U$, die auch nach der Diskretisierung erhalten bleibt.

Die im FE-Modell vorliegende Durchdringung wird anschließend inkrementell aufgelöst, bis die Bedingung

$$g(t) - m(t) \leq 0 \quad (2)$$

mit

$$g(t) = g_{max} \cdot \frac{T - t}{T} \quad (3)$$

und dem Lastinkrement $t \in [0, T]$ als erfüllt gilt [5]. Die Durchdringung ist somit zu Beginn maximal $g(t = 0) = g_{max}$ und wird inkrementell reduziert. In den meisten Anwendungsfällen gilt für die Grenzdurchdringung $m(t)$:

$$m(t) = const = 0 \quad (4)$$

Eine ähnliche Vorgehensweise ist aus der Korrektur von Netzüberschneidungen bekannt. Im Unterschied hierzu ist die Überschneidung bei der geometrischen Modellierung jedoch gewollt und die Korrektur der Knotenpositionen erfolgt spannungsbehaftet. Für eine automatisierte Auslegung erfordert sie jedoch eine parametrisierte Geometriebeschreibung. Außerdem erfordert jede Variation des Übermaß- bzw. Durchdringungsparameters eine Neuvernetzung des FEA-Modells, was insbesondere bei fein-vernetzten Bauteilen die Dauer des Gesamtprozesses signifikant verlängern kann.

Bei der mathematischen Modellierung wird das Übermaß implizit, in Form von Zwangsbedingungen, im Gleichungssystem des FEA-Modells berücksichtigt. Diese können sich auf einen oder mehrere Freiheitsgrade der Systemmatrizen beziehen. Im zweiten Falle werden diese als Multi-Freedom-Constraints (MFC) oder Multi-Point-Constraints (MPC) bezeichnet [6,7]:

$$a_1 \cdot u_1 + a_2 \cdot u_2 + \dots + a_n \cdot u_n = g \quad (5)$$

Im Rahmen einer FEA kann g dabei als Abstand zwischen den beteiligten Freiheitsgraden interpretiert werden. Ein Kontakt gilt somit als geschlossen bei $g = 0$ und offen bei $g > 0$. Das Einbringen von MPCs in die Gleichungssysteme, kann grundsätzlich mit einer Vielzahl von numerischen Methoden erfolgen, u.a. über Lagrange-Multiplikatoren, nach Penalty oder Nitsche, sowie nach der gestörten bzw. erweiterten Lagrange-Methode. Eine umfangreiche Darstellung und Erläuterung der Lösungsverfahren für Kontaktprobleme, mit den jeweiligen Vor- und Nachteilen, gibt [8] und soll nicht Gegenstand dieses Beitrags sein. Häufig eingesetzte Methoden sind die der (gestörten) Lagrange-Multiplikatoren oder Penalty [9]. Ersteres erfüllt bei einer Anwendung ohne Strafparameter Zwangsbedingungen exakt, führt jedoch zu einer Vergrößerung des Gleichungssystems, was wiederum zu einem höheren Berechnungsaufwand führt. Der Vorteil der Penalty-Methode liegt in der gleichbleibenden Größe des Gleichungssystems. Allerdings kann damit nur eine Näherungslösung erzielt werden [6,8,9]. Das bisher wenig eingesetzte Eliminationsverfahren verknüpft die Vorteile beider Methoden: Es erfüllt die

Zwangsbedingungen direkt, liefert daher exakte Ergebnisse und die Anzahl an Gleichungen im System wird reduziert, was sich positiv auf die Berechnungszeiten auswirken kann. Nachteilig ist die Rücktransformation auf das initiale Gleichungssystem, sofern die reduzierten Freiheitsgrade für die anschließende Auswertung notwendig sind.

3 Eliminationsverfahren

Das Eliminationsverfahren ist eine direkte Methode zum Erfüllen von MPCs. Es wird auch als direkte Einführung von Nebenbedingungen bzw. in abgewandelter Form als Transformationsverfahren bezeichnet [9, 10]. Kernaspekt des Eliminationsverfahrens ist die Klassifizierung von Freiheitsgraden, mit dem das Gleichungssystem reduziert wird. Für jede MPC wird ein Master-Freiheitsgrad (Index: m) gewählt, die übrigen werden als Slave-Freiheitsgrade (Index: s) bezeichnet. Freiheitsgrade die von keiner MPC betroffen sind, werden als unabhängige Freiheitsgrade (Index: u) bezeichnet [7]. Dadurch ergeben sich drei Sets von Freiheitsgraden: \mathbf{u}_m , \mathbf{u}_s und \mathbf{u}_u . Ist ein Freiheitsgrad Bestandteil mehrerer MPCs, so ist die mehrfache Bestimmung als Slave-Freiheitsgrad unzulässig, da dies bei unabhängigen Zwangsbedingungen zu numerischen Problemen führen kann. Die übrigen Freiheitsgrade, die kein Bestandteil einer MPC sind, werden \mathbf{u}_u zugeordnet. Unter Ausnutzung der Symmetrie der Steifigkeitsmatrix, ist zunächst das Gleichungssystem der FEA entsprechend der zuvor durchgeführten Klassifizierung zu sortieren:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{K}_{uu} & \mathbf{K}_{um} & \mathbf{K}_{us} \\ \mathbf{K}_{um}^T & \mathbf{K}_{mm} & \mathbf{K}_{ms} \\ \mathbf{K}_{us}^T & \mathbf{K}_{ms}^T & \mathbf{K}_{ss} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{u}_u \\ \mathbf{u}_m \\ \mathbf{u}_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{f}_u \\ \mathbf{f}_m \\ \mathbf{f}_s \end{bmatrix} \quad (6)$$

Die vorliegenden MPCs können ebenfalls in Matrixschreibweise beschrieben werden

$$\mathbf{A}_m \mathbf{u}_m + \mathbf{A}_s \mathbf{u}_s = \mathbf{g} \quad (7)$$

Unter der Voraussetzung das \mathbf{A}_s nicht singulär ist, kann nach \mathbf{u}_s aufgelöst werden

$$\mathbf{u}_s = -\mathbf{A}_s^{-1} \mathbf{A}_m \mathbf{u}_m + \mathbf{A}_s^{-1} \mathbf{g} \quad (8)$$

Mit den Transformationen

$$\mathbf{g}_A := \mathbf{A}_s^{-1} \mathbf{g} \quad (9)$$

und

$$\mathbf{T} := -\mathbf{A}_s^{-1} \mathbf{A}_m \quad (10)$$

lassen sich die Slave-Freiheitsgrade durch Substitution eliminieren und das reduzierte Gleichungssystem

$$\begin{bmatrix} K_{uu} & K_{um} + K_{us}T \\ (\text{symm.}) & K_{mm} + T^T K_{ms}^T + K_{ms}T + T^T K_{ss}T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{u}_u \\ \mathbf{u}_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{f}_u - K_{us} \mathbf{g}_A \\ \mathbf{f}_m - K_{ms} \mathbf{g}_A \end{bmatrix} \quad (11)$$

nach $\hat{\mathbf{u}}$ auflösen [7]. Für die Rücktransformation in das initiale Gleichungssystem ergibt sich nach [12]:

$$\mathbf{u} = \mathbf{Y}^{-1} \cdot (\mathbf{Z}^T \cdot \hat{\mathbf{u}} + \mathbf{g}_e) \quad (12)$$

mit

$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} \mathbf{y}_u \\ \mathbf{y}_m \\ \mathbf{y}_s \end{bmatrix} \quad (13)$$

die als Permutationsmatrizen von den initialen Freiheitsgraden \mathbf{u} auf die umsortierten Freiheitsgrade \mathbf{u}^* bzw. auf die umsortierten und reduzierten Freiheitsgrade $\hat{\mathbf{u}}$ abbildet:

$$\mathbf{u}^* = \mathbf{Y} \cdot \mathbf{u} \quad (14)$$

$$\hat{\mathbf{u}} = \mathbf{Z} \cdot \mathbf{u}^* + \mathbf{g}_e = \begin{bmatrix} I_u & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & I_m & T \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{u}_u \\ \mathbf{u}_m \\ \mathbf{u}_s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{g} \end{bmatrix} \quad (15)$$

Die Autoren dieses Beitrags haben das Eliminationsverfahren in Matlab implementiert, welche als Grundlage für den im folgenden Kapitel vorgestellten Ansatz dient. In Bild 2 ist ein Ausschnitt der Knotenverschiebungen an einem repräsentativen Pressverband wie in Bild 1 dargestellt, mit einem eingebrachten Übermaß von $U = 50 \mu m = 2 \cdot g$ zu sehen (Fugendurchmesser $25 mm$). Wie zu erkennen ist, führt die Modellierung mit dem Eliminationsverfahren zu einer Aufweitung der Nabe und einer Stauchung der Welle im Kontaktbereich. Im Gegensatz zu einer geometrischen Modellierung (Kontaktabstand in der Fuge am Ende der Berechnung $g = 0$), liegt am Ende der mathematischen Modellierung ein Kontaktabstand $g \neq 0$ vor. Da das Übermaß relativ zu den Bauteilabmessungen sehr klein ist, kann die dabei entstehende Abweichung in den Ergebnissen bzw. der Modellsteifigkeit vernachlässigt werden. Das Eliminationsverfahren führt - trotz des augenscheinlichen „Spiels“ - zu mathematisch exakten Ergebnissen und die aus den Knotenverschiebungen abgeleiteten Spannungen entsprechen daher denen der geometrischen Modellierung (vgl. Kapitel 2). Eine Gegenüberstellung mit den Lagrange-Multiplikatoren ergab eine Abweichung im Mittel von $3,24 \cdot 10^{-4} mm$ bzw. $1,36 \cdot 10^{-4} mm$ in den Median. Diese Abweichungen sind im Rahmen der numerischen Genauigkeit vernachlässigbar und die Implementierung sei somit validiert.

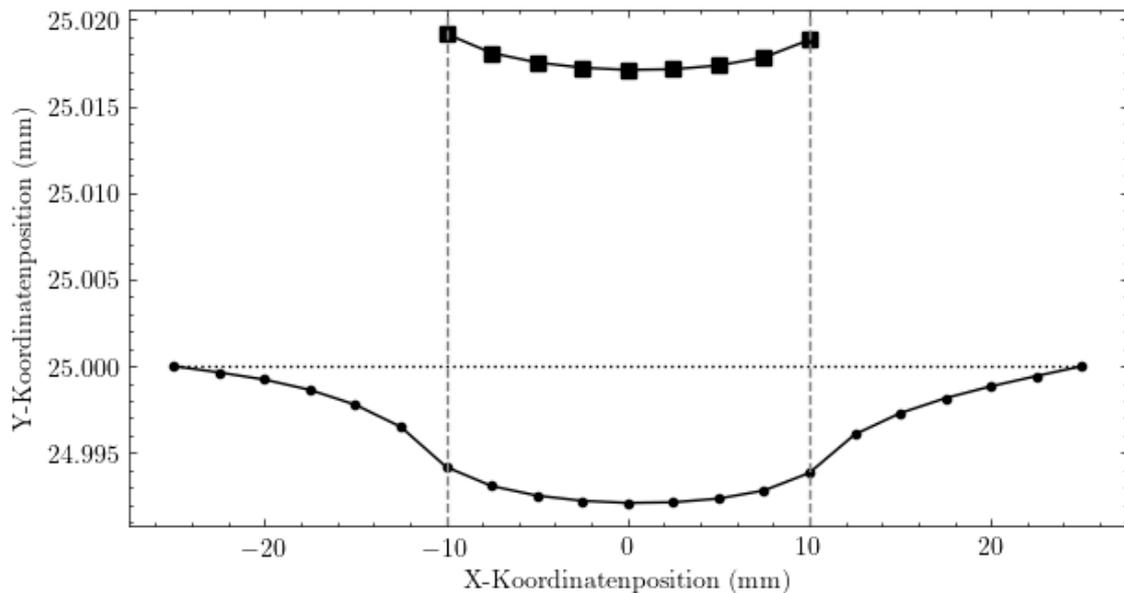


Bild 2: Dargestellt sind die Y-Knotenpositionen von Welle (Punkte), Nabe (Quadrate) und das Nennmaß (horizontal gepunktete Linie) mit $g = 0,025$ im Bereich der oberen Fugenkante. Die zwei vertikalen Linien begrenzen den Kontaktbereich der Fuge.

4 Optimierungs- und Auslegungsprozess

Auf Basis des vorgestellten Eliminationsverfahrens lässt sich ein automatisierter Auslegungsprozess von Presspassungen realisieren. In seinen Grundzügen handelt es sich hierbei um eine Problemstellung der Optimierung, im Speziellen um eine FEA-basierte Optimierung in der Auslegung von Maschinenelementen, wie sie beispielsweise in [13] in einer ähnlichen Weise für Pressverbände durchgeführt wurde. Die Neuheit des in Bild 3 vorgestellten Optimierungsprozesses besteht in der Kopplung mit dem Eliminationsverfahren und die Berücksichtigung mehrerer Passungsalternativen. Der Vorteil des Eliminationsverfahrens gegenüber den konventionellen Lagrange-Multiplikatoren oder Penalty-Verfahren besteht in der Kombination aus einerseits exakten Ergebnissen und andererseits verkürzten Rechenzeiten durch das reduzierte Gleichungssystem. Ähnlich wie bei den Lagrange-Multiplikatoren, lässt sich das Verfahren gut skalieren: Da eine Variation von g keinen erneuten Aufbau des Gleichungssystems bedarf, lassen sich bei großen Anzahl p an Passungsvarianten Effizienzvorteile durch Wiederverwendung der Blockmatrizen generieren. Auch können weitreichende Parallelisierungspotentiale bei ihrem erstmaligen Aufbau ausgenutzt werden: So lassen sich beispielsweise die einzelnen Matrix-Matrix bzw. Matrix-Vektor-Operationen sehr gut auf einer low-level-Ebene parallelisieren,

ebenso bietet die Eigenschaft als Blockmatrix ein inhärentes Parallelisierungspotential. Somit ist auch die schnelle Auslegung sehr großer Berechnungsmodelle möglich. Voraussetzung des Algorithmus ist die einmalige Definition aller in Frage kommenden Passungen $P = \{P_1, \dots, P_i\}$ mit $i = 1, \dots, p$. Diese Information dient als Grundlage für die weitere Berechnungsvorschrift. Für jedes P_i ist anschließend der Grundtoleranzgrad IT und die Grundtoleranz T , sowie die oberen Abmaße es, ES und unteren Abmaße ei, EI zu bestimmen. Aus diesen Informationen lässt sich für die jeweils gegebene Passung das kleinstmögliche auftretende Übermaß U_k und das größtmögliche Übermaß U_g ableiten. Diese beiden Übermaße gehen als Parameter $g = \frac{U}{2}$ in das Eliminationsverfahren ein. Handelt es sich hierbei um die erste Iterationsschleife werden die vier Blockmatrizen aus (12), sowie \mathbf{u}_u , \mathbf{u}_m , \mathbf{A}_s^{-1} , \mathbf{f}_u und \mathbf{f}_m im Hauptspeicher für die folgenden Iterationen gespeichert, welche dadurch von einem Geschwindigkeitsvorteil profitieren. Sofern die ermittelte Fugenpressung von Welle $p_{F,I}$ und Nabe $p_{F,A}$ größer als die zur Übertragung erforderliche Pressung p_{erf} ist und die zulässigen Werte $p_{I,zul}$ bzw. $p_{A,zul}$ nicht überschreiten, gilt das Übermaß als gültig. Eine gegebene Passung gilt jedoch erst als geeignet, wenn sowohl $g = \frac{U_k}{2}$, als auch $g = \frac{U_g}{2}$ ein gültiges Ergebnis liefern. Nicht geeignete Passungen werden verworfen. Wiederum gilt eine geeignete Passung dann als optimal, wenn eine vom Anwender vorgegebene Zielfunktion (z.B. fertigungstechnisch günstigste Toleranzfeldlage) den maximalen bzw. minimalen Wert erreicht. Ansonsten sei der Grundtoleranzgrad oder Toleranzfeldlage zu variieren.

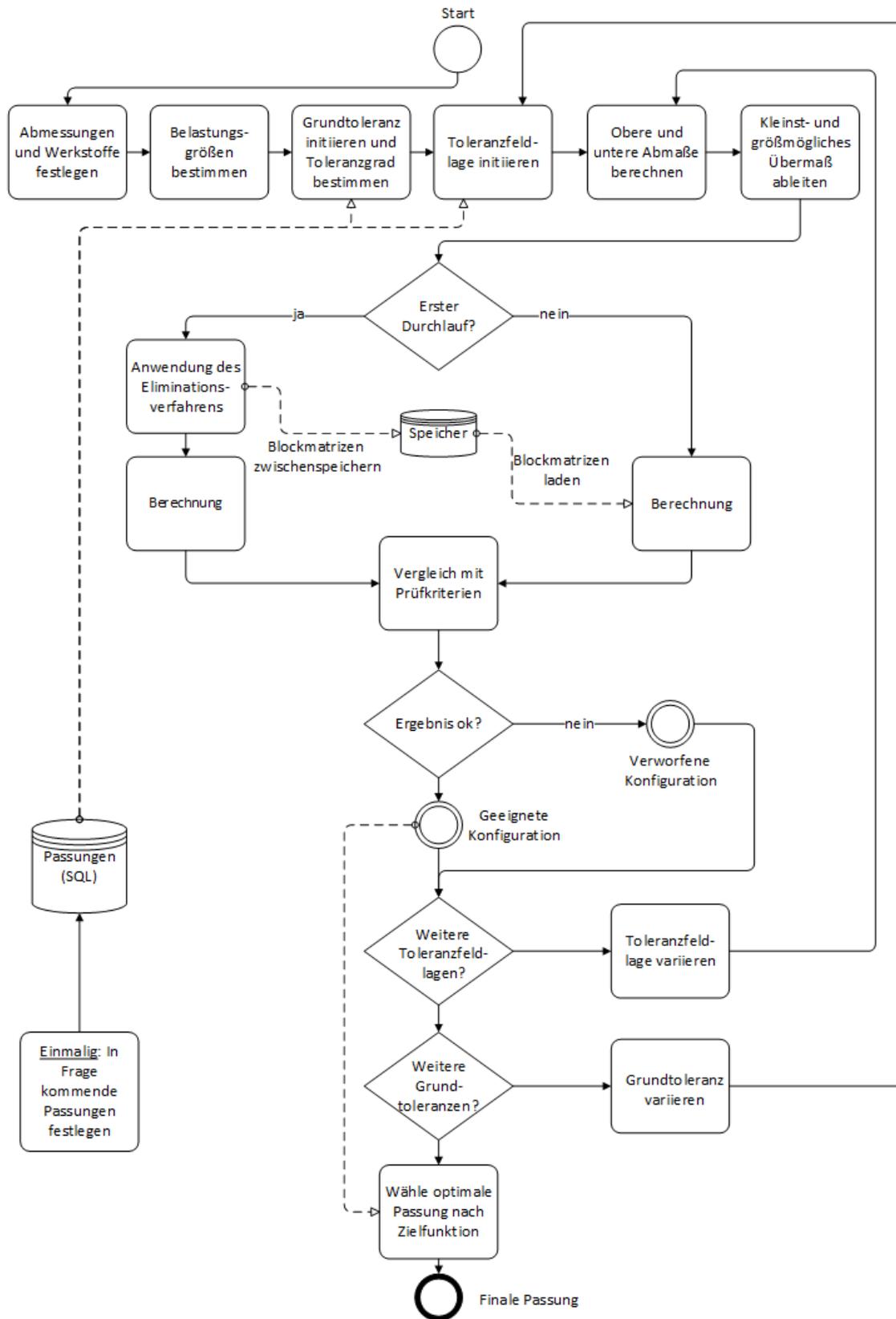


Bild 3: Algorithmus zur automatisierten Auslegung von Presspassungen mittels FEA.

Die Eignung des Algorithmus werde im folgendem durch die repräsentative Auslegung der in Bild 4 dargestellten Welle-Nabe-Verbindung demonstriert. Zu Demonstrationszwecken sind die geeigneten Grundtoleranzgrade auf die Klassen 7 bis 9 und die grundsätzlichen Toleranzfeldlagen auf t bis v begrenzt. Weiterhin sei in diesem Rahmen vom System der Einheitsbohrung auszugehen. Die Randbedingungen (Werkstoffkennwerte und geometrischen Maße) für das vorliegende Beispiel sind in Tabelle 1 gegeben. Für den Außendurchmesser D_{aA} wurde der Fußkreisdurchmesser verwendet.

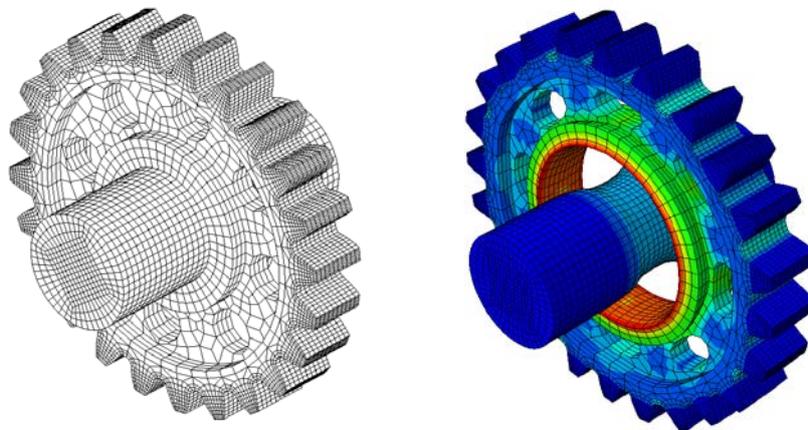


Bild 4: Demonstrationsmodell, bestehend aus einer Welle und einem gefügten Leichtbauzahnrad. Zu sehen ist links das Ausgangsmodell ($g = 0$) und rechts das aus Darstellungsgründen überskalierte Modell unter Belastung eines eingebrachten Übermaßes ($g \neq 0$). Modell wurde generiert mit [14].

Der Algorithmus hat folglich 9 Passungen (davon zwei Übergangspassungen) untersucht. In Summe ergab dies 18 Durchläufe. Als Prüfkriterium wurde für Welle und Zahnrad jeweils getrennt die maximale bzw. minimale Fugenpressung p_F ermittelt und nach [3] gegen folgende Kriterien geprüft:

$$\min(p_F) \geq p_{erf} = 44,9 \frac{N}{mm^2} \quad (16)$$

$$\max(p_F) < p_{A,zul} = 175 \frac{N}{mm^2} \quad (17)$$

$$\max(p_F) < p_{I,zul} = 384,9 \frac{N}{mm^2} \quad (17)$$

Die Ergebnisse sind in Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 1: Geometrie- und Werkstoffparameter für das vorliegende Demonstrationsbeispiel

Parameter	Wert	Einheit	Parameter	Wert	Einheit
$R_{e,A}$	400	N/mm^2	D_{dA}	66,4	mm
$R_{e,I}$	400	N/mm^2	D_F	20	mm
E	206000	N/mm^2	l_f	30	mm
ϑ	0,3		R_Z	10	μm
S_p	1,2		μ	0,17	
S_H	1,2		T	120	Nm

Tabelle 2: Resultate des Demonstrationsbeispiels. Fugenpressung in N/mm^2 , Übermaße in μm

Nr.	IT	Toleranzfeld	U	Welle		Nabe		Passung ist ...
				min (p_F)	max (p_F)	min (p_F)	max (p_F)	
1	9	H/u	-4	0,00	0,00	0,00	0,00	ungeeignet
2	9	H/u	48	149,71	238,86	159,47	222,60	
3	9	H/v	3	9,39	14,95	9,98	13,92	ungeeignet
4	9	H/v	55	171,45	273,64	182,60	255,03	
5	9	H/t	-11	0,00	0,00	0,00	0,00	ungeeignet
6	9	H/t	41	127,95	204,07	136,22	190,16	
7	8	H/u	15	46,90	74,72	49,91	69,61	geeignet
8	8	H/u	18	56,27	89,66	59,88	83,52	
9	8	H/v	22	68,76	109,57	73,17	102,08	ungeeignet
10	8	H/v	55	171,45	273,64	182,60	255,03	
11	8	H/t	8	25,03	39,86	26,62	37,13	ungeeignet
12	8	H/t	41	127,95	204,07	136,22	190,16	
13	7	H/u	27	84,35	134,44	89,77	125,26	ungeeignet
14	7	H/u	48	149,71	238,86	159,42	222,60	
15	7	H/v	34	106,16	169,26	113,01	157,72	ungeeignet
16	7	H/v	55	171,45	273,64	182,60	255,03	
17	7	H/t	20	62,51	99,62	66,52	92,80	ungeeignet
18	7	H/t	41	127,95	204,07	136,22	190,16	

5. Schlussfolgerungen und weiterer Ausblick

Gegenstand dieses Beitrags war die Vorstellung des Eliminationsverfahrens, sowie die Darstellung seiner theoretischen Potentiale und Anwendungsmöglichkeiten im Rahmen einer automatisierten und FEA-basierten Auslegung von Presspassungen. Wie gezeigt wurde, liefert das Eliminationsverfahren exakte Ergebnisse und es lässt sich für eine automatisierte Auslegung von Presspassungen einsetzen. Performance-Vorteile lassen sich insbesondere bei einer großen Anzahl an Recheniteration, wie hier unterschiedliche Passungen, realisieren. Leistungs- und Skalierungsgrenzen, sowie der Vergleich mit den

etablierten Verfahren zum Einbau von Zwangsbedingungen bleiben Gegenstand zukünftiger Forschung. Hierbei gilt es zu untersuchen, welche konkreten Zeitvorteile das Eliminationsverfahren in Abhängigkeit aller leistungsbeeinflussenden Faktoren bietet. So hat beispielsweise das Verhältnis der Anzahl der Freiheitsgrade in der Master/Slave-Klassifikation zueinander, die Größe des ursprünglichen Gleichungssystems oder die Anzahl an Recheniterationen einen entscheidenden Einfluss. Je nach Problemstellung könnte ist daher möglicherweise ein anderes Verfahren am geeignetsten sein. Wünschenswert wäre aus diesem Grund das Ableiten von Handlungsempfehlungen über den Einsatz der Verfahren in Abhängigkeit der vorliegenden Problemstellung bzw. Randbedingungen. Ferner wäre eine zusätzliche Beschleunigung durch eine Näherungslösung denkbar. So könnte beispielsweise die numerisch-aufwendig zu bestimmende Inverse der Slave-Klasse A_s^{-1} approximativ gelöst werden. Nichtsdestotrotz bietet das Eliminationsverfahren in seiner jetzigen Form einen interessanten Ansatz zur Berechnung wiederkehrender Problemstellungen im Rahmen der automatisierten Auslegung von Presspassungen. Der vorliegende Beitrag bildet somit eine Grundlage für die weitere wissenschaftliche Forschung und Optimierung des Produktentstehungsprozesses.

Literatur

- [1] Rieg, Frank; Steinhilper, Rolf: *Handbuch Konstruktion*. München: Hanser, 2012. - ISBN 978-3446452244
- [2] DIN 7190-1:2017-02. *Pressverbände - Teil 1: Berechnungsgrundlagen und Gestaltungsregeln für zylindrische Pressverbände*
- [3] Rieg, Frank; Engelken, Gerhard; Weidemann, Frank; Hackenschmidt, Reinhard; Alber-Laukant, Bettina: *Decker Maschinenelemente: Funktion, Gestaltung und Berechnung*. 20. Aufl. München: Carl Hanser Verlag, 2018. - ISBN 978-3446450295
- [4] Rieg, Frank; Hackenschmidt, Reinhard; Alber-Laukant, Bettina: *Finite Elemente Analyse für Ingenieure: Grundlagen und praktische Anwendungen mit Z88Aurora*. 6. Aufl. München: Carl Hanser Verlag, 2019. - ISBN 978-3446456396
- [5] Nasdala, Lutz: *FEM-Formelsammlung Statik und Dynamik*. 3. Aufl. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag | Springer Fachmedien, 2016. - ISBN 978-3-658-06629-1
- [6] Wriggers, Peter: *Nichtlineare Finite-Element-Methoden*. 1. Aufl. Berlin: Springer, 2008. - ISBN 978-3540677475
- [7] Kok, Schalk; Wilke, Daniel: *Understanding linear and non-linear multi-point constraints in finite element analysis*. In: 9th South African Conference on Computational and Applied Mechanics (SACAM 2014). Red hook, NY: S. 334-343
- [8] Wriggers, Peter: *Computational Contact Mechanics*. 2. Aufl. Berlin: Springer, 2006. - ISBN 978-3540326083
- [9] Bathe, Klaus-Jürgen: *Finite-Elemente-Methoden*. 2. Aufl. Berlin: Springer, 2002. - ISBN 978-3540668060
- [10] Billenstein, Daniel; Nützel, Florian; Glenk, Christian; Rieg, Frank: *Berechnungen in der Antriebstechnik: Reduktion elastischer Strukturen und Anwendung verschiedener Koppelbedingungen*. Bayreuth, 16.09.2016 (Bayreuther 3D-Konstrukteurerstag)
- [11] Rust, Wilhelm: *Nichtlineare Finite-Elemente-Berechnungen: Kontakt, Kinematik, Material*. 3. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2016. - ISBN 978-3-658-13377-1
- [12] Lange, Christopher: *Finite-Elemente-Kontaktanalyse: Implementierung und Bewertung des Master-Slave-Eliminationsverfahrens am Beispiel eines Pressverbands*. Universität Bayreuth: Masterarbeit, 2018.
- [13] Schwämmle, Tim: *Betriebsverhalten von konventionellen und fugendruckhomogenisierten Pressverbänden unter Biegelast*. Universität Stuttgart: Dissertation, 2010.
- [14] FVA-Forschungsvorhaben Nr. 484 IV „Realitätsnahe Berücksichtigung des elastischen Umfeldes auf den Zahneingriff mittels FEM“; Abschlussbericht; Heft 1196 Frankfurt 2015.

Nennspannungsermittlung für gerändelte Bauteile

Florian Mörz, Günter Schäfer

Institut für Maschinenwesen, Technische Universität Clausthal

Robert-Koch-Str. 32, 38678 Clausthal-Zellerfeld

E-Mail: info@imw.tu-clausthal.de; Internet: <https://www.imw.tu-clausthal.de/>

Inhalt: Für die Berechnung von Nennspannungen wird neben der Belastung, welche auf ein Bauteil wirkt im allgemeinen ein Querschnitt oder ein Widerstandsmoment benötigt. Für rotationssymmetrische, verzahnte Bauteile z.B. Zahnwellen wird dazu häufig ein imaginärer Durchmesser (Ersatzdurchmesser) gebildet, dessen Querschnittsfläche das gleiche Widerstandsmoment wie der verzahnte Querschnitt des Profils aufweist. Für gerändelte Bauteile, welche etwa in Rändelpressverbindungen eingesetzt werden können, existiert eine derartige Berechnungsmöglichkeit bisher nicht. Im folgenden Artikel wird ein Verfahren zur Bestimmung des Ersatzdurchmessers für gerändelte Bauteile vorgestellt.

Stichwörter: Welle-Nabe-Verbindung, Rändel, Rändelpressverbindung, Nennspannungsermittlung, Ersatzdurchmesser

Nominal stress determination for knurled components

Abstract: The requirements for the calculation of nominal stresses in components are the load and the cross section or a section modulus of the component. For rotationally symmetric, toothed parts e.g. spline shafts an imaginary diameter is calculated. The cross section of this diameter and the cross section of the toothed profile lead to the same section modulus. For knurled components (used e.g. in shaft-hub connections with a knurled contact area) there is currently no calculation method for the imaginary diameter existing. In the following article a method for the determination of the imaginary diameter for knurled parts is presented.

Keywords: shaft-hub-connection, knurling, interference fit with knurled shaft, nominal stresses, imaginary diameter

1 Einleitung

Aktuelle weltwirtschaftliche Tendenzen zur Elektrifizierung und Effizienzsteigerung von Maschinen und Anlagen machen auch vor dem Antriebsstrang als elementare Baugruppe nicht halt. Aufgrund dessen gewinnen technische Lösungen, die eine Steigerung der durchzuleitenden Lasten bei gleicher Baugröße ermöglichen, zunehmend an Bedeutung. Im Bereich der Welle-Nabe-Verbindungen stellen gerändelte Pressverbindungen eine Bauform mit enormem Potential zur Leistungssteigerung dar. In den Arbeiten von **Bader** [1], **Lätzer** [2] und **Mänz** [3], wurden unterschiedliche Arten von Rändelpressverbindungen (schneidend, formend, konisch) sowie Einflüsse unterschiedlicher geometrischer Größen wie Fase, Fügelänge oder Übermaß experimentell und numerisch untersucht, sowie bereits erste Auslegungskonzepte für die Berechnung derartiger Verbindungen vorgestellt. In einer aktuellen Arbeit von **Suchý** et al. werden auch Rändelpressverbindungen mit innen-gerändelter Nabe untersucht [4]. Ergänzend dazu wird im Rahmen eines aktuellen Forschungsvorhabens der Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V. FVA658 II, AiF-Nr. 20172 N/1 der Einfluss unterschiedlicher Fertigungsverfahren auf Pressverbindungen mit gerändelter Welle untersucht. Hierzu werden Untersuchungen zum Fügeverhalten und den statischen und dynamischen Torsionsübertragungseigenschaften unter repräsentativen geometrischen und werkstofflichen Kombinationen durchgeführt.

Für die Bestimmung von Nennspannungen in Bauteilen aufgrund angreifender Belastungen werden die entsprechenden Widerstandsmomente benötigt. Für einfache geometrische Querschnitte (z.B. Rechteck- oder Kreisquerschnitt) gibt es eine Reihe von Berechnungsformeln in den gängigen Maschinenbau Formelwerken. Sind die Bauteilquerschnitte komplexer werden häufig vereinfachte Ersatzquerschnitte verwendet, welche das gleiche Widerstandsmoment aufweisen, wie die komplexe Bauteilkontur. So wird für Zahnwellenprofile ein Ersatz-Kreisquerschnitt bestimmt, der das gleiche Widerstandsmoment aufweist wie das Zahnwellenprofil. Dieses Vorgehen soll auch für Rändelpressverbindungen angewendet werden.

Lätzer bestimmt in [2] den Ersatzdurchmesser von gerändelten Wellen mit Hilfe der DIN 5466-1 [5], in Anlehnung an die Geometrie von Zahnwellen nach DIN 5480 [6]. Diese Berechnungsmethode beinhaltet aber zahnwellenspezifische Faktoren wie den Modul m oder die Zahnfußausrundung ρ_{fP} (vgl. DIN 5480 [6]), siehe Abbildung 1. **Daryusi** analysiert

in [7] die in DIN 5466-1 [5] verwendete Methode zur Ersatzdurchmesserbestimmung und stellt alternative Berechnungsmöglichkeiten vor.

Im Folgenden wird ein Berechnungsansatz für die Bestimmung des Ersatzdurchmessers speziell für gerändelte Bauteile am Beispiel der Torsionsspannungsberechnung vorgestellt. Für die Berechnung wurde ein empirischer Ansatz gewählt, um eine einfache Handhabung der Gleichungen zu ermöglichen.

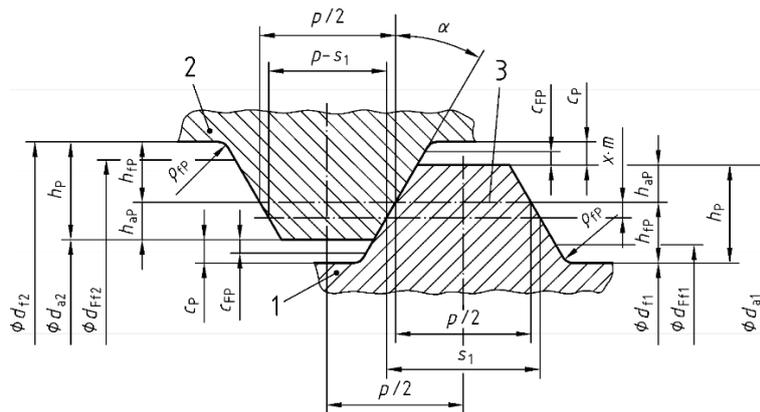


Abbildung 1: Ausschnitt aus dem Bezugsprofil für Zahnwellen nach DIN 5480 [6]

2 Bestimmung des Torsions-Widerstandsmomentes und des Ersatzdurchmessers für gerändelte Bauteile

Für die Berechnung von Torsionsspannungen wird neben dem Drehmoment, welches die Spannung hervorruft, das polare Widerstandsmoment gegen Torsion benötigt. Die Berechnung der Torsionsspannung erfolgt mittels Gleichung (1):

$$\tau_t = \frac{M_t}{W_p} \tag{1}$$

Das polare Widerstandsmoment gegen Torsion berechnet sich für Kreisquerschnitte mit dem Außendurchmesser D wie folgt:

$$W_p = \frac{\pi}{16} D^3 \tag{2}$$

An einer gerändelten Welle sind aufgrund von Zeichnungsangaben oder von Messungen am Bauteil in der Regel der Kopfkreisdurchmesser D_1 und der Fußkreisdurchmesser $D_{r,fuss}$ bekannt. Die Bestimmung von Widerstandsmomenten mit diesen Durchmessern ist jedoch

ungenau (zum Vergleich wurden mit diesen Durchmesser bestimmte Widerstandsmomente in Tabelle 3 und Tabelle 4 ebenfalls aufgeführt).

Für die exakte Bestimmung des Widerstandsmoments gegen Torsion für gerändelte Bauteile ist der Ersatzdurchmesser D_{ersatz} erforderlich. Er kann jedoch nicht durch geometrische Messungen bestimmt oder mit einfachen, bereits existierenden Beziehungen aus den bekannten Durchmessern abgeleitet werden. Der Ersatzdurchmesser entspricht dem Durchmesser einer imaginären runden Welle mit dem gleichen Widerstandsmoment wie die gerändelte Welle. Dieser Ersatzdurchmesser D_{ersatz} liegt in Abhängigkeit des Rändelprofils, geometrisch zwischen Kopfkreis- D_1 und Fußkreisdurchmesser $D_{r,\text{fuss}}$ der Rändelung (vgl. Abbildung 2).

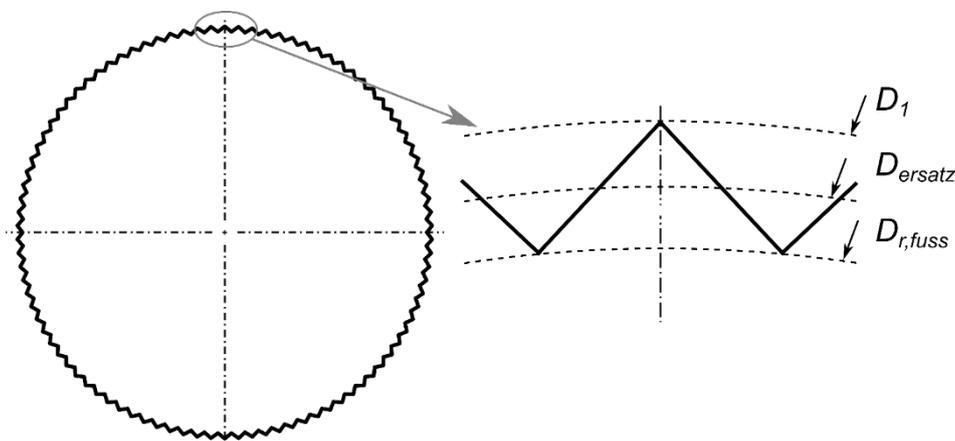


Abbildung 2: Querschnitt einer gerändelten Welle (links) und schematische Darstellung der für die Rändelung wichtigen Durchmesser (rechts)

Mit aktuellen CAD-Systemen kann dieser Ersatzdurchmesser D_{ersatz} relativ einfach ermittelt werden, wenn die gewünschte Bauteilgeometrie als CAD-Modell vorliegt. Dazu wird über die Ausgabe der Masseneigenschaften das polare Trägheitsmoment I_p des gerändelten Bauteilquerschnitts ausgegeben. Anschließend wird die Formel für I_p nach D_{ersatz} umgestellt und der gesuchte Ersatzdurchmesser kann mit Gleichung (3) berechnet werden:

$$D_{\text{ersatz}} = \sqrt[4]{\frac{32I_p}{\pi}} \quad (3)$$

In der Praxis, besonders bei der Auslegung von Bauteilen oder Baugruppen, stehen solche CAD-Daten jedoch selten zur Verfügung und müssten zunächst ausschließlich für diesen

Zweck erzeugt werden, um auf oben genanntem Weg den Ersatzdurchmesser zu bestimmen. Das normale CAD-Modell der Antriebskonstruktion hat aus Performancegründen üblicherweise nicht diesen Detaillierungsgrad.

Aus diesem Grund wurden im Rahmen einer breit angelegten Geometrie-Studie die Ersatzdurchmesser für gerändelte Wellen nach dem oben beschriebenen Verfahren bestimmt. Dabei wurden neben der Rändelgeometrie nach DIN 82 auch Geometrievariationen entsprechend aktueller Forschungen zum Thema der Rändelpressverbindungen [9] betrachtet. Dazu zählen zum einen die Ausrundung der Zahnfußbereiche zwischen den Rändelzähnen und zum anderen ein Abtragen der Köpfe der Rändelzähne, vgl. Abbildung 3. Der untersuchte Parameterbereich ist in Tabelle 1 aufgeführt.

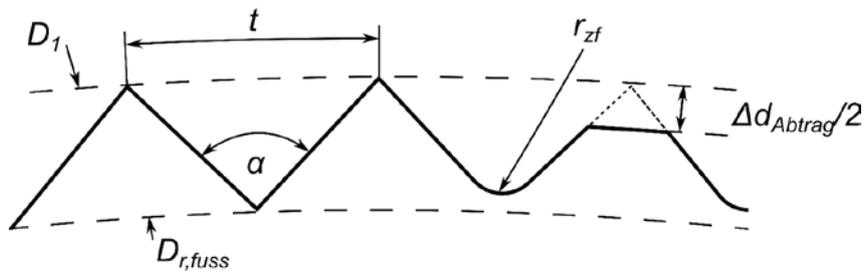


Abbildung 3: Schematische Darstellung eines Rändelzahnes nach DIN 82 (links), einer zusätzlichen Zahnfußausrundung r_{zf} zwischen den Rändelzähnen (Mitte) und einem Rändelzahn mit abgetragenem Zahnkopf (rechts)

Tabelle 1: Untersucher Parameterbereich für die Geometrie-Studie zur Ersatzdurchmesserbestimmung (gleichzeitig Geltungsbereich für die ermittelten Berechnungsgleichungen)

Parameter	Rändel-Geometrie		
	DIN 82	DIN 82 + Zahnfußausrundung r_{zf}	DIN 82 - Abtrag a der Zahnköpfe
Profilöffnungswinkel α in °	90; 105	90; 105	90; 105
Teilung t in mm	0,5; 1; 1,6	0,5; 1; 1,6	0,5; 1; 1,6
Zahnfußausrundung r_{zf} in mm	-	0,1 – 0,5	-
Abtragsfaktor a zur Multiplikation mit der Zahnhöhe	-	-	0,1 – 0,66
betrachteter Wellen-Durchmesserbereich in mm	6 – 250	6 – 100	6 – 100

Auf Basis der ermittelten Ersatzdurchmesser wurden empirische Berechnungsgleichungen für den Ersatzdurchmesser in Abhängigkeit von Wellenaußendurchmesser D_1 , Profilöffnungswinkel α , Teilung t , sowie der Zahnfußausrundung r_{zf} und dem Abtrag Δd_{Abtrag} ,

welcher sich aus dem Abtragsfaktor a und der Teilung t berechnet, siehe Gleichung (6) aufgestellt.

Die vom CAD-System ausgegebenen Werte wurden anhand von rechnerisch überprüfbareren Beispielen, sowie einem Quervergleich mit einem anderen CAD-System abgeglichen, um die ausgegebenen Werte auf Richtigkeit zu prüfen.

Die Berechnungsgleichungen für den Ersatzdurchmesser sind im Folgenden angegeben. Der Ersatzdurchmesser für eine Rändelung nach DIN 82 kann mit Gleichung (4) bestimmt werden:

$$D_{\text{ersatz,DIN82}} = D_1 - f_{\text{Teilung}} \cdot t \quad (4)$$

Soll neben der Rändelgeometrie eine zusätzliche Zahnfußausrundung berücksichtigt werden kann dies mit Gleichung (5) erfolgen:

$$D_{\text{ersatz,r}_{zf}} = D_1 - f_{\text{Teilung}} \cdot t + r_{zf} \cdot f_{\text{Radius}} \quad (5)$$

Sind an der Rändelgeometrie nachträglich die Zahnköpfe abgetragen worden, kann der Ersatzdurchmesser mit Gleichung (7) bestimmt werden. Dazu ist es erforderlich, dass zunächst der Abtrag Δd_{Abtrag} mit dem in Tabelle 1 angegebenen Abtragsfaktor a entsprechend Gleichung (6) bestimmt wird.

$$\Delta d_{\text{Abtrag}} = \frac{t \cdot a}{\tan(\alpha/2)} \quad (6)$$

$$D_{\text{ersatz,a}} = D_1 - f_{\text{Teilung}} \cdot t - (f_{\text{Abtrag}} \cdot \Delta d_{\text{Abtrag}}^{e_{\text{Abtrag}}}) \quad (7)$$

Da die betrachteten Geometrievariationen der Rändelung modular eingesetzt werden können und in der Geometrie-Studie auch unabhängig voneinander untersucht worden sind, können die verschiedenen Einflüsse auf den Ersatzdurchmesser in einer Gleichung zusammengefasst werden. Der Ersatzdurchmesser D_{ersatz} für gerändelte Wellen kann folglich mit Gleichung (8) analytisch bestimmt werden:

$$D_{\text{ersatz}} = D_1 - f_{\text{Teilung}} \cdot t + r_{zf} \cdot f_{\text{Radius}} - (f_{\text{Abtrag}} \cdot \Delta d_{\text{Abtrag}}^{e_{\text{Abtrag}}}) \quad (8)$$

Die für die Berechnung erforderlichen Faktoren sind in Abhängigkeit der Rändelgeometrie in Tabelle 2 aufgeführt. Die in Tabelle 1 angeführten Untersuchungsparameter der Geometrie-Studie sind als Gültigkeitsbereich für das hier gezeigte Berechnungsverfahren zu betrachten. Für außengerändelte Hohlwellen kann die Berechnung des Ersatzdurchmessers ebenfalls nach dem hier vorgestellten Vorgehen erfolgen. Allerdings muss bei der Bestimmung des polaren Widerstandsmoments die Formel für Hohlwellen unter Berücksichtigung des Innendurchmessers angewendet werden.

Tabelle 2: Geometrieabhängige Faktoren für die Ersatzdurchmesserberechnung

Parameter	Rändel-Geometrie									
	DIN 82		DIN 82 + Zahnfußausrundung r_{zf}		DIN 82 - Abtrag a der Zahnköpfe					
Profilöffnungswinkel α in °	90	105	90	105	90			105		
Teilung t	0,5 – 1,6		0,5 – 1,6		0,5	1	1,6	0,5	1	1,6
f_{Teilung}	0,5	0,38	-		-			-		
f_{Radius}	-		0,25	0,18	-			-		
f_{Abtrag}	-		-		1,12	0,55	0,33	1,8	0,9	0,46
e_{Abtrag}	-		-		2,1	2,1	2,1	2,2	2,4	2,3

Die Bestimmung des Ersatzdurchmessers wird hier zunächst auf außengerändelte Wellen beschränkt. Für axial gefügte Rändelpressverbindungen muss der gerändelte Verbindungspartner eine deutlich größere Härte aufweisen, als das glatte Gegenstück (vgl. [1] und [2]). Dementsprechend kann davon ausgegangen werden, dass es an gerändelten und ggf. gehärteten Vollwellen in der Regel nur zu elastischen Verformungen während des Fügevorgangs kommen kann. Die Abweichungen zwischen Rändelpressverband im gefügten Zustand und theoretischer Bauteilgeometrie sind folglich gering. Werden dagegen dünnwandige Hohlwellen gerändelt oder besonders dünnwandige Naben mit einer Innen-Rändelung versehen, könnte es dort trotz Härte­differenz zwischen den Bauteilen zu größeren Verformungen (ggf. sogar plastisch) im gefügten Zustand kommen. Eine Übereinstimmung der Bauteilgeometrien von gefügter Verbindung und Berechnungsmodell könnte dann nicht mehr gegeben sein.

3 Verifikation des Berechnungsverfahrens

Für die Überprüfung des in Abschnitt 2 vorgestellten Vorgehens zur Bestimmung des Widerstandsmoments wurden Ersatzdurchmesser bzw. Widerstandsmomente für

unterschiedliche Wellendurchmesser- und Teilungskombinationen, sowie verschiedene Profilöffnungswinkel analytisch ermittelt und mit den aus der Geometrie-Studie gewonnenen CAD-Werten abgeglichen. Ferner wurden die Ersatzdurchmesser für Rändelzähne nach DIN 82, die Kombinationen von Rändel nach DIN 82 und Zahnfußausrundung r_{zf} , sowie abgetragene Rändelzähne ermittelt und abgeglichen.

An dieser Stelle sei erwähnt, dass sich mit der Aufteilung einer vorgegebenen Teilung auf einen vorgegebenen Wellenaußendurchmesser in der Regel nicht ganze Zähnezahlen ergeben. Im Rahmen der hier vorgestellten Geometrie-Studie wurden diese theoretischen Zähnezahlen jeweils auf die nächst größere oder kleinere Zähnezahl auf- bzw. abgerundet. Zunächst wurden die Berechnungsgleichungen für den Rändel nach DIN 82 mit den beiden laut Norm möglichen Profilöffnungswinkel abgeglichen. Die Abweichungen zwischen berechneten und anhand der CAD-Modelle ermittelten Widerstandsmomenten für einen Profilöffnungswinkel von $\alpha = 90^\circ$ sind in Tabelle 3 und für ein $\alpha = 105^\circ$ in Tabelle 4 anhand ausgewählter Geometrien gegenübergestellt:

Beim Abgleich der Ergebnisse wird deutlich, dass Abweichungen zwischen mittels CAD und analytisch bestimmten Ersatzdurchmessern bzw. Widerstandsmomenten sehr gering sind (fett gedruckte Werte). Während die Abweichung der Widerstandsmomente bei kleinen Wellendurchmessern im Bereich bis maximal 2,5% liegen, verringert sich die Abweichung mit größer werdendem Wellendurchmesser in den Promille-Bereich. In der Praxis bedeutet dies Abweichungen des Ersatzdurchmessers im Hundertstel-Millimeterbereich. Die Verbesserung des Verfahrens gegenüber einer Ersatzdurchmesser- bzw. Widerstandsmomentbestimmung mittels Nenn- oder Fußkreisdurchmesser ist ebenfalls aufgeführt (kursiv gedruckte Werte). Hier liegt die Verbesserung des neuen Verfahrens geometrie-abhängig im Bereich von ca. 1 bis 69%. Diese Verbesserung entspricht auch den Abweichungen, die für die Spannungsberechnung mittels Nenn- oder Fußkreisdurchmesser zu erwarten sind.

Mit dem neuen Verfahren stellen sich bei kleinen Wellendurchmessern $D_1 = 6$ mm und großer Teilung $t = 1,6$ mm Abweichungen des Widerstandsmoments bis max. 2,5% ein. Bei größeren Wellendurchmessern liegen die Abweichungen deutlich unter 1%.

Auffällig sind die vergleichsweise großen Abweichungen bei kleinen Wellendurchmessern und Teilung $t = 1,6$ mm. Dazu sei erwähnt, dass mit der hier zwangsläufig vorgenommenen Rundung der theoretischen Zähnezahl und der Modellierung dieser Modelle, bei kleinen Wellendurchmessern und großer Teilung nur sehr geringe Zähnezahlen entstehen.

Aufgrund der Aufteilung einer ganzen Zähnezahl entstehen Lücken zwischen den modellierten Zähnen. Dies ist ein möglicher Grund für die in der Berechnung gezeigten Abweichungen in diesem speziellen Fall.

Tabelle 3: Beispielrechnung für Wellen mit Rändel nach DIN 82, für einen Profilöffnungswinkel $\alpha = 90^\circ$

Wellenaußen- durchmesser	in mm	6			30			100		
Teilung	t in mm	0,5	1	1,6	0,5	1	1,6	0,5	1	1,6
Ersatz- durchmesser	D_{ersatz} in mm	5,75	5,5	5,2	29,75	29,5	29,2	99,75	99,5	99,2
Kopfkreis- durchmesser	D_1 in mm	6			30			100		
Fußkreis- durchmesser	$D_{r,\text{fuß}}$ in mm	5,5	5	4,4	29,5	29	28,4	99,5	99	98,4
polares Widerstands- moment	$W_{p,\text{CAD}}$ in mm ³	37,39	32,98	28,27	5170,9	5043,6	4893,3	194883,2	193427,8	191701,7
	$W_{p,\text{Dersatz}}$ in mm ³	37,33	32,67	27,61	5170,0	5040,8	4888,5	194880,6	193419,0	191674,8
	$W_{p,D1}$ in mm ³	42,41			5301,4			196349,5		
	$W_{p,\text{Dr,fuß}}$ in mm ³	32,67	24,54	16,73	5040,8	4788,8	4497,6	193419	190517,8	187074,8
Verhältnis von $W_{p,\text{CAD}} / W_{p,\text{Dersatz,DIN82}}$		1,002	1,010	1,024	1,0002	1,0006	1,0010	1,0000	1,0000	1,0001
Verhältnis von $W_{p,\text{CAD}} / W_{p,D1}$		0,88	0,78	0,67	0,98	0,95	0,92	0,99	0,99	0,98
Verhältnis von $W_{p,\text{CAD}} / W_{p,\text{Dr,fuß}}$		1,14	1,34	1,69	1,03	1,05	1,09	1,01	1,02	1,02

In Abbildung 4 sind die Durchmesser-Abweichungen für Wellen mit Rändelungen nach DIN 82, Profilöffnungswinkel $\alpha = 90^\circ$ und zusätzlicher Zahnfußausrundung r_{zf} für unterschiedliche Wellendurchmesser und Teilungen dargestellt.

Insgesamt sind die Abweichungen gering. Die größten Abweichungen sind bei Wellendurchmesser $D_1 = 6$ mm zu finden und betragen maximal ca. 0,6%. Dabei werden die prozentualen Abweichungen mit zunehmendem Wellendurchmesser geringer und betragen bei einem Wellendurchmesser $D_1 = 100$ mm noch etwa 0,05%. Bei einem Profilöffnungswinkel von $\alpha = 105^\circ$ bewegen sich die Abweichungen in sehr ähnlichen Größenordnungen.

Tabelle 4: Beispielrechnung für Wellen mit Rändel nach DIN 82, für einen Profilöffnungswinkel $\alpha = 105^\circ$

Wellenaußen- durchmesser	in mm	6			30			100		
Teilung	t in mm	0,5	1	1,6	0,5	1	1,6	0,5	1	1,6
Ersatz- durchmesser	D_{ersatz} in mm	5,81	5,62	5,392	29,81	29,62	29,392	99,81	99,62	99,392
Kopfkreis- durchmesser	D_1 in mm	6			30			100		
Fußkreis- durchmesser	$D_{r,\text{fuss}}$ in mm	5,62	5,23	4,77	29,62	29,23	28,77	99,62	99,23	98,77
polares Widerstands- moment	$W_{p,\text{CAD}}$ in mm ³	38,56	35,15	31,48	5201,3	5103,6	4988,2	195224,4	194107,7	192783,2
	$W_{p,\text{Dersatz}}$ in mm ³	38,51	34,85	30,78	5201,3	5102,5	4985,6	195232,5	194119,7	192789,9
	$W_{p,D1}$ in mm ³	42,41			5301,4			196349,5		
	$W_{p,Dr,\text{fuss}}$ in mm ³	34,78	28,13	21,34	5100,6	4905,0	4676,8	194098,2	191864,2	189206,1
Verhältnis von $W_{p,\text{CAD}} / W_{p,\text{Dersatz,DIN82}}$		1,001	1,009	1,023	1,0000	1,0002	1,0005	1,0000	0,9999	1,0000
Verhältnis von $W_{p,\text{CAD}} / W_{p,D1}$		0,91	0,83	0,74	0,98	0,96	0,94	0,99	0,99	0,98
Verhältnis von $W_{p,\text{CAD}} / W_{p,Dr,\text{fuss}}$		1,11	1,25	1,48	1,02	1,04	1,07	1,006	1,01	1,02

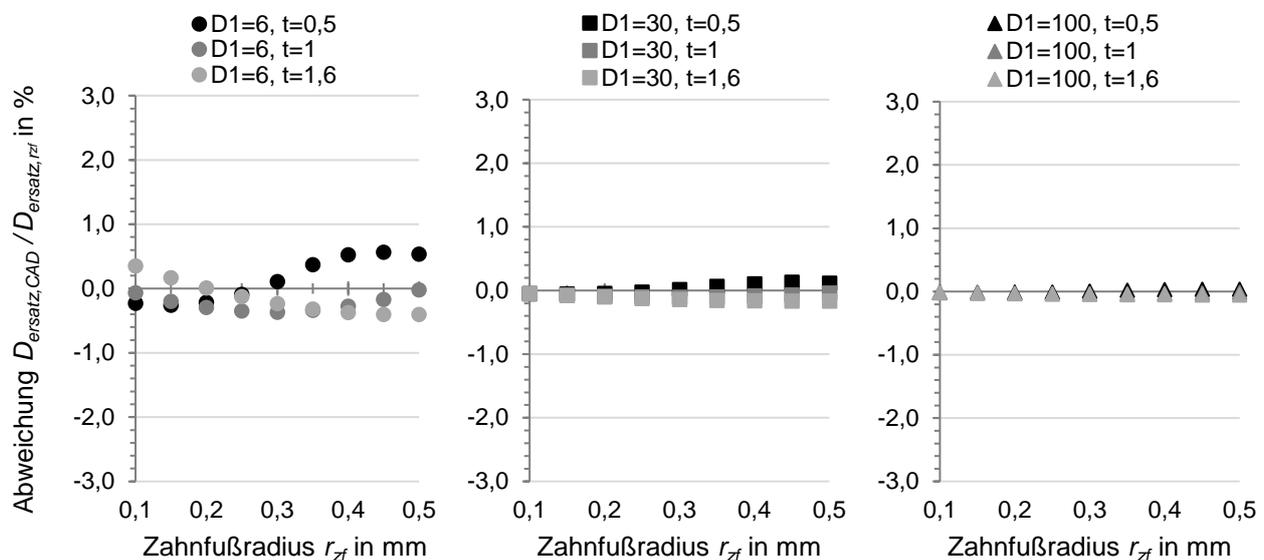


Abbildung 4: Abweichungen zwischen den mittels CAD bestimmten Ersatzdurchmessern und den berechneten Ersatzdurchmessern für Nenndurchmesser $D_1 = 6$ mm (links), $D_1 = 30$ mm (Mitte) und $D_1 = 100$ mm (rechts) in Abhängigkeit von Zahnfußradius r_{zf} und Teilung t , Profilöffnungswinkel $\alpha = 90^\circ$

In Abbildung 5 sind die Abweichungen für Wellen mit Rändeln nach DIN 82, Profilöffnungswinkel $\alpha = 90^\circ$ und einem Abtrag der Zahnköpfe (Abtragsfaktor a) für unterschiedliche Wellendurchmesser und Teilungen dargestellt.

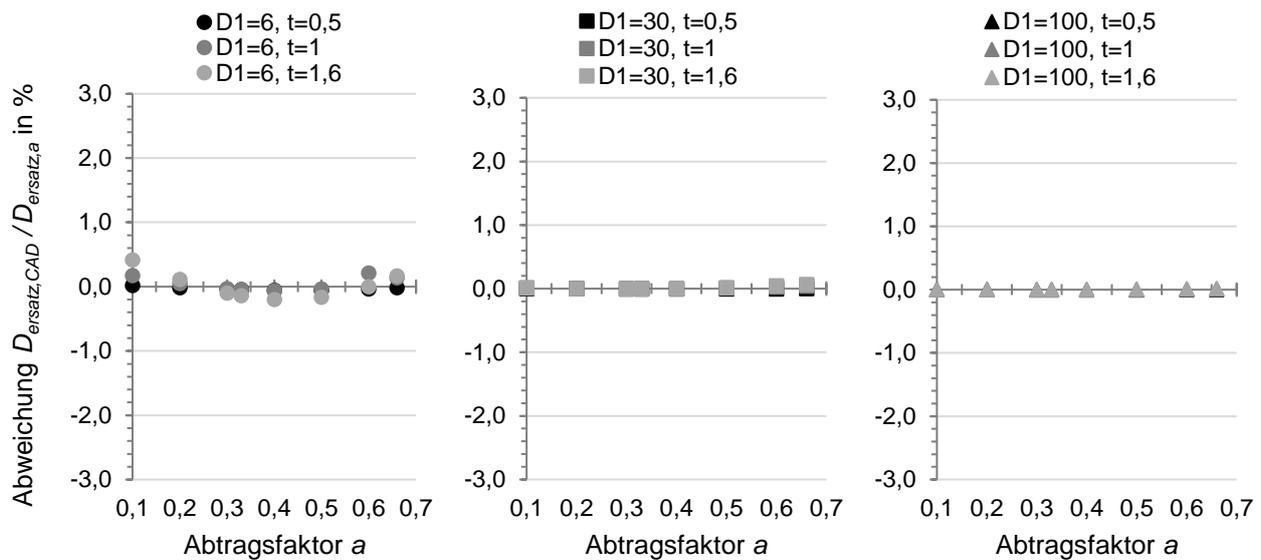


Abbildung 5: Abweichungen zwischen den mittels CAD bestimmten Ersatzdurchmessern und den berechneten Ersatzdurchmessern für Nenn- und Ersatzdurchmesser $D_1 = 6$ mm (links), $D_1 = 30$ mm (Mitte) und $D_1 = 100$ mm (rechts) in Abhängigkeit vom Zahn-Abtragsfaktor a und Teilung t , Profilöffnungswinkel $\alpha = 90^\circ$

Insgesamt sind die Abweichungen zwischen den mittels CAD bestimmten ($D_{\text{ersatz,CAD}}$) und den mit dem neuen Verfahren berechneten Werten ($D_{\text{ersatz,rzf}}$) sehr gering. Die maximalen Abweichungen von ca. 0,4 % sind erneut bei kleinen Wellendurchmessern mit $D_1 = 6$ mm und $t = 1,6$ mm zu finden. Eine mögliche geometriebedingte Ursache wurde bereits zuvor diskutiert. Mit steigenden Wellendurchmessern verringern sich die Abweichungen jedoch stark und gehen gegen Null.

Bei einem Profilöffnungswinkel von $\alpha = 105^\circ$ bewegen sich die Abweichungen auch bei abgetragenen Zahnköpfen in sehr ähnlichen Größenordnungen.

Zusätzlich wurden Vergleichsrechnungen mit Geometrien durchgeführt, die nicht als Stützpunkte in der Geometrie-Studie enthalten waren. Die ermittelten Abweichungen liegen dabei unterhalb der für die einzelnen Geometrievarianten ermittelten maximalen Werte.

Es sei allerdings darauf hingewiesen, dass wenn die Ersatzdurchmesserberechnung für Rändel nach DIN 82 mit zusätzlicher Zahnfußausrundung r_{zf} und abgetragenen Zahnköpfen angewendet wird, sich auch die für beide Geometrievarianten ermittelten Abweichungen addieren.

4 Zusammenfassung

Mit dem hier vorgestellten Berechnungsverfahren können der Ersatzdurchmesser und damit die Nennspannungen für gerändelte Bauteile nach DIN 82 mit einer hohen Genauigkeit

durch einfache Näherungsgleichungen analytisch bestimmt werden. Das gezeigte Verfahren spielt besonders bei kleinen Wellendurchmessern eine Rolle, da der Wellenaußendurchmesser und der Zahnfußdurchmesser hier besonders stark vom Ersatzdurchmesser abweichen können. Das Verfahren ermöglicht zudem die Berücksichtigung von Rändeln mit abgetragenen Zahnköpfen und/oder Zahnfußausrundungen.

Sollte der Geltungsbereich der aktuellen DIN 82 im Zuge neuer Anwendungen für gerändelte Bauteile, etwa in Rändelpressverbindungen, erweitert werden, dann ist auch eine Erweiterung der Gültigkeitsgrenzen dieses Berechnungsverfahrens erforderlich.

Literatur

- [1] Bader, M.: *Das Übertragungsverhalten von Pressverbänden und die daraus abgeleitete Optimierung einer formschlüssigen Welle-Nabe-Verbindung*, Graz, Technische Universität, Diss., 2009
- [2] Lätzer, M.: *Füge und Übertragungsverhalten torsionsbelasteter Stahl-Aluminium-Rändelpressverbindungen*, Technische Universität Chemnitz, Diss. 2016
- [3] Mänz, T.: *Auslegung von Pressverbindungen mit gerändelter Welle*, Technische Universität Clausthal, Diss., 2017
- [4] Suchý, L.; Gerstmann, T.; Leidich, E.; Hasse, A.; Awiszus, B.: *Innenverzahnter Rändelpressverband als Weiterentwicklung des konventionellen Rändelpressverbands*, Artikel zur 8. VDI-Fachtagung Welle-Nabe-Verbindungen. In: VDI-Berichte (2018), Nr. 2337, S. 95–108
- [5] Norm DIN 5466-1: *Tragfähigkeitsberechnung von Zahn- und Keilwellen-Verbindungen – Teil 1: Grundlagen*, 2000
- [6] Norm DIN 5480-1: *Passverzahnungen mit Evolventenflanken und Bezugsdurchmesser – Teil 1: Grundlagen*, 2006
- [7] Daryusi, A.; Jung, S.: *Der Ersatzdurchmesser dh_1 nach DIN 5466 unter der Lupe*, Artikel zur 6. VDI-Fachtagung Welle-Nabe-Verbindungen. In: VDI-Berichte (2014), Nr. 2238, S. 261–265
- [8] Norm DIN 82: *Rändel*, 1973
- [9] Mörz, F.; Schäfer, G.: *Einflüsse auf den Fügevorgang von Rändelpressverbindungen*, In: Institutsmitteilung, Institut für Maschinenwesen, Technische Universität Clausthal (2019), Nr. 44, S. 19–27

Einfluss gekerbter z-Pins auf die bruchmechanischen sowie Inplane Eigenschaften z-Pin verstärkter Prepreg-Laminat

André Knopp, Gerhard Scharr

Lehrstuhl für Konstruktionstechnik/Leichtbau, Universität Rostock

Albert-Einstein-Str. 2, D-18059 Rostock

Email: andre.knopp@uni-rostock.de; Internet: <http://www.leichtbau.uni-rostock.de>

Inhalt: Der Artikel beschreibt experimentelle Untersuchungen zur Ermittlung der Pullout- und Delaminationseigenschaften unter Mode-I-Rissöffnungsbeanspruchung sowie Inplane-Zugeigenschaften unidirektional-kohlenstofffaserverstärkter Prepreg-Laminat, dreidimensional verstärkt mit gekerbten z-Pins mit rechteckförmigen Umfangskerben auf der z-Pin-Oberfläche. Die Ergebnisse zeigen, dass die Pullout-Arbeit bei Proben mit gekerbten z-Pins mit einer Kerbtiefe von $10\ \mu\text{m}$ und einem Kerbenabstand von $100\ \mu\text{m}$ um bis zu 40% erhöht werden konnten, im Vergleich zu den ungekerbten z-Pins. Das resultiert in einer Erhöhung des Risswiderstandes unter Mode-I-Beanspruchung um bis zu 12%. Aus den Messwerten der Untersuchungen zu den Inplane-Zugeigenschaften kann ermittelt werden, dass keine Abhängigkeit der Kerbtiefe auf die Zugfestigkeit beschrieben werden kann. Wird dagegen der Kerbenabstand verändert, bei konstanter Kerbtiefe von $20\ \mu\text{m}$ und -breite von $100\ \mu\text{m}$, kann eine Erhöhung der Festigkeit um 4% bei jeder Vergrößerung des Kerbenabstandes um $100\ \mu\text{m}$ beschrieben werden. Der Zug-E-Modul zeigt dagegen keine Abhängigkeit vom Kerbenabstand und der -tiefe, im Vergleich zu den verpinnten Proben mit ungekerbten Pins.

Stichwörter: 3-dimensionale Verstärkung, z-Pin-Verfahren, Mikrostrukturierung, gekerbte z-Pins

Influence of circumferentially notched z-pins on the fracture mechanical and in-plane properties of z-pinned laminates

Abstract: The paper presents experimental investigations to evaluate the pullout and Mode-I delamination properties as well as in-plane tensile properties of unidirectional carbon-fiber reinforced prepreg laminates reinforced with circumferentially notched z-pins with rectangular shape. The results show that the pullout energy of specimens with notched z-pins was increased by up to 40% with a notch depth of $10\ \mu\text{m}$ and a notch distance of $100\ \mu\text{m}$, compared to the samples with unnotched z-pins. This results in an increase in Mode-I delamination toughness of around 12%. Based on the experimental results for the in-plane tensile properties, it can be concluded that no dependency of the notch depth on the in-plane tensile strength can be described. However, changing the notch distance, at a constant notch depth of $20\ \mu\text{m}$ and width of $100\ \mu\text{m}$, an increase in tensile strength of 4% with every $100\ \mu\text{m}$ increase of notch distance can be described. In comparison, the Young's modulus shows no dependency on notch distance and depth, compared to pinned samples with unnotched pins.

Keywords: 3-dimensional reinforcement, z-pinning, micro-structuring, circumferentially notched z-pins

1 Einleitung

Kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe spielen, aufgrund ihrer hervorragenden mechanischen Eigenschaften kombiniert mit einem geringen Gewicht, eine immer größer werdende Rolle, bei der Anwendung in Strukturbauteilen in der Luft- und Raumfahrt sowie in Anwendungen in der Elektromobilität. Diese Eigenschaften zeigen sich in der Laminebene, in der die lasttragenden Fasern ausgerichtet sind. Es können aber auch weniger befriedigende Eigenschaften, die sich aus dem schichtweisen Aufbau ergeben, beschrieben werden. Dazu zählen z.B. die geringen mechanischen Eigenschaften, wie E-Modul und Festigkeit, in Dickenrichtung des Laminates sowie die geringen Schlagzähigkeiten. Das führt dazu, dass bei stoß- und schlagartigen Beanspruchungen Delaminationen zwischen den Faserlagen entstehen können, die mit einer Verringerung der Resttragfähigkeit einhergehen. Ebenso sind Fehlstellen unterschiedlicher Größen immer in Verbundwerkstoffen vorhanden, die unter dynamischen Beanspruchungen wachsen können und dadurch die Faser-Kunststoff-Verbundstruktur schwächen.

Es existieren unterschiedlichen Ansätze diesen nachteiligen Eigenschaften zu begegnen, wie z.B. die Einbringung von Elastomer- bzw. Thermoplastpartikeln in die vorrangig zum Einsatz kommenden duroplastischen Matrices [1] oder die Anordnung von Verstärkungsfasern in Dickenrichtung des Laminates. Durch eine Vielzahl von Methoden, die vorrangig aus der Textilindustrie übernommen wurden, wie z.B. die 3D-Web- [2, 3] und Flechtverfahren [4] oder das Vernähen von Faserlagen [3, 5], kann eine dreidimensionale Faserarchitektur erzeugt werden, die ein Risswachstum verlangsamen und sogar stoppen kann, um schadenstolerante Strukturkomponenten zu erzeugen.

Wenn vorimprägnierte Faserhalbzeuge (Prepreg) verwendet werden, findet vorrangig das z-Pin-Verfahren zur 3D-Verstärkung Anwendung [6]. Dabei werden dünne stabförmige Elemente (Pins), die aus hochfesten und hochsteifen Werkstoffen bestehen, senkrecht zur Laminebene eingebracht. Die z-Pins besitzen üblicherweise einen Durchmesser von 0,1 bis 1 mm und werden in z-Pin-Dichten von 0,5 bis 5% eingesetzt [6]. Partridge et al. [7] geben einen Überblick über das ultraschallunterstützte z-Pin-Verfahren, das vorrangig angewendet wird, um die z-Pins in das unausgehärtete Laminat einzubringen.

Grundlegend führen die z-Pins zu einer Erhöhung der Delaminationsfestigkeiten unter Mode-I [7, 8], Mode-II [7, 9] und Mixed-Mode-I/II [10] -Beanspruchung. Daraus resultiert eine verbesserte Schlagzähigkeit, was eine erhöhte Schadenstoleranz gegenüber Impact-

Ereignissen zur Folge hat [8, 11]. Die Eigenschaften können durch den Überbrückungseffekt, der durch die z-Pins zwischen den Faserlagen des Laminates hervorgerufen wird, beschrieben werden [7]. Die Leistungsfähigkeit einer z-Pin-Verstärkung ist maßgeblich Abhängig von der Wechselwirkung zwischen z-Pins und Laminat. Sie kann durch Auszugsuntersuchungen (Pullout) definiert werden.

Es existieren eine Vielzahl von Untersuchungen dazu, wie die Wechselwirkungen zwischen den Pins und dem Laminat beeinflusst werden können, um die übertragbaren Lasten zu erhöhen. Wang et al. [12] haben Pullout-Untersuchungen an CFK-Pins mit verdrehten Fasern durchgeführt und eine Verdreifachung der erreichbaren maximalen Reibkräfte sowie Pullout-Arbeit ermittelt. Die Scherfestigkeit zwischen Pins und Laminat konnte um 61% erhöht werden. Zhang et al. [13] haben an verdrehten Pins Erhöhungen der maximalen Ablöse und Reibkräfte von bis zu 19,4% ermittelt, was sie auf die vergrößerte Oberfläche durch die erhöhte Oberflächenrauigkeit zurückgeführt haben. Untersuchungen an z-Pins, die vor der Insertion mit Niederdruckplasma oder flüssigem Stickstoff behandelt wurden, zeigen ebenfalls gestiegene Pullout-Arbeit. Diese können auf die erzielten Verbesserungen der Möglichkeiten zur Ausbildung kovalenten Bindungen zwischen Laminatmatrix und reaktiver Gruppen an der z-Pin-Oberfläche sowie die Erhöhung der Oberflächenrauigkeit zurückgeführt werden [14]. Hoffmann et al. [15] haben Voruntersuchungen an mikrostrukturierten Pins durchgeführt, bei denen Umfangskerben mit rechteckiger Kerbenform mit Tiefen von 25 μm bis 72 μm auf der Pin-Oberfläche eingebracht wurden. Die Ergebnisse zeigen bei einer Kerbtiefe von 25 μm Verbesserungen der Pullout-Eigenschaften um 12%. Weiterhin konnte gezeigt werden, dass die übertragbaren Lasten, bei Reduzierung der Kerbtiefe, linear ansteigen.

Die z-Pins rufen ebenfalls Verschlechterungen der mechanischen Inplane-Eigenschaften, wie z.B. der Inplane-Zugfestigkeit und E-Modul, hervor [16]. Diese können auf mikrostrukturelle Veränderungen im Laminat zurückgeführt werden, die durch die Einbringung der z-Pins entstehen, wie z.B. Faserbrüche der Laminatfasern, harzreiche Zonen in der direkten Umgebung der Pins, Mikrobrüche am z-Pin/Laminat-Interface sowie die Erhöhung der Inplane-Faserwelligkeit, Dickenerhöhung des Laminates und die Ablenkung von durchtrennten Faserenden in Dickenrichtung [16, 17].

Ziel ist es, auf Basis der Untersuchungen von Hoffmann et al. [15], den Einfluss rechteckiger Umfangskerben mit einer Kerbtiefe kleiner 25 μm sowie Variation des Kerbenabstandes auf die Pullout-Eigenschaften zu ermitteln. Darauf aufbauend sollen die Delaminations-

eigenschaften unter Mode-I Rissöffnungsbeanspruchung für die Kerbengeometrie mit den höchsten Verbesserungen ermittelt und die Auswirkungen der unterschiedlichen Kerbengeometrien auf die Inplane-Zug-Eigenschaften untersucht werden.

2 Materialien und Prüfmethode

2.1 Materialien

Zur Charakterisierung der Lamineigenschaften wird ein Kohlenstofffaser-Prepreg der Firma Cytec Engineered Materials GmbH verwendet. Das Prepreg besteht aus UD-IM7-Kohlenstofffasern mit einem Flächengewicht von 145 g/m^2 , kombiniert mit dem wärmehärtenden Epoxidharzsystem Cycom 977-2. Das Prepreg wird bei einer Temperatur von 180°C unter Vakuum und Druck ($600\text{-}700 \text{ kPa}$) für 180 min ausgehärtet und besitzt eine materialspezifische Einzelschichtdicke von $0,14 \text{ mm}$. Für die 3D-Verstärkung werden z-Pins mit einem Durchmesser von $0,5 \text{ mm}$ verwendet. Sie bestehen aus T300-Kohlenstofffasern in unidirektionaler Ausrichtung kombiniert mit einer temperaturstabilen BMI (Bismaleimid) - Matrix. Zur Ermittlung des Einflusses einer Mikrostrukturierung der z-Pin-Oberfläche auf die mechanischen Eigenschaften des verpinnten Laminates, werden Umfangskerben mit rechteckiger Querschnittsgeometrie auf der z-Pin-Oberfläche, durch die Bearbeitung mit ultra-kurzen Laserpulsen, eingebracht. In der Abbildung 1 ist beispielhaft ein gekerbter z-Pin dargestellt und die Geometrie des Pins sowie der Umfangskerben veranschaulicht.

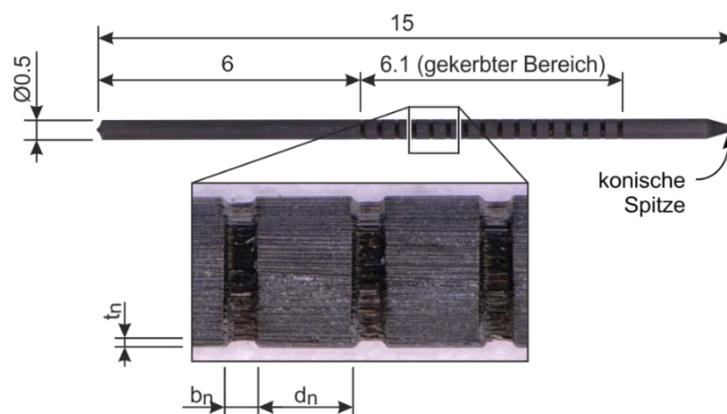


Bild 1: Z-Pin Geometrie, Kerbendefinition sowie Anordnung des gekerbten Bereiches

Die z-Pins besitzen eine Länge von 15 mm und sind einseitig konisch angespitzt. Es werden Kerben mit rechteckiger Querschnittsgeometrie auf der z-Pin-Oberfläche mit einer Breite b_n , Tiefe t_n sowie einem Abstand d_n eingebracht. Der gekerbte Bereich besitzt eine Länge von

6,1 mm und ist 6 mm entfernt vom nicht angespitzten Ende der Pins angeordnet. Die untersuchten Kerbendefinitionen sind in der Tabelle 1 zusammengefasst.

Tabelle 1: Prüfkörperumfang sowie zu untersuchende Kerbendefinitionen

Kerbendefinition	Kerbtiefe [μm]	Kerbenabstand [μm]	Kerbenbreite [μm]	Pin-Pullout [Stk.]	Zug [Stk.]	Mode-I [Stk.]
Re-10-100	10	100	100	6	6	6
Re-15-100	15	100	100	6	6	
Re-20-100	20	100	100	6	6	
Re-25-100	25	100	100	6	6	
Re-20-200	20	200	100	6	6	
Re-20-300	20	300	100	6	6	

Es wurden jeweils 6 Probenkörper geprüft. Die Pullout-Untersuchungen sowie die Ermittlung der Inplane-Zugeigenschaften erfolgte bei allen definierten Kerben, die Mode-I Untersuchungen ausschließlich an der Kerbendefinition, die die größten Werte der Pullout-Arbeit lieferte. Es werden zusätzlich Untersuchungen an Laminaten mit ungekerbten z-Pins sowie ohne z-Pin-Verstärkung durchgeführt.

2.2 Prüfmethode

Z-Pin-Pullout Prüfungen

Die Bestimmung der übertragbaren Brückenkräfte erfolgte durch Pin-Pullout Untersuchungen. Die Abbildung 2 zeigt die verwendete Prüfkörpergeometrie.

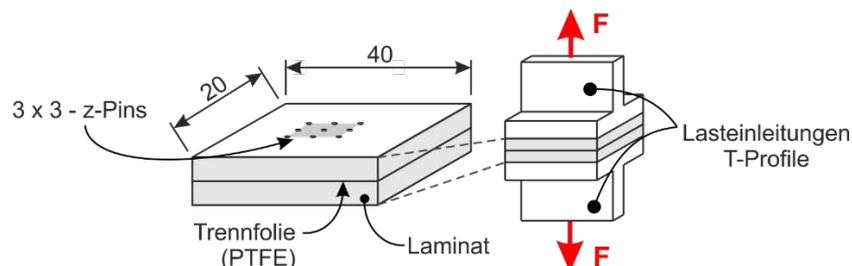


Bild 2: Pullout-Probekörpergeometrie sowie Anordnung des verpinnten Bereiche auf dem Prüfkörper

Es wurden Probekörper mit UD-Laminatstruktur aus 32 Einzelschichten $[0]_{32}$ aufgebaut, was einer Laminatdicke von 4,5 mm entspricht. In der Mittelebene ist eine PTFE-Trennschicht eingebracht, so dass beim Abheben der Prüfkörperhälften reine Pullout-Beanspruchung auf die z-Pins wirkt. Die z-Pins sind mittig in einem Raster von 3 x 3 Pins angeordnet. Mittels servohydraulischem Prüfsystem (MTS) wurden die Kraft-Weg-Beziehungen ermittelt.

Ermittlung der Mode-I Eigenschaften

Die Ermittlung der Delaminationseigenschaften unter Mode-I-Rissöffnungsbeanspruchung erfolgte mittels DCB (Double-Cantilever-Beam) -Prüfkörper. Dazu wurde ein UD-Laminataufbau mit 56 Laminatlagen $[0]_{56}$ verwendet. Die Prüfkörpergeometrie ist in der Abbildung 3 dargestellt.

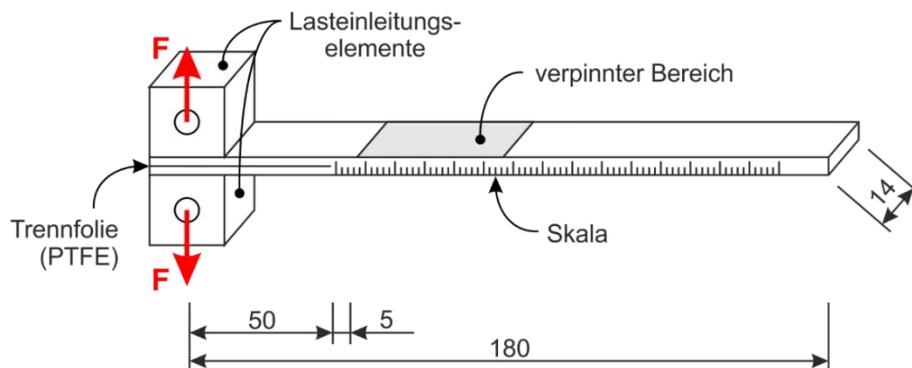


Bild 3: DCB-Probekörpergeometrie zur Ermittlung der Delaminationsfestigkeiten unter Mode-I Rissöffnung

Die Prüfkörper sind 180 mm lang sowie 14 mm breit. Als Rissstarter ist eine PTFE-Folie mit einer Dicke von $12,5 \mu\text{m}$ auf einer Länge von 50 mm eingebracht. Der verpinnte Bereich beginnt 5 mm hinter dem PTFE-Film und ist mit einer Pin-Dichte von 2% verstärkt. Die Prüfkörper wurden belastet, die Kraft-Verschiebung-Beziehungen aufgezeichnet und die jeweiligen Risslängen ermittelt. Die Prüfung wurde solange durchgeführt, bis der Riss die verpinnte Zone, die eine Länge von 50 mm besitzt, durchlaufen hat.

Ermittlung der Inplane-Zugeigenschaften

Zur Ermittlung der Zugeigenschaften wurden Prüfkörper mit UD-Laminataufbau $[0]_{15}$ mit einer Länge von 175 mm und einer Breite von 14 mm verwendet. Die Prüfkörpergeometrie ist in der Abbildung 4 dargestellt.

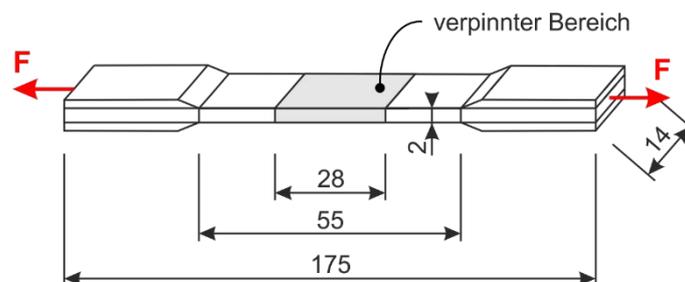


Bild 4: Probenkörpergeometrie zur Ermittlung der Inplane-Zugeigenschaften

Der verpinnte Bereich ist 28 mm lang und mittig auf dem Prüfkörper angeordnet. Es wurde eine z-Pin-Dichte von 2% verwendet. Zur Krafteinleitung wurden Aufleimer mit 2 mm Dicke an beiden Enden der Probe beidseitig aufgebracht. Mittels Extensometers mit 25 mm Messlänge wurden die Kraft-Verlängerungswerte über dem verpinnten Bereich ermittelt.

3 Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen

3.1 Z-Pin-Pullout

Die ermittelten Kraft-Verschiebungs-Beziehungen dienen als Grundlage zur Bestimmung der verrichteten Pullout-Arbeit, die erforderlich ist um die Pins vom Laminat zu lösen und unter Reibung auszuziehen. Die Abhängigkeiten der Pullout-Arbeit von der Kerbentiefe sowie dem Kerbenabstand sind in der Abbildung 5(a) und (b) dargestellt.

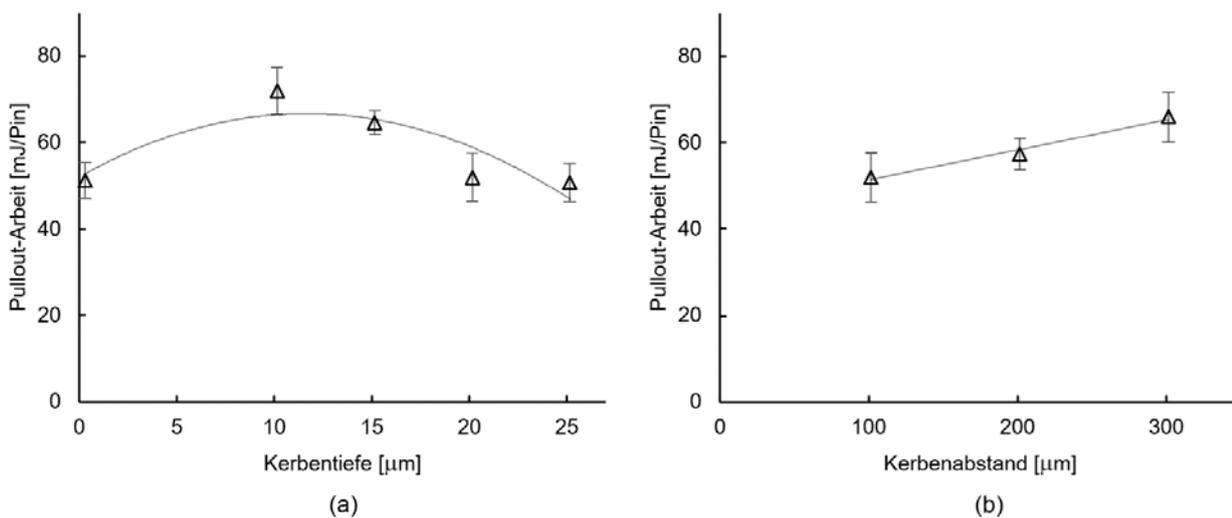


Bild 5: Pullout-Arbeit pro Pin in Abhängigkeit von (a) der Kerbentiefe bei konstantem Kerbenabstand von 100 µm; (b) des Kerbenabstandes bei konstanter Kerbentiefe von 20 µm

Die Abbildung 5(a) zeigt, dass die bei einer Kerbentiefe von 25 µm ermittelte Pullout-Arbeit dem Wert für ungekerbte Pins entspricht. Bei einer Verringerung der Kerbentiefe steigt sie an und besitzt ihr Maximum bei einer Kerbentiefe von etwa 10 µm und liegt 40% über dem Wert der ungekerbten z-Pins. Die Erhöhung der Pullout-Arbeit kann auf zwei Mechanismen zurückgeführt werden. Zum einen liegen Verhakungseffekte zwischen Laminat und Pin vor, die zu höheren Ablösekräften führen. Bei Verringerung der Kerbentiefe wird die Oberfläche, die beim Abscheren der Stege zwischen den Kerben wirkt, vergrößert. Zum anderen können, durch die oberflächlich freiwerdenden Fasern in den Bereichen der abgesicherten

Stege, während des Pin-Auszugs vergrößerte Reibwirkungen zwischen Pin-Oberfläche und verbleibenden Stegbereichen im Laminat gezeigt werden. Wird der Kerbenabstand bei konstanter Kerbtiefe von 20 μm verändert, dann kann gezeigt werden, dass mit einer Vergrößerung des Kerbenabstandes die dissipierte Energie während des Auszugs linear ansteigt und ca. 15% Erhöhung bei einem Kerbenabstand von 300 μm zeigt. Bei der Vergrößerung der Kerbenabstandes werden die auf Scherung beanspruchten Flächen durch die steigenden Stegbreiten erhöht. Das führt zu erhöhten Scherkräften bei Ablösung der Pins und gleichzeitig zu größeren Bruchflächen mit freiliegenden Fasern, die größere Reibungseffekte hervorrufen und zu einer gesteigerten Pullout-Arbeit führen.

3.2 Bruchmechanische Eigenschaften

Die ermittelten Werte der kritische Energiefreisetzungsrate G_{IC} für unverpinnte Laminat sowie verpinnte Laminat ohne sowie mit rechteckigen Umfangskerben mit der Kerbendefinition Re-10-100 sind in der Abbildung 6 gegenübergestellt.

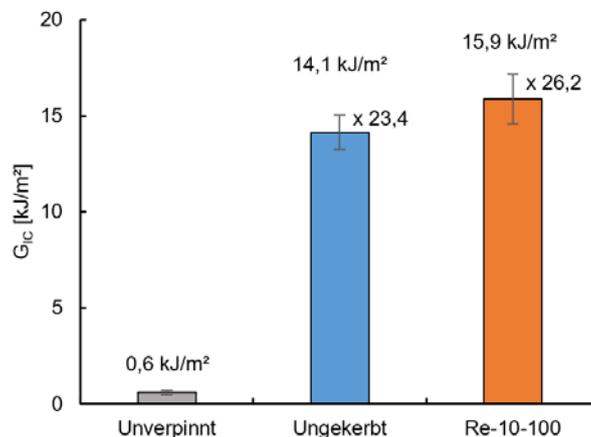


Bild 6: Kritische Energiefreisetzungsrate für unverpinnte sowie z-Pin-verstärkte Laminat mit ungekerbten sowie gekerbten z-Pins mit einer Kerbtiefe von 10 μm und einem Kerbenabstand von 100 μm

Die Kerbendefinition mit der größten Pullout-Arbeit (Re-10-100) wurde zur Ermittlung der kritischen Energiefreisetzungsrate G_{IC} verwendet. Die Auswertung wurde mittels Corrected Beam Theory (CBT) nach ISO 15024 durchgeführt. Es kann gezeigt werden, dass allgemein durch die Einbringung von z-Pins die Delaminationseigenschaften wesentlich verbessert werden können. Die Energiefreisetzungsrate kann um das 23,4fache gegenüber dem unverpinnten Laminat erhöht werden. Durchgeführte Untersuchungen von Hoffmann et al. [18] an verpinnten UD-Laminaten mit identischen Verpinnparametern zeigen vergleichbare

Werte von G_{IC} von 15 kJ/m^2 . Werden nun gekerbte z-Pins verwendet, dann können Erhöhungen von G_{IC} von ca. 12%, gegenüber den ungekerbten z-Pins, erreicht werden, was einer 26,2fache Erhöhung entspricht, im Vergleich zu den unverpinnten Laminaten.

3.3 Inplane-Zug-Eigenschaften

Die Ergebnisse der Zugeigenschaften verpinnter UD-Laminat zeigen, dass mit ungekerbten Pins eine Reduzierung der Zugfestigkeit von 32% hervorgerufen wird, im Vergleich zu den unverpinnten Laminaten. Hoffmann et al. [19] haben an verpinnten UD-Laminaten mit identischen Verpinnparametern Reduzierungen der Zugfestigkeit von 43% ermittelt. Chang et al. [20] ermittelten dagegen geringere Auswirkungen, die einer 25% Verringerung der Zugfestigkeit entspricht. Generell können diese auf die höhere Faserwelligkeit sowie gebrochene Fasern in direkter Umgebung der Pins zurückgeführt werden. Bei gleichem Pin-Durchmesser sollte die Inplane-Faserwelligkeit annähernd gleich sein, so dass bei den vorliegenden höheren Reduzierungen, gegenüber den Ergebnissen von Chang, größere Bereiche an gebrochenen Fasern vorliegen sollten. Die Auswirkungen gekerbter z-Pins auf die Zugfestigkeiten kann mit der Abbildung 7 beschrieben werden.

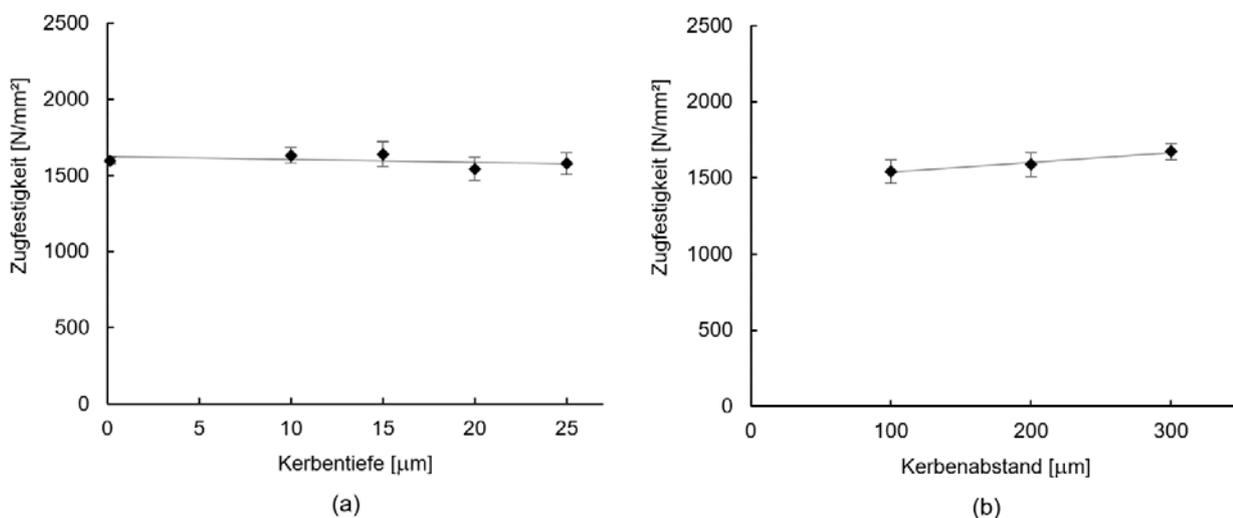


Bild 7: Inplane-Zugfestigkeit verpinnter Laminat in Abhängigkeit von (a) der Kerbtiefe bei konstantem Kerbenabstand von $100 \mu\text{m}$ und (b) vom Kerbenabstand bei konstanter Kerbtiefe von $20 \mu\text{m}$

Die Abbildung 7(a) zeigt, dass die Kerbtiefe bei konstantem Kerbenabstand keinen Einfluss auf die Zugfestigkeit besitzt. Wird dagegen der Kerbenabstand variiert, kann eine geringe Erhöhung der Zugfestigkeit von 4% bei jeder Erhöhung des Kerbenabstandes von $100 \mu\text{m}$ beschrieben werden, wie die Ergebnisse in Abbildung 7(b) zeigen.

Der Zug-E-Modul wird durch die Einbringung von z-Pins ebenfalls verringert, was vorrangig auf die in Dickenrichtung des Laminates abgelenkten Fasern zurückgeführt werden kann [20]. Die Messungen zeigen, dass bei den Proben mit ungekerbten z-Pins Reduzierungen um 20% ermittelt werden konnten, was sich mit den Daten aus [19] deckt.

Bei der Betrachtung der Ergebnisse des Zug-Moduls der Proben mit gekerbten z-Pins, wie sie in der Abbildung 8(a) und (b) dargestellt sind, kann gezeigt werden, dass die eingebrachten Kerben keinen Einfluss auf den E-Modul besitzen, egal welche Kerbendefinition betrachtet wird.

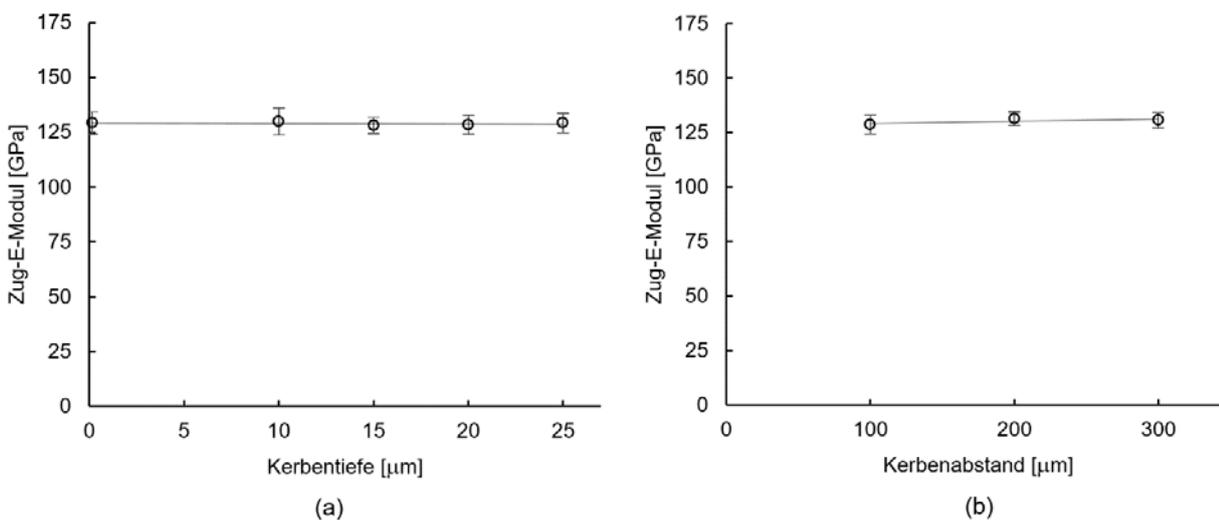


Bild 8: Inplane-Zug-Modul verpinnter Laminare in Abhängigkeit von (a) der Kerbtiefe bei konstantem Kerbenabstand von 100 μm und (b) vom Kerbenabstand bei konstanter Kerbtiefe von 20 μm

Der E-Modul zeigt keine Abhängigkeit von der Kerbtiefe, wie in der Abbildung 8(a) dargestellt ist. Ebenfalls kann kein Einfluss des Kerbenabstandes bei einer konstanten Kerbtiefe ermittelt werden, wie die Abbildung 8(b) verdeutlicht. Es kann daher davon ausgegangen werden, dass die gekerbten Pins die gleichen Faserwelligkeiten in der Ebene sowie in Dickenrichtungen hervorrufen, wie die ungekerbten z-Pins.

4 Zusammenfassung

Mit den durchgeführten Untersuchungen kann gezeigt werden, dass eine Mikrostrukturierung der z-Pin-Oberflächen, durch die Einbringung von rechteckigen Umfangskerben, die Pullout-Eigenschaften und damit die Delaminationseigenschaften unter Mode-I Rissöffnungsbeanspruchung positiv beeinflussen kann. Mit abnehmender Kerbtiefe steigt die Pullout-Arbeit an und besitzt für UD-Laminare ihr Maximum bei etwa

10 µm Kerbtiefe. Das resultiert in einer Erhöhung der Delaminationsfestigkeiten von bis zu 12%, im Vergleich zu den Proben mit ungekerbten Pins. Dagegen besitzt eine Mikrostrukturierung keinen Einfluss auf den Zug-E-Modul. Lediglich die Zugfestigkeit kann bei einer konstanten Kerbtiefe bei Vergrößerung des Kerbenabstandes geringfügig vergrößert werden. Eine Variation der Kerbtiefe hat dagegen keinen Einfluss.

Um einen Gesamtüberblick über den Einfluss mikrostrukturierter z-Pins auf die Materialeigenschaften eines verpinnten Laminates zu erhalten, sind weitere Untersuchungen notwendig, wie z.B. Mode-II und Mixed Mode I/II Betrachtungen. Diese sind Grundlage für die Charakterisierung des Delaminationsverhaltens unter Impaktbeanspruchung sowie die Schadenstoleranz. Da das Verhalten mikrostrukturierter z-Pins gleichermaßen abhängig ist von den vorliegenden Laminatparametern, wie z.B. Aufbau und Dicke, sind dazu weiterführende Betrachtungen vorzunehmen, um die Anwendung auf reale Komponenten zu ermöglichen. Dabei spielen ebenfalls die resultierenden Eigenschaften unter schwingender Beanspruchung eine besondere Rolle.

Danksagung

Die Studien wurden im Rahmen eines von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderten Forschungsprojektes (Projektnummer: 398803737) mit dem Thema: „Untersuchungen zum Einfluss strukturierter z-Pins auf die mechanischen Eigenschaften von kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen“ durchgeführt. Die Autoren danken der DFG herzlich für diese Unterstützung.

Literatur

- [1] Kinloch, Anthony James. *Fracture behaviour of polymers*. Springer Science & Business Media, 2013.
- [2] Mouritz, A.P.; Bannister, M.K.; Falzon, P.J.; Leong, K.H. *Review of applications for advanced three-dimensional fibre textile composites*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 1999, 30. Jg., Nr. 12, S. 1445-1461.
- [3] Tong, L.; Mouritz, A.P.; Bannister, M.K. *3D fibre reinforced polymer composites*. 1st ed. Boston, Elsevier, 2002.
- [4] Kyosev, Yordan (Hg). *Advances in Braiding Technology: Specialized Techniques and Applications*. Woodhead Publishing Series in Textiles, Elsevier Science, 2016.
- [5] Dransfield, K.; Baillie, C.; Mai, Y.W. *Improving the delamination resistance of CFRP by stitching-a review*. Composites Science and Technology, 1994, 50. Jg., Nr. 3, S. 305-317.

- [6] Mouritz, A.P. *Review of z-pinned composite laminates*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2007, 38. Jg., Nr. 12, S. 2383-2397.
- [7] Partridge, I.K.; Cartié, D.D.R. *Delamination resistant laminates by Z-Fiber® pinning: Part I manufacture and fracture performance*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2005, 36. Jg., Nr. 1, S. 55-64.
- [8] Freitas, G.; Magee, C.; Dardzinski, P.; Fusco, T. *Fiber insertion process for improved damage tolerance in aircraft laminates*. Journal of Advanced Materials, 1994; 25. Jg., Nr. 4, S. 36-43.
- [9] Cartié, D.D.R.; Troulis, M.; Partridge, I.K. *Delamination of Z-pinned carbon fibre reinforced laminates*. Composites Science and Technology, 2006, 66. Jg., Nr. 6, S. 855-861.
- [10] Rugg, K.L.; Cox, B.N.; Massabò, R. *Mixed mode delamination of polymer composite laminates reinforced through the thickness by z-fibers*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2002, 33. Jg., Nr. 6, S. 177-190.
- [11] Partridge, I.K.; Cartié, D.D.R.; Bonnington; T. *Manufacture and performance of z-pinned composites*. In: Shonaike G.O. and Advani S.G. (Hg.) *Advanced polymeric materials: Structure property relationships*. Boca Raton and FL: CRC Press, 2003; S. 114-153.
- [12] Wang, X.X.; Chen, L.; Jiao, Y.N.; Li, J.L. *Experimental study on interfacial adhesive properties between twisted z-pin and laminates*, Journal of Solid Rocket Technology, 2014; 37. Jg., S. 856-862.
- [13] Zhang, Q.C.X.; Li, Y.; Xiao, J. *Experimental study on the performance of twisted fiber reinforced composite z-pin*, in: *Proceedings of the 21th International Conference on Composite Materials*. Xi'an, China, Conference date: 20.08.2017-25.08.2017, 2017.
- [14] Knopp, A.; Scharr, G. *Effect of z-pin surface treatment on delamination and debonding properties of z-pinned composite laminates*. Journal of Materials Science, 2014; 49. Jg., Nr. 4, S. 1674-1683.
- [15] Hoffmann, J.; Sabban, J.; Scharr, G. *Pullout performance of circumferentially notched z-pins in carbon fiber reinforced laminates*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2018; Nr. 110, S. 197-202.
- [16] Chang, P.; Mouritz, A.P.; Cox, B.N. *Properties and failure mechanisms of z-pinned laminates in monotonic and cyclic tension*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2006; 37. Jg., Nr. 10, S. 1501-1513.
- [17] Steeves, C.A.; Fleck, N.A. *In-plane properties of composite laminates with through-thickness pin reinforcement*. *International*. Journal of Solids and Structures, 2006; 43. Jg., Nr. 10, S. 3197-3212.
- [18] Hoffmann, J.; Scharr, G. *Mode I delamination fatigue resistance of unidirectional and quasi-isotropic composite laminates reinforced with rectangular z-pins*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2018; Nr. 115, S. 228-235.
- [19] Hoffmann, J.; Scharr, G. *Mechanical properties of composite laminates reinforced with rectangular z-pins in monotonic and cyclic tension*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2018; Nr. 109, S. 163-170.
- [20] Chang, P.; Mouritz, A.P.; Cox, B.N. *Properties and failure mechanisms of z-pinned laminates in monotonic and cyclic tension*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2006; 37. Jg., Nr. 10, S. 1501-1513.

Automatisierte Modellerstellung von Mehrkörpersystemen in Modelica

Lukas Klimmeck, Jan Thiede*, Carina Fresemann, Günther Battenberg*, Rainer Stark

Fachgebiet Industrielle Informationstechnik, Technische Universität Berlin

Pascalstr. 8-9, 10587 Berlin

E-Mail: lukas.klimmeck@tu-berlin.de; Internet: <https://www.iit.tu-berlin.de>

* Battenberg ROBOTIC GmbH & Co. KG

Zum Stempel 11, 35043 Marburg

E-Mail: j.thiede@battenberg.biz; Internet: <http://www.battenberg.biz>

Inhalt: Bereits seit einiger Zeit wird Multidomänensimulation kombiniert mit einer Visualisierung in Virtual-Reality-Anwendungen im Forschungsumfeld etabliert. Jedoch sind für den Aufbau der virtuellen Szenen und Ersatzmodelle einige manuelle Schritte erforderlich, in denen bereits in CAx-Systemen definierte geometrische, kinematische und dynamische Eigenschaften des Produkts nachmodelliert werden müssen. Die hier vorgestellte Methode realisiert den automatischen Übertrag eines komplexen Mehrkörpersystems von NX Motion in die Modellierungssprache Modelica. Das automatisch erzeugte Modell wird von der Methode als natives Modelica-Format abgelegt. Gleichzeitig wird in der Spieleumgebung Unity automatisch ein Visualisierungsmodell auf Basis der Geometrie und Kinematik generiert. Das physikalische Verhaltensmodell und die virtualisierte Geometrie sind durch die Methode direkt miteinander gekoppelt.

Stichwörter: Hybride Prototypen, virtuelle Prototypen, Mulitdomänensimulation

Automated model creation for multibody systems using Modelica

Abstract: For some time, multi-domain simulation combined with visualization in a virtual reality application has become a popular approach in research and development. However, the creation of a virtual environment and an analogous model requires several manual steps. These analogous models are re-created from existing CAx models including geometry, kinematics and dynamics. The method presented here realizes an automatic transfer of a complex multi-body system from NX Motion into the modeling language Modelica. The automatically generated model will be stored in a native Modelica format. At the same time, the geometrical representation is sent to the game engine Unity, where the virtual scene is generated. The physical behavior model and the virtual scene are coupled through the method.

Keywords: smart hybrid prototyping, virtual prototyping, multi-domain simulation

1 Einleitung

Das konkrete Produktverhalten von Consumerprodukten wird in konventionellen Entwicklungsprozessen zunächst durch eine Simulation virtuell abgesichert, und im weiteren Verlauf durch einen physischen Prototyp erprobt. Die virtuelle Erprobung und Simulation bietet keine Möglichkeit das spätere Produkt in seinem Verhalten zu erleben, die physischen Prototypen sind kostenintensiv. Die Methode des Smart Hybrid Prototyping (SHP) [1] bietet die Möglichkeit, virtuelle Prototypen haptisch zu erleben. Dazu werden in einer Virtual-Reality-Umgebung Geräte oder Produkte inklusive haptischem Feedback basierend auf einer Verhaltenssimulation für Anwender hybrid, also virtuell und real, erlebbar gemacht [2]. Ein wichtiges Einsatzszenario von SHP ist das frühzeitige Absichern von Produkten für Entwicklungsingenieure und ihre internen Kunden etwa aus der Produktionsplanung.

Im Rahmen eines Forschungsprojekts geht es nun darum, die technologischen Möglichkeiten des SHP auf ein industriell verwertbares Niveau zu heben. Dazu wird als flexibles haptisches Interaktionsgerät ein 6-Achs-Industrieroboter verwendet. Ziel der aktuellen Forschung ist es, die Visualisierung der Szene und das physikalische Verhalten des individuell zu untersuchenden Prototyps möglichst einfach aufzubauen und diese an den Roboter bzw. die Visualisierung weiterzugeben. Dabei muss beachtet werden, dass die Ausführung der Roboterbewegung und die visuelle Darstellung ohne menschlich wahrnehmbare Verzögerung simultan erfolgen muss.

Im Entwicklungsprozess werden in CAx-Systemen sowohl die zukünftige Gestalt des Produktes festgelegt, als auch das kinematische Verhalten simuliert. Produkte, die aus mehreren Bauteilen bestehen, werden mit einer Mehrkörpersimulation virtuell auf ihr Verhalten hin untersucht. Diese beschreibt die Bauteile vereinfacht als Kombinationen aus starren Körpern, Federn, Dämpfern und Gelenken, sodass durch Simulation die möglichen Kraftwirkungen oder Bewegungseinschränkungen erkennbar werden. Dieser Artikel beschreibt, wie aus einer CAx-Umgebung automatisiert eine Visualisierung und eine kinematische Simulation als Vorstufe einer Robotersteuerung aufgebaut werden können. Ziel ist die Etablierung eines Automatismus zur Modellerstellung zwischen den unterschiedlichen Werkzeugen sowie eine Nutzung der SHP-Technologie mittels eines Head Mounted Device (HMD). Damit wird die SHP-Technologie für den industriellen Einsatz vorbereitet, denn die Aufbereitung der Szenen soll zukünftig zügiger erfolgen.

2 Stand der Technik

Für die automatische Erstellung der Kinematik des Prototyps wird die Schnittstelle zwischen CAD-Werkzeugen sowie der Modellierungssprache Modelica und der zugehörigen Simulationsumgebung Dymola verwendet. Erste Arbeiten zur Verwendung von Modelica als Integrationssprache für die Multidomänensimulation in Kombination mit geometrischen Modellen wurden durch Engelson et al. [3] durchgeführt. Die Autoren schufen dabei eine Möglichkeit, Geometrien und das Verhalten mehrerer Bauteile zu koppeln. Für das Ausführen des virtuellen Prototyps wurde von den Autoren eine eigene Umgebung entwickelt, die einen Grundstein für das heutige Dymola bildet.

Die Arbeiten von Elmqvist et al. [4] stellen eine Kopplung zwischen dem CAD-Werkzeug CATIA und Modelica/Dymola vor. Dabei werden in CATIA aufgebaute Mehrkörpersysteme inklusive dem bereits definierten physikalischen Verhalten automatisch nach Modelica exportiert. Dabei werden die in der CAD-Umgebung festgelegten Listen der Teile sowie deren Gelenken und Verbindungen ausgelesen und verwendet, um automatisch ein Modelica-Modell aufzubauen. Die Autoren zeigen abschließend, dass auch die Ausführung des Modells in Dymola möglich ist.

Baumgartner und Pfeiffer [5] schlagen vor, sowohl Geometrien als auch Verhalten aus der CAD-Umgebung automatisch in Modelica/Dymola zu erzeugen. Darüber hinaus stellen die Autoren eine bidirektionale Kopplung von CATIA und Dymola vor, so dass die Simulation in 3DEXperience/CATIA visualisiert werden kann.

Die in den zitierten Arbeiten entwickelten Methoden werden im vorliegenden Artikel dahingehend erweitert, dass die Geometrien und ihre bereits definierten Zwangsbedingungen auf die Werkzeugkombination Siemens NX zu Modelica/Dymola übertragen werden und dort automatisch ein Verhaltensmodell erzeugt wird. Dabei wird mit nativen NX-Modellen gearbeitet, um weitere Konvertierungsarbeiten und damit einhergehende Daten- und Informationsverluste zu vermeiden. Im Unterschied zu den oben zitierten Methoden zielt dieses Projekt darauf ab, eine echtzeitfähige Kopplung zwischen physikalischer Simulation am Roboter sowie der Visualisierung zu ermöglichen.

3 Vorgehen

Ein Mehrkörpermodell im Sinne des vorliegenden Artikels besteht zum einen aus sogenannten Motion Bodies, d.h. durch Schwerpunktslage, Gesamtmasse und

Massenträgheitsmomente charakterisierten starren Körpern, zum anderen aus kinematischen Gelenken, die die Bewegung der Motion Bodies je nach Zwangsbedingung mehr oder weniger stark einschränken. Im Rahmen des vorliegenden Forschungsprojektes dient ein erweitertes Viereck als einfaches Anwendungsbeispiel für ein Mehrkörpermodell (Bild 1). Das Viereck besteht aus vier starren Balken, die durch vier parallele Drehgelenke miteinander verbunden sind. Die Gelenke A und B sind in dem Mehrkörpermodell ortsfest angelegt. Über einen weiteren Balken ist eines der Drehgelenke an ein ortsfestes Schubgelenk gekoppelt, gekennzeichnet als Slider im Bild 1. Aufgrund der Zwangsbedingungen besitzt das Modell nur einen Freiheitsgrad der Bewegung. Die so entstehende Bewegung dient als Anwendungsbeispiel für die Automatisierung.

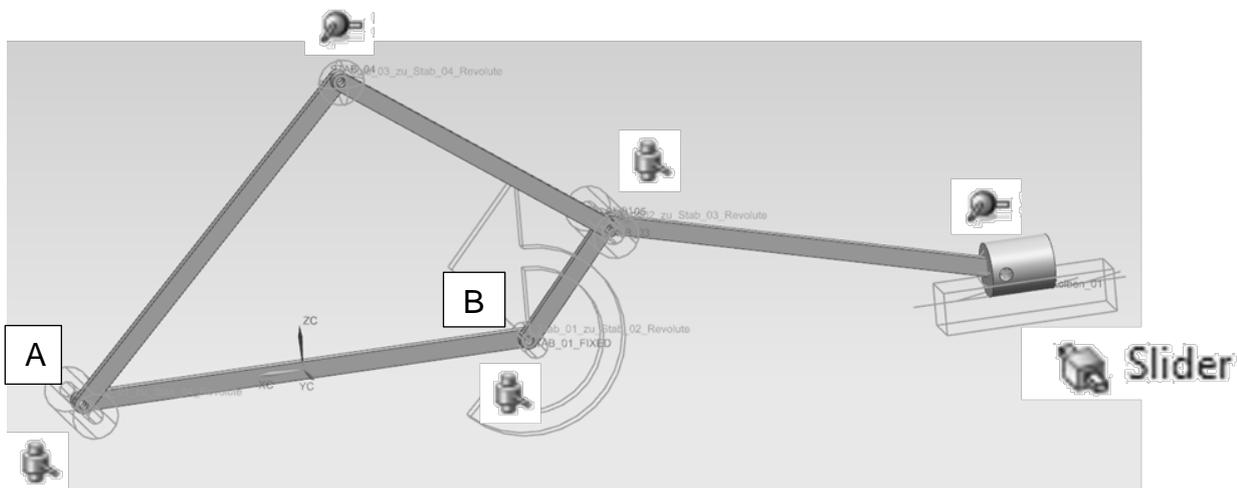


Bild 1: Aufbau eines Vierecks mit einem Freiheitsgrad in NX Motion

Das Vorgehen, um aus dem parametrisierten Mehrkörpermodell in NX Motion ein in Dymola simulierbares und in Unity visualisierbares Modell zu erzeugen, ist in den folgenden Unterabschnitten beschrieben. Zunächst wird das Mehrkörpermodell ins MDEF-Format exportiert (Abschnitt 3.1), aus dem anschließend automatisch ein Modelica-Modell generiert wird (3.2). Nach dem Export der Geometrie ins OBJ-Format (3.3) stehen alle zur Co-Simulation von Unity und Dymola (3.4) benötigten Daten zur Verfügung. Bild 2 veranschaulicht die verwendeten Werkzeuge sowie die Formate und Richtungen des Datenaustauschs.

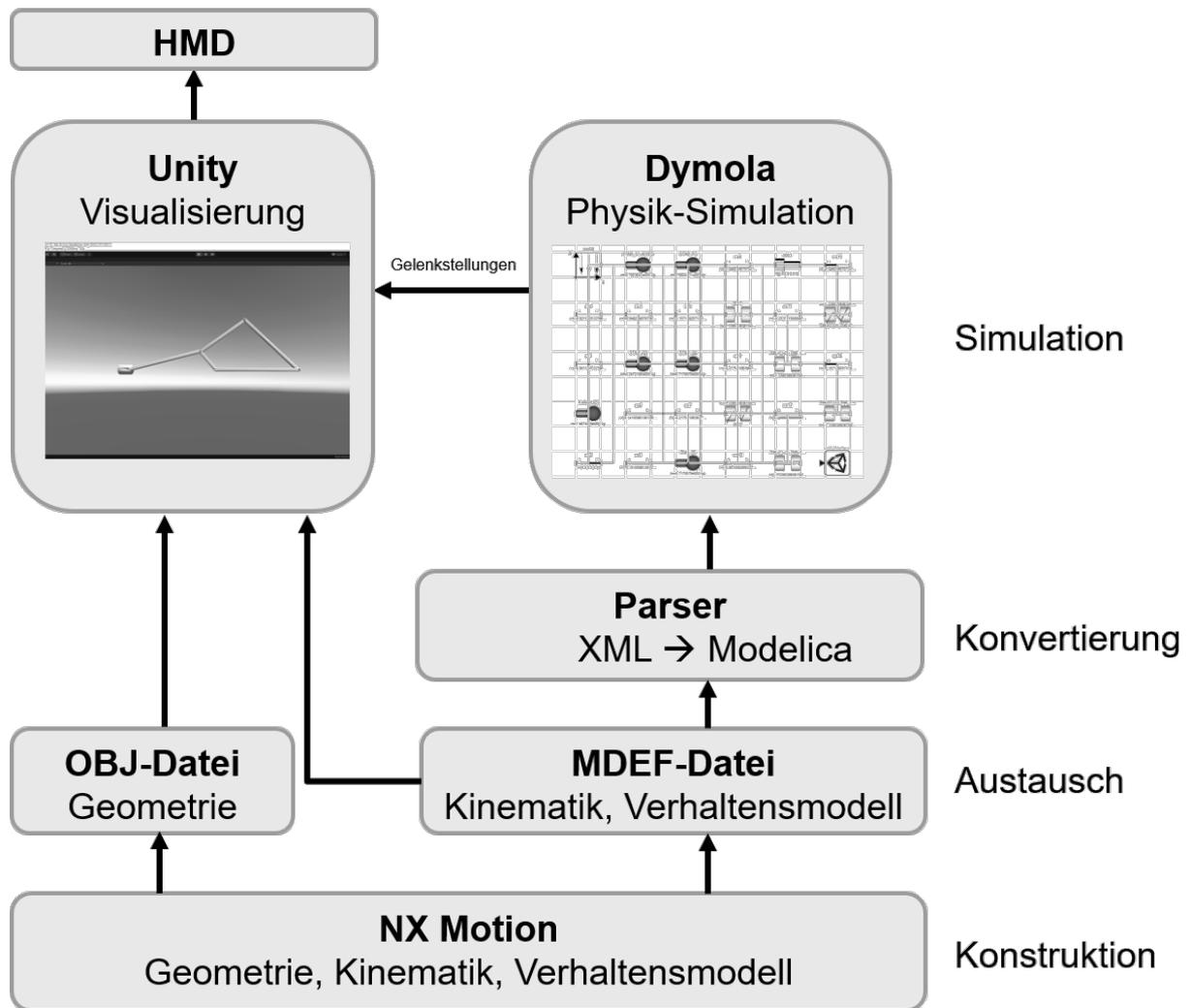


Bild 2: Zusammenspiel der Werkzeuge und Dateiformate

3.1 Export ins MDEF-Format

Zunächst wird das Mehrkörpermodell aus NX Motion ins MDEF-Format exportiert. Dieses enthält in XML-Form alle zuvor festgelegten geometrischen, kinematischen und physikalischen Parameter. Tabelle 1 führt die Parameter für die drei Klassen mechanischer Komponenten auf. Ist die Kraft der Feder (oder des Dämpfers) in NX Motion nur in Form einer Kennlinie bekannt, so wird anstelle der Federkonstante (Dämpfungskonstante) der Pfad zur Textdatei mit der Kennlinie hinterlegt.

3.2 Modelica-Modellerstellung aus MDEF-Datei

Tabelle 1: Komponenten eines mechanischen Mehrkörpermodells und zugehörige Parameter, die im MDEF-Format abgelegt werden

Mechanische Komponente	Parameter
Starre Körper	Position Ursprung Position Schwerpunkt Gesamtmasse Massenträgheitstensor Pfad zur Geometriedatei
Gelenke	Position Ursprung Typ (Drehgelenk, Schubgelenk, Kugelgelenk usw.) Zahl der Freiheitsgrade Verbundene starre Körper
Federn, Dämpfer	Ruhelänge Einbaulänge Verbundene starre Körper Federkonstante, Dämpfungskonstante

Tabelle 1 zeigt, dass das MDEF-Format alle relevanten Informationen, die für eine automatische Modelica-Modellerstellung erforderlich sind, bereitstellt. Für die Konvertierung nach Modelica durchläuft ein Parser die MDEF-Datei und erzeugt aus den NX-Objekten Modelica-Objekte mit den entsprechenden Massen, Trägheitstensoren, Gelenken, Federn usw. Anschließend werden die Modelica-Objekte analog zur Objektstruktur in NX automatisch miteinander verbunden. Für solche NX-Objekte, die kein direktes Gegenstück in der Modelica Standard Library besitzen, wie beispielsweise Federn mit Kennlinie in Textform und Gelenke mit Winkel- oder Hubbeschränkung, wurden parametrisierbare Modelica-Modelle erstellt und in einem eigenen Modelica-Package abgelegt. Um diese Modelle im aus der MDEF-Datei erzeugten Modell nutzen zu können, wird beim Parsen zusätzlich ein Modelica-Skript erzeugt, welches das Hilfspackage in Dymola lädt. Dieses Vorgehen bietet für eine Industrialisierung das Potential, auch individuelles Produktverhalten abzubilden.

Damit die Unity-Visualisierung zu jedem Zeitpunkt den richtigen Systemzustand anzeigt, müssen die aktuellen Gelenkstellungen zur Laufzeit der Dymola-Simulation nach außen

übertragen werden (Bild 2, oberer Bildausschnitt). Dies wird durch einen UDP-Server erreicht, der Funktionen aus der offenen Modelica-Interface-Bibliothek `Modelica_DeviceDrivers` [5] verwendet und unter dem Namen „UnityInterface“ ebenfalls im Hilfspackage abgelegt ist. Dieses wird zum Abschluss des Parsens automatisch in das Modelica-Modell eingefügt und so parametrisiert, dass die Gelenkstellungen in festen Zeitintervallen von 10 ms versendet werden.

Das auf die oben beschriebene Weise erzeugte Modelica-Modell des erweiterten Viergelenks ist in Bild 3 dargestellt.

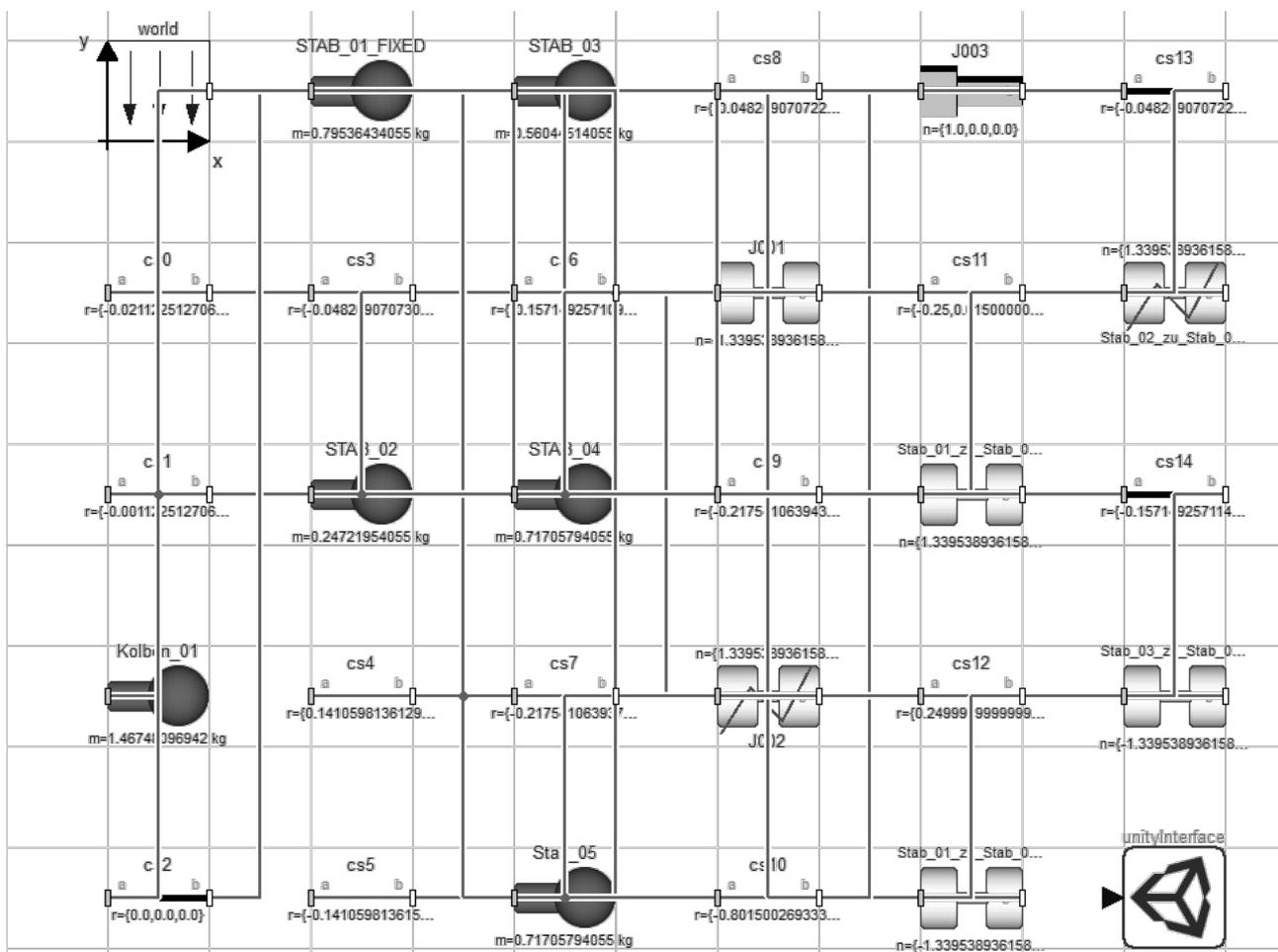


Bild 3: Ansicht eines automatisch erstellten Modelica-Modells des erweiterten Viergelenks in Dymola. Über den in das Modell `UnityInterface` (rechts unten) integrierten UDP-Server werden die Gelenkwinkel während der Simulation an Unity gesendet.

3.3 Geometrieexport

Für die Visualisierung des Mehrkörpermodells müssen die Geometrien der Körper und die kinematischen Zwangsbedingungen in Unity importiert werden. Da die Geometriedaten

beim MDEF-Export im mit Unity inkompatiblen, proprietären Format PRT abgelegt werden, ist die Verwendung eines offenen, von Unity unterstützten Austauschformats erforderlich (z.B. STL, OBJ, GLB/GLTF). Für die vorliegende Methode wurde das Wavefront-OBJ-Format (Bild 2, links) gewählt, da es einfach zu parsen ist, Materialien und mehrere Objekte unterstützt (im Gegensatz zu STL) und sich direkt aus NX Motion exportieren lässt (im Gegensatz zu GLB/GLTF). Beim Export benennt NX Motion die einzelnen Geometrieobjekte in der OBJ-Datei gemäß ihrer Position in der Baugruppenstruktur (Bsp.: A > B > C wird zu A B C), sodass sich letztere beim Import in Unity einfach rekonstruieren lässt.

3.4 Co-Simulation von Unity und Dymola

Mit dem Modelica-Modell (Dynamik), der MDEF-Datei (Kinematik) und der OBJ-Datei (Geometrie) stehen alle zur Co-Simulation benötigten Daten zur Verfügung.

Das Modelica-Modell kann in Dymola direkt ausgeführt werden. In Unity wird beim Ausführen des Projekts zunächst die MDEF-Datei per Dialog ausgewählt. Aus dieser generiert ein Parser die Kinematik des Mehrkörpermodells als Unity-Szenegraph. Die Geometrien der einzelnen Objekte werden dabei (statt aus den in der MDEF-Datei verlinkten PRT-Dateien) aus einer einzelnen OBJ-Datei geladen, deren Name dem der MDEF-Datei entspricht und die in einem festen Unterverzeichnis abgelegt ist. Zum Abschluss des Imports verknüpft Unity die Gelenkstellungen mit einem UDP-Client, der sein Empfangsformat automatisch auf die Zahl der verwendeten Gelenke einstellt.

Die Betrachtung der dynamisch bewegten Geometrie kann am Monitor oder in der Virtuellen Realität per HMD erfolgen. Im weiteren Verlauf des Projektes wird ein SHP Device aufgebaut. Dieses ermöglicht es, die reine Visualisierung über ein HMD zu auszugeben, und zeitgleich die relevanten Kräfte und Momente durch einen Roboter darzustellen. Somit kann die Erprobung des Designs ohne physischen Prototypen frühzeitig erfolgen.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Die vorgestellte Methode ermöglicht die automatisierte Übertragung von geometrischen, kinematischen und physikalischen Verhaltensmodellen aus der CAx-Umgebung von Siemens NX nach Modelica und Unity. Aufgrund der verwendeten Mehrkörpersimulation als Ausgangsbasis werden flexible Bauteile natürlicherweise nicht berücksichtigt. Der

kinematisch-physikalische Übertrag aus NX Motion in Modelica-Modelle bedarf methodischer Vorgaben. Nicht jede Bedingung, die in NX Motion etwa an Gelenke gestellt werden kann, hat in der Modelica-Sprache ein Pendant. Weiterhin bestehen in dem erstellten Skript Lücken dadurch, dass bestimmte kinematische Schleifen nicht korrekt erfasst werden.

Die hier gezeigten Mechanismen bestätigen das grundsätzliche Vorgehen der Arbeiten von 2, 3 und 4. Weiterer Handlungsbedarf ergibt sich für die Übertragung aus 3DExperience/CATIA, um ein industriell adaptives Verfahren bereitzustellen.

Die Verwendung der vorgestellten Automatisierung intendiert den Einsatz der SHP-Technologie in frühen Entwicklungsphasen. Besonders relevant erscheint die frühe Erprobung des Produktverhaltens für Consumer Produkte, die in hohen Stückzahlen produziert werden und deren Verhalten somit vor Beginn der Produktion genau feststehen muss. Die im Rahmen der Forschung anvisierten nächsten Schritte sind somit die Anbindung an einen Industrieroboter sowie eine Erhebung der praktischen Verwendbarkeit der kompletten Technologiekette.

Danksagung

Wir danken dem Bundesministerium für Bildung und Forschung für die Unterstützung, die uns im Rahmen des Programms „KMU-innovativ“ für das Projekt ROBVRAR zur Verfügung gestellt wird.

Literatur

- [1] Auricht, Maik; Beckmann-Dobrev, Boris; Stark, Rainer: Frühzeitige multimodale Absicherung virtueller Prototypen; Evaluation am Beispiel einer PKW-Heckklappe. In ZWF: Zeitschrift für den wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, Band 107, Ausgabe 5, 2012. <https://doi.org/10.3139/104.110757>
- [2] Stark, Rainer; Beckmann-Dobrev, Boris; Schulze, Ernst- Eckart; Adenauer, Julian; Israel, Johann Habakuk (2009). Smart hybrid prototyping zur multimodalen Erlebbarkeit virtueller Prototypen innerhalb der Produktentstehung. Proceedings 8. Berliner Werkstatt Mensch-Maschine-Systeme (Vol. 8, pp. 437-443).
- [3] Engelson, Vadim; Bunus, Peter; Popescu, Lucian; Firtzson, Peter: Mechanical CAD with Multibody Dynamic Analysis Based on Modelica Simulation. Proceedings of the 44th Scandinavian Conference on Simulation and Modeling. 2003.
- [4] Elmqvist, Hilding; Mattson, Sven Erik; Chapuis, Christoph: Redundancies in Multibody Systems and Automatic Coupling of CATIA and Modelica. In: Proceedings 7th Modelica Conference, 2009
- [5] Baumgartner, Daniel; Pfeiffer, Andreas: Automated Modelica Package Generation of Parameterized Multibody Systems in CATIA, 2014, DOI: 10.3384/ecp14096913
- [6] Thiele, Bernhard; Beutlich, Thomas; Waurich, Volker; Sjölund, Martin; Bellmann, Tobias: Towards a Standard-Conform, Platform-Generic, and Feature-Rich Modelica Device Drivers Library. In Proceedings of the 12th International Modelica Conference, Prague, Czech Republic, May 15-17, 2017 (No. 132, pp. 713-723). Linköping University Electronic Press.

Reduktion der Berechnungskomplexität zusammengesetzter Produkte durch physikgetriebene Modellbildung

Hans-Peter Prüfer

Ruhr-Universität Bochum, im Ruhestand

Email: hans-peter.pruefer@rub.de

Inhalt: Die FEM ist der Goldstandard zur Analyse des physikalischen Bauteilverhaltens. Trotz der großen Leistungsfähigkeit der heutigen Hard- und Software gelangt man bei aufwendigen nichtlinearen Berechnungen an großen Modellen in Bereiche, die Modellvereinfachungen sinnvoll erscheinen lassen. Diese orientieren sich jedoch meist an der geometrischen Komplexität der Modelle. In diesem Beitrag wird das Grundkonzept einer Vereinfachungsstrategie vorgestellt, das auf der Funktion von Bauteilen und Komponenten beruht. Als Pilotanwendung werden Schraubenverbindungen betrachtet, die sich gut identifizieren und in einfachere FE-Modelle umsetzen lassen. Ein besonderer Effekt der vorgeschlagenen Methode besteht darin, dass gleichartige Verbindungen auch gleichartig modelliert werden, woraus sich eine Modellstandardisierung ergibt, die die Reproduzierbarkeit der Analyse erhöht.

Stichwörter: FEM, Modellvereinfachung, Standardisierung, Rechenzeiterparnis

Reduction of Computational Complexity of Multi-Part Assemblies by Physics Driven Modelling

Abstract: FEM has evolved to be the gold standard of computing the physical behaviour of technical products. Although today's models may be arbitrarily detailed, there is a need of simplification remaining, if complex nonlinear analyses are required. Traditionally this is achieved by reducing the geometric complexity regardless of the physical meaning of the details. We present an automated simplification technique based on functional properties. This is shown on bolted joints being an extremely frequent component. As special advantage we get a standardized modelling of same parts thus improving the reproducibility of FEM results.

Keywords: FEM, simplified models, standardization, reduced computing requirements

1 Ausgangspunkt und Motivation

Die Analyse des physikalischen Verhaltens technischer Produkte erfolgt heute zumeist mittels der Methode der Finiten Elemente (FEM). Sie ist so weit etabliert, dass ein geschulter Anwender zuverlässige und im Wesentlichen reproduzierbare Ergebnisse erhält. Infolge der ständig steigenden Leistungsfähigkeit der Arbeitsplatzrechner nimmt die Größe der analysierbaren Modelle ebenfalls zu, bis hin zu umfangreichen Assemblies aus einer Vielzahl von Baugruppen und Bauteilen. Dabei begegnet man dem Phänomen, dass eine

Basisstruktur Details enthalten kann, deren Geometrie sich um eine oder mehrere Größenordnungen von der Basisstruktur unterscheidet. Ebenfalls häufig begegnet man einer großen Anzahl von Gleichteilen, beispielsweise Schraubenverbindungen. Die automatisierte Vernetzung derartiger Gesamtstrukturen ist geometriebezogen und liefert daher sehr unterschiedliche Elementgrößen in einem Modell, die numerisch eher ungünstig sind. Das gleichfalls geometriebezogene *defeaturing* ist hier nicht zielführend, weil es die physikalischen Eigenschaften der Parts außer Acht lässt. Eine zweckmäßige Modellvereinfachung sollte sich stets an der Funktion der Parts orientieren (und weniger an der Geometrie). Eine Lösung dieses Problems ist denkbar, wenn man berücksichtigt, dass kleinteilige Parts/Features häufig den Maschinenelementen entsprechen, deren Funktion und Verhalten bekannt ist.

2 Einige Beispiele aus alter und neuer Zeit

Modellvereinfachungen im Sinne einer Rechenzeiterparnis sind ein bekanntes Prinzip der FE-Modellierung. Als beinahe klassisch sind die Balkenmodelle aus der Frühzeit der FEM anzusehen. Demgegenüber wird heute üblicherweise jede Struktur in Volumenelemente zerlegt, was zwar gewiss detailliertere lokale Ergebnisse liefert, aber den Berechnungsaufwand stark ansteigen lässt. Ein Beispiel aus diesem Bereich wird in [1] gezeigt. Hier wird die Korrespondenz zwischen einem Balken- und einem Volumenmodell beschrieben, mit deren Hilfe eine drastische Rechenzeiterparnis dank der Modelleinfachheit erreichbar ist. Der Aufwand für eine solche Individuallösung ist allerdings beträchtlich. Als etwas einfacher handhabbar haben sich die Modalansätze erwiesen, bei denen das mechanische Verhalten einer Teilstruktur auf die Verlagerungen von Kopplungsknoten reduziert wird. Diese Vorgehensweise ist jedoch nur bei linearem Verhalten möglich, zudem erfordert sie die intelligente Festlegung von Anzahl und Ort der Kopplungsknoten [2].

Eine Vereinfachung der Modellbildung ist mittels vorgefertigter Vernetzungen von bekannten Bauteilklassen möglich. Erwähnt sei dazu GM BoltStudio [3], durch dessen Anwendung vollständig reproduzierbare, in das Gesamtmodell einbaubare Komponentennetze für Schraubenverbindungen erzeugt werden. Ein ähnliches Konzept wird von Centaur [4] im Sinne der Weiterverwendung mehrfach nutzbarer Teilnetze verfolgt. Dabei sind diese Teilnetze durchaus an CAD-Geometrien gebunden, beispielsweise vermittelt durch Parts. Ein allgemeinerer Ansatz zur reproduzierbaren Vernetzung von

Normteilen wurde im Projekt ParaFEM [5] entworfen. Diese Konzepte führen jedoch nicht notwendig zu einer Vereinfachung des Gesamtmodells, da die Teilmodelle nach wie vor geometriebezogen vernetzt werden.

3 Umsetzungshemmnisse und Ideen zu ihrer Überwindung

Alle bisher vorgestellten Überlegungen sind prinzipiell auf Einzelfälle bezogen; die einzige Ausnahme bildet hier das Centaur-Konzept. Auch BoltStudio muss individuell für jede interessierende Schraubenverbindung aufgerufen werden. Gerade beim Vorliegen einer großen Anzahl von Gleichteilen fehlt ein Automatismus, der dem Designer die manuelle Auswahlarbeit ersparen könnte.

Daraus ergibt sich gleichzeitig eine Wirtschaftlichkeitsüberlegung. Zwar könnte man bei rechenzeitintensiven, insbesondere nichtlinearen Analysen durch eine geeignete Vereinfachung Rechnerressourcen einsparen – das betrifft sowohl die reine Zeitersparnis als auch ggf. eine ressourcenbezogene Lizenzierung – dem steht jedoch der erforderliche Aufwand an Ingenieursarbeit gegenüber, der zusätzliche Arbeits-/Personalkosten verursacht. Statt hier eine weitere, natürlich ebenfalls kostentreibende Wertanalyse in Betracht zu ziehen, wird man in einem industriellen Umfeld auf solche Vereinfachungsideen eher verzichten.

Zu guter Letzt bleibt der möglicherweise bedeutendste Hinderungsfaktor: Gerade eine physikalisch motivierte Vereinfachung, beispielsweise im Sinne des Ersatzes von volumenartigen Strukturen durch balkenartige, setzt profunde Kenntnisse der Mechanik voraus. Es wäre eine unzulässige Verallgemeinerung, diese der Ingenieursgilde pauschal abzusprechen, man wird aber ebenso wenig daran zweifeln können, dass die erforderlichen Kenntnisse eher Spezialisten vorbehalten sind. Im Gegensatz zur Anfangszeit der FEM, als Strukturanalysen noch einem kleinen Kreis von Eingeweihten überlassen blieben, verfügen wir heute über ein allgemein einsetzbares Werkzeug, dessen Nutzung deutlich vereinfacht worden ist.

Unsere Überlegungen, darin über das ParaFEM-Konzept hinausgehend, basieren auf der Idee der physikalisch orientierten Modellvereinfachung. Dafür kommen nur Komponenten in Frage, deren Verhalten a priori bekannt ist. Erfolgversprechende Kandidaten sind die bekannten Maschinenelemente und Normteile. Für diese beiden teilweise überlappenden Klassen sind sowohl die Geometrien als auch die Berechnungsvorschriften wohlbekannt.

4 Die Schraubenverbindung als Pilotanwendung

Man kann annehmen, dass Schrauben und Muttern zu den am häufigsten verwendeten Maschinenelementen gehören. Als Anwendungsfall sind sie für uns besonders interessant, weil sie um mindestens eine Größenordnung geringere Abmessungen haben als ihre Umgebung, als Verbindungselemente gruppenweise zu finden sind, beispielsweise bei Flanschen, und weil ihr eigenes Verhalten bis auf die Eigenschaft der Verbindung nicht unbedingt im Detail betrachtet werden muss.

Das Beispiel des Flanschs zeigt dies sehr deutlich. Für die Bestimmung von Bruchlagen in einem Rohrleitungssystem haben die detaillierten mechanischen Eigenschaften der Schrauben wenig Bedeutung, ebenso wenig bei der Berechnung von Ausdehnungen im Sinne einer thermomechanischen Analyse. Selbst für eine Untersuchung an Flachdichtungen zwischen Flanschen ist die Dehnung des Schraubenschafts hinreichend, um die Pressung zu bestimmen.

Schrauben und Muttern, insgesamt also Schraubenverbindungen, sind genormt. Sie lassen sich als vorgefertigte Parts in ein CAD-Assembly einfügen, und sie sind anhand ihrer normgerechten Bezeichnung geometrisch eindeutig beschrieben. Die Kontaktflächen von Schraubenköpfen und Muttern kann man aus den genormten Abmessungen erschließen, sofern man die Positionierung kennt.

Das mechanische Verhalten von Schraubenverbindungen ist natürlich ebenfalls bekannt. Man hat das Schraubendiagramm, und hinsichtlich weiterer Dehnungen/Biegungen kann man auf den klassischen Balken als Ersatz zurückgreifen. Benötigt man tatsächlich Informationen über den Kontakt zwischen Schraubenkopf und korrespondierender Funktionsfläche, so kann man ebenso vereinfachte Geometrien nutzen. Mit anderen Worten: Schraubenverbindungen sind ein idealer Kandidat für physikalisch motivierte Modellierungsvarianten.

Zu guter Letzt sei insbesondere auf die Häufigkeit von Schraubenverbindungen hingewiesen. Gerade deshalb *lohnt* sich der Automatisierungsprozess, der ja ansonsten ebenfalls zeitaufwendig vorbereitet werden muss.

5 Die automatisierte Aufbereitung

Für unser Ziel einer Automatisierung ist die Frage zu beantworten, an welcher Stelle des Designprozesses sie stattfinden soll. Aus konstruktiven Gründen bleibt hier ausschließlich

das CAD-Modell übrig, das an den Prozess der FE-Modellierung übergeben wird. Den Fall eines in CAD integrierten FEM-Moduls wollen wir außer Acht lassen, da sich unsere vorgesehene Modellvereinfachung nur bei sehr hohen Ansprüchen an die Qualität der Analyse lohnt, für die man gerne auf ein externes Programm zurückgreift. Dafür wird in der Regel das CAD-Modell als neutrales Format exportiert; das ist meistens STEP.

Der STEP-Export von Assemblies enthält normalerweise die Information über die beteiligten Parts. Diese Struktur ist über wenigstens eine Hierarchiestufe analysierbar. Der erste Schritt besteht also darin, alle Schraubenverbindungen zu identifizieren. Einen ersten Vorschlag dazu kann man in [6] nachlesen. Der dort dargestellte Ansatz war zwar grundsätzlich möglich, hat sich allerdings als unzuverlässig erwiesen.

Im Rahmen einer Neukonzeption werden nunmehr alle Schrauben und Muttern als benannte Parts aus der STEP-Datei extrahiert. Die erste Identifikation erfolgt anhand der Partbezeichnung, die idealerweise weitgehend der Normbezeichnung entsprechen sollte. Nutzt man als Preprocessor SalomeMeca [7], so kann man zu jedem Part die Schwerpunktskoordinaten und die Trägheitsmomente bestimmen, die Informationen zur Lage der Parts im Raum liefern. Wir gehen davon aus, dass ähnliche Möglichkeiten in allen interessierenden Preprozessoren vorhanden sind.

Die zu einer Schraube korrespondierende Mutter findet man, indem man die Distanz der Schwerpunkte der Muttern mit dem passenden Gewinde zum Schwerpunkt der Schraube bestimmt. Die Mutter mit dem geringsten Schwerpunktabstand ist die gesuchte Kandidatin! Da Schrauben- und Mutternschwerpunkt normalerweise nicht zusammenfallen, kann man die Gerade durch die beiden Punkte als Information über die Ausrichtung der Verbindung im Raum verstehen, und man muss dann nicht mehr auf einen Vergleich der Trägheitshauptachsen von Schrauben und Muttern zurückgreifen, der arithmetisch nicht besonders stabil ist.

Der algorithmische Aufwand dieser Vorgehensweise ist überschaubar. Nehmen wir dazu an, wir hätten n Schrauben und Muttern zu einer Gewindeabmessung gefunden. Für das Matching der ersten Schraube benötigen wir die Betrachtung von n Muttern. Für jede weitere Kombination reduziert sich die Anzahl der verfügbaren Schrauben und Muttern um jeweils 1. Nach der bekannten Gaußschen Summenformel ergeben sich daraus insgesamt $n(n+1)/2 - 1$ Vergleiche. Die Komplexität ist also polynomial und daher unkritisch.

Für die weitere Aufbereitung wird eine rudimentäre Datenbank mit den Abmessungen von Schrauben und Muttern benötigt. Der Eintrag für eine Sechskantmutter DIN 6915 enthält die

Bezeichnung, die Schlüsselweite und die Dicke der Mutter. Damit ist sie für unsere Zwecke hinreichend beschrieben. Der Schwerpunkt einer solchen Mutter liegt aus Symmetriegründen auf der Mittelachse in Höhe der halben Dicke. Für die Schrauben – hier beispielhaft DIN 601 – benötigen wir außer der obligatorischen Bezeichnung die Kopfhöhe und die Schlüsselweite. Gesamtlänge und Durchmesser sind bereits in der Bezeichnung enthalten. Zusätzlich muss die Schwerpunktlage explizit angegeben werden, da ihre Berechnung insbesondere vom Detaillierungsgrad des beispielsweise als STEP-Datei importierten Parts abhängt. Dieser Schritt ist lästig, muss allerdings für jeden verwendeten Schraubentyp nur einmal im Ziel(preprocessor)system vorgenommen werden.

6 Die Erzeugung der Partialmodelle

Die Identifikation von zusammengehörenden Schrauben und Muttern liefert Schraubenverbindungen. Diese sind Funktionselemente mit physikalischen Eigenschaften, die wir im Folgenden automatisiert weiterverarbeiten wollen. Die trivialste Form dieser Verarbeitung besteht aus der Erzeugung einer generischen Vernetzung, deren Feinheit vorgebar ist. Sie entspricht weitgehend der Vorgehensweise in BoltStudio oder auch in ParaFEM.

Interessanter sind Modelle, bei denen die Verbindung weiter vereinfacht wird. So kann man die Geometrie der Verbindung auf einen Verbund von drei Zylindern reduzieren, von denen zwei den Schraubenkopf und die Mutter repräsentieren, der dritte den Schraubenschaft, der im übrigen an der Mutter bündig abschließen kann, da der überstehende Teil zumindest strukturmechanisch keinen signifikanten Einfluss haben dürfte. Mit diesem Modell kann sowohl die Dehnung/Biegung des Schraubenschafts beschrieben werden als auch der Kontakt an den Auflageflächen von Kopf und Mutter, die beide grundsätzlich vorhanden sind.

Das oben gewählte Modell der Schraubenverbindung hat einen praktischen Vorzug. Für die Analyse kann man von Rotationssymmetrie ausgehen, was den Vorteil der einfacheren Orientierung im Raum bietet: Zur Ausrichtung wird nur die Längsachse benötigt, die wir aus den erwähnten Schwerpunkten von Schraube und Mutter sofort ableiten können.

Zur Erzeugung eines Volumennetzes bietet sich die Software gmsh [8] an. Die Geometrie kann parametrisch mittels einer Skriptsprache erstellt werden, ebenso lässt sich im Batchmodus daraus ein Netz erzeugen. Das Skript `20x5400.geo` zur Erzeugung einer

generischen Vernetzung der vereinfachten Schraubenverbindung M16, Klemmlänge 54mm, in Standardlage, mit *gms* hat die folgende Form:

```
SetFactory("OpenCASCADE");
Mesh.CharacteristicLengthMin = 10;
Mesh.CharacteristicLengthMax = 16;
Cylinder(1) = {0, 0, 0, 0, 0, 10, 13.44, 2*Pi};
Cylinder(2) = {0, 0, -47, 0, 0, 47, 8, 2*Pi};
Cylinder(3) = {0, 0, -60, 0, 0, 13, 13.44, 2*Pi};
BooleanUnion(4) = { Volume{1}; Delete; }{ Volume{2}; Delete; };
BooleanUnion(1) = { Volume{3}; Delete; }{ Volume{4}; Delete; };
```

Die Klemmlänge wird aus den Schwerpunktlagen von Schraube und Mutter abgeleitet. Als Durchmesser der Ersatzzylinder für die Sechskante wurde die Schlüsselweite mit dem Faktor 1.18 multipliziert (Mittelwert Außen-/Innendurchmesser).

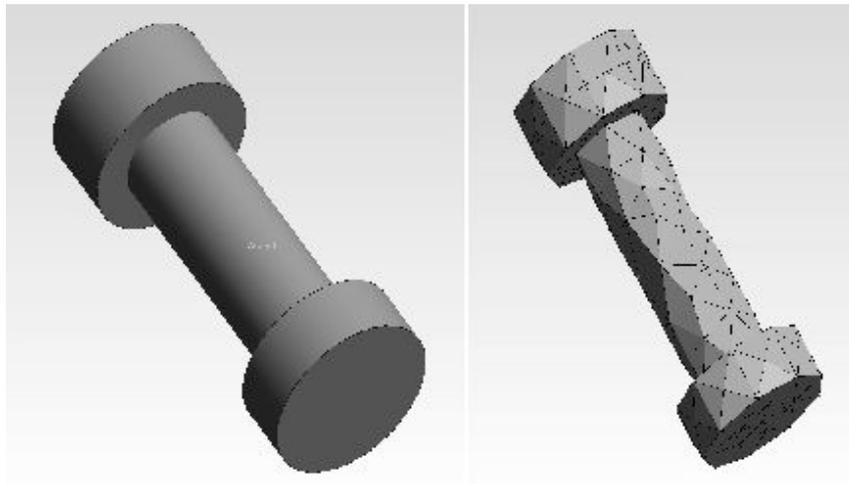


Bild 1: Zylindermodell und seine generische Vernetzung

Eine drastischere Vereinfachung ist der Ersatz des Schraubenschafts durch eine balkenartige Struktur, wobei die Anbindung an die Umgebung mittels des üblichen Balkensterns erfolgen kann. Mit einem solchen Modell kann man immer noch die Dehnung und die Biegung für den Schaft bestimmen, die Kontaktanalyse ist jedoch nicht mehr möglich. Eine derartige Struktur benötigt keinen Netzgenerator im eigentlichen Sinn. Wählt man für die Balkensterne jeweils sechs Strahlen, so genügen zweimal sieben Knoten, die jeweils komplanar und regelmäßig angeordnet sind. Auch diese Form der Elementierung lässt sich mit wenigen Codezeilen als Textdatei erstellen.

Die separate Erzeugung der Partialmodelle bietet einen besonderen Vorteil. Sie ist für den Anwender transparent, und er hat keine Einflussmöglichkeiten. Daraus folgt, dass z.B. alle Verbindungen mit der gleichen Geometrie gleichartig modelliert werden. Die bei der Benutzung globaler Vernetzungsstrategien oft anzutreffenden Unterschiede der Netze ansonsten gleicher Bauteile sind damit ausgeschlossen: Man erhält eine *de facto*-Standardisierung der Berechnung und ihrer Ergebnisse.

7 Die Integration von Partialmodellen in das Gesamtsystem

Im vorausgegangenen Schritt wurden Partialmodelle erzeugt, die im Wesentlichen FEM-Netze sind. Sie müssen an den Stellen der Originalparts – die aus dem Geometriemodell des Produkts entfernt worden sind – eingesetzt werden. Die Positionierung ist dabei anhand der Schwerpunkte und der daraus abgeleiteten Geometrieinformationen einfach. Im ersten Schritt genügt es, für jedes partielle FEM-Modell die Knotenkoordinaten geeignet zu transformieren (dies unter der Annahme, dass für jeden Verbindungstyp ein generisches Modell in definierter Nulllage existiert).

Der zweite, aufwendigere Schritt ist die Verbindung der Teilnetze. Hierzu nehmen wir an, dass der Preprocessor dem heutigen Standard entsprechend physikalische Eigenschaften nicht mehr ausschließlich mit den typischen FEM-Objekten, also Knoten und Elementen assoziieren muss, sondern sich dazu auf geometrische Entities wie Linien, Flächen etc. beziehen kann. Mit diesen CAD-artigen Fähigkeiten lassen sich beispielsweise Interfaceflächen – Kontakt oder Tying – mittels Koordinaten- und Parallelitätsbeziehungen identifizieren. Auf diese Weise lässt sich ein zusammenhängendes FE-Modell erzeugen.

Betrachten wir dazu wieder eine einzelne Schraubenverbindung. Ihre Ausrichtung ist durch die Verbindungstrecke zwischen den Schwerpunkten von Schraube und Mutter eindeutig bestimmt. Der bekannte Abstand der Schwerpunkte von den Auflageflächen definiert die Lage von Normalenebenen auf der Schwerpunktverbindung; damit lassen sich alle Modellebenen bestimmen, die in der jeweiligen Normalenebene liegen. Die weitere Vorgehensweise hängt von den Solvereigenschaften ab und kann hier nicht weiter detailliert betrachtet werden.

8 Ein prototypisches Beispiel: Reaktorbehälter

Als Pilotbeispiel wollen wir einen – selbstverständlich fiktiven – Behälter betrachten. Wir bezeichnen ihn hier als Reaktor, um damit anzudeuten, dass eine thermomechanische Analyse mit Aufheiz- und Abkühlphasen vorgesehen sein soll, für die sich wegen der mehrfachen Analyseschritte eine Modellvereinfachung deutlich auf die Rechenzeit auswirken dürfte.

Der Behälter besteht aus einem zylindrischen Grundkörper, dessen Enden mit Flanschen versehen und mit Blindflanschen geschlossen werden. Zusätzlich gibt es einen schräg angebrachten Stutzen, der ebenfalls mit Flansch und Blindflansch versehen ist. Für die Flanschverschraubung werden genormte Schrauben und Muttern verwendet, die jeweils einmalig als Normteile mittels STEP importiert werden und anschließend hinreichend oft kopiert werden. Der auf diese Weise CAD-seitig erzeugte Reaktor wird als STEP-Datei exportiert und in Salome importiert. Dort ist er zunächst eine Gesamtgeometrie ohne weitere Struktur, die mit *explode* in ihre Geometriekomponenten zerlegt wird. Daraus entstehen die Volumina, aus denen das Gesamtmodell zusammengesetzt ist, die so genannten *Solids* (Bild 2).

Die einzelnen Normkomponenten können daher als *Solids* extrahiert werden; dabei behalten sie ihre Namen, die wir zur Identifizierung nutzen. Das setzt natürlich voraus, dass CAD-seitig eine sinnvolle Nomenklatur gewählt wurde; importierte Normteile haben allerdings in der Regel Benennungen, die sich an der normgemäßen Bezeichnung orientieren.

Alle *Solids* sind zunächst in einer salomeinternen Liste gespeichert, aus der wir eine für unsere Zwecke besser geeignete Datenstruktur ableiten, welche ausschließlich Normteile enthält, bestehend aus der Solidnummer, der Bezeichnung und den Schwerpunktskoordinaten. Diese Datenstruktur bildet die Grundlage für die Verbindungstabelle, in der die Zuordnung von Schrauben und Muttern gespeichert werden soll.

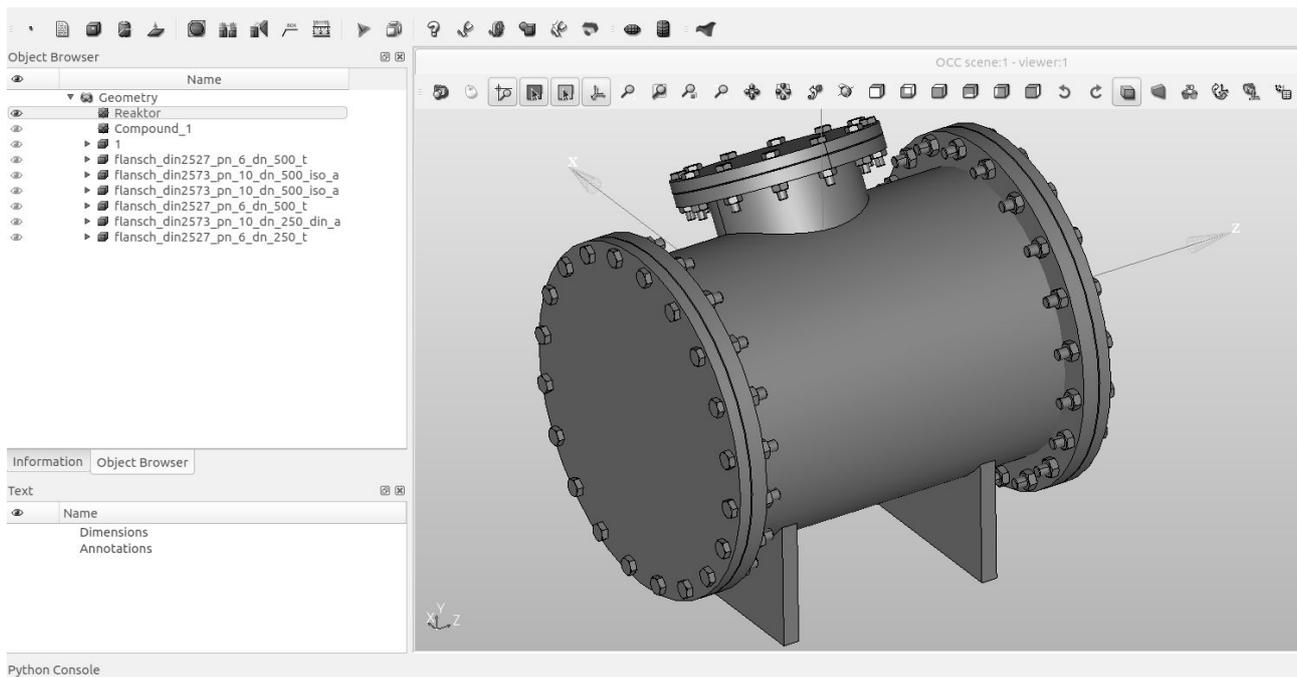


Bild 2: Reaktormodell vollständig mit Schraubenverbindungen

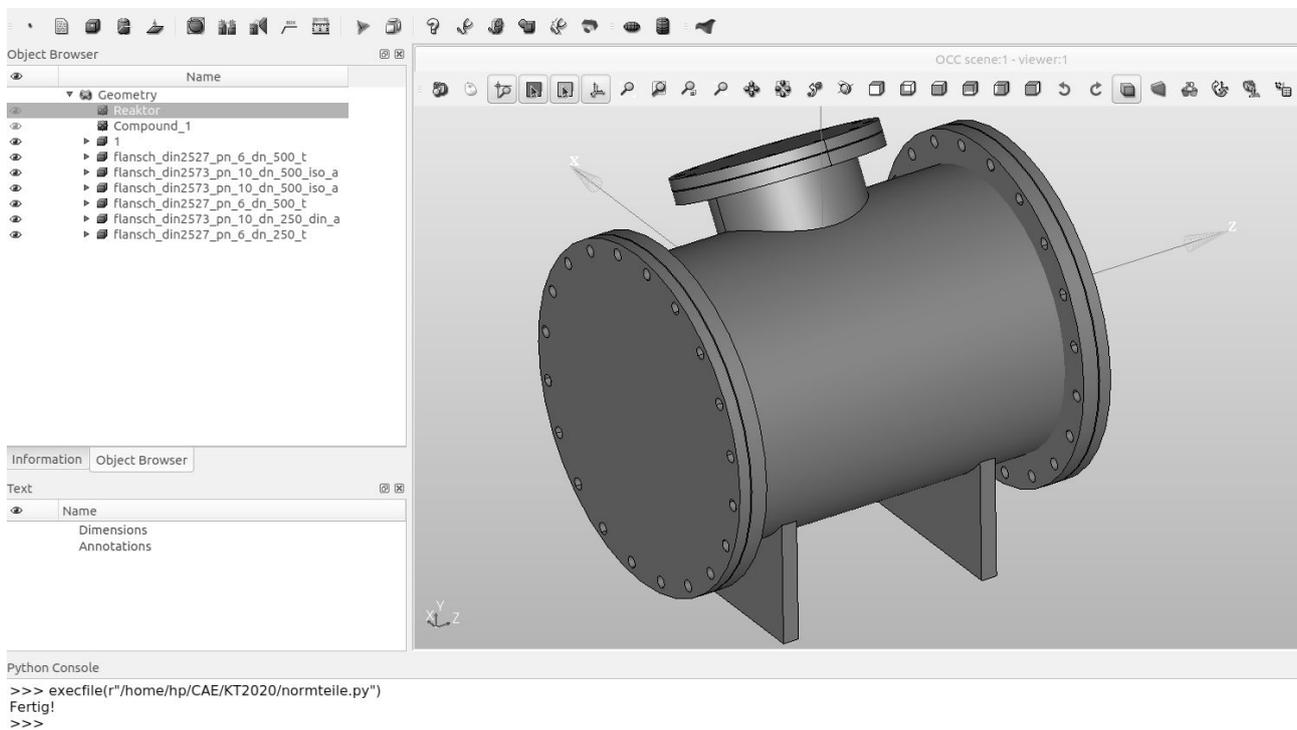


Bild 3: Reaktormodell, alle Schraubenverbindungen entfernt

Mit einem einfachen Pattermatching können wir nach Schrauben und Muttern sortieren, so dass anschließend der Zuordnungsprozess von Schrauben und Muttern anhand der

Schwerpunktabstände durchgeführt werden kann. Da wir die zugehörigen Solidnummern kennen, ist es einerseits möglich, eine *Verbindungsdatenstruktur* zu erzeugen und in eine Datei zu schreiben, andererseits können diese Teile aus der Geometrie entfernt werden (Bild 3). Die *Fehlstellen* müssen anschließend in einem weiteren Schritt durch die gewünschten Ersatzmodelle geschlossen werden. Dieser Vorgang hängt wieder sehr stark von den Eigenschaften des Preprozessors ab, der das endgültige Berechnungsmodell liefern soll, und wird daher hier noch nicht behandelt.

Aus diesem Grunde gibt es hier noch keine validen Aussagen zur tatsächlich erreichbaren Reduktion der Rechenzeit. Die Auswahl eines Preprocessors, der das *Mergen* einer *großen* Anzahl von Teilnetzen erlaubt, erweist sich als überraschend schwierig. Eine geringere Anzahl als etwa 10 Teilnetze ist mit noch erträglichem Aufwand ggf. manuell zu bewältigen; grundsätzlich lohnend wird die Modellreduktion aber erst ab einer Größenordnung von 100 Teilnetzen (für die Standardteile), da sonst der Wegfall von Knoten und Elementen nur wenig zur Rechenzeitreduktion beitragen dürfte. Insofern ist das vorgestellte Konzept zwar möglich und zumindest von der grundsätzlichen Modellbildung her machbar, die Validierung muss allerdings einem weiteren Beitrag vorbehalten bleiben, der sich vorwiegend mit der Programmierbarkeit von Preprozessoren befassen sollte. Inwieweit die Wunschfunktionalität mit Salome/gmsh erreichbar ist, muss angesichts der eher unüblichen Fragestellung mangels hinreichend ausführlicher Dokumentation noch offen bleiben, zumal gerade im Fall von Salome die Teilnetze erst während des daran anschließenden Analyselaufs mit CodeAster kombiniert werden können.

9 Ausblick?

Das Basiskonzept, das wir hier anhand von Schraubenverbindungen demonstriert haben, ist selbstverständlich erweiterbar. Ein unmittelbar einsichtiges Beispiel sind Wellen mit Lagern. Ähnlich wie im Fall des Reaktors ist man oft nur an den Eigenschaften des Gehäuses interessiert: Kann es die Lagerkräfte aufnehmen, wie sieht es mit Wärmedehnungen aus, genügt die Kühlung? Die Wellen werden oft separat gerechnet, beispielsweise für Getriebe; hierbei ist die Anregung von Schwingungen von Interesse. Man wird solche Eigenschaften gewiss nicht mit einem FE-Gesamtmodell bestimmen – der Aufwand wäre viel zu groß. Man kann aber die statischen/dynamischen Eigenschaften solcher Wellen mit vereinfachten Balkenmodellen über Kopplungsknoten in eine umgebende Gesamtstruktur einbringen [9]. Ein anderer Anwendungsfall sind Schrauben in

Gewindesacklöchern. Sie zählen natürlich zu den Schraubenverbindungen, und der Schraubenpart ist leicht zu identifizieren. Für die Ausrichtung benötigt man (mangels korrespondierender Mutter) dann doch die Hauptträgheitsachsen, und für das Interface im Sackloch bietet sich keine unmittelbar einfache Lösung an.

Die konkrete Anwendung in der Praxis setzt voraus, dass die zu vereinfachenden Teile als konsistent benannte Partdateien importiert werden, um sie in der STEP-Datei des Gesamtmodells eindeutig identifizieren zu können. Dies ist im Rahmen von Konstruktionsrichtlinien recht einfach umzusetzen. Der erforderliche Aufwand ist gering und sicher zumutbar. Selbst wenn die prognostizierte Rechenzeiterparnis geringer als erwartet ausfallen sollte, bleibt immer noch der Vorteil der einheitlichen Modellierung und den damit reproduzierbaren Resultaten.

Abschließend sei an dieser Stelle ganz ausdrücklich meinem ehemaligen Kollegen Andreas Nickel gedankt, der sowohl das Konzept von ParaFEM als auch das Grundprinzip der Modellvereinfachung mit wesentlichen Beiträgen unterstützt hat.

Literatur

- [1] <https://codeaster.net/spip.php?article636>, abgerufen 22. Mai 2020
- [2] Nasdala, Lutz: *FEM-Formelsammlung Statik und Dynamik*. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2010. ISBN 978-3-8348-0980-3
- [3] Wang, C.; Zhou, M.; Dunn, J.: GM BoltStudio: A Suite of Extensions to Abaqus/CAE for Simulating Bolted Assemblies at General Motors. In: 2009 Simulia Customer Conference In: 2009 Simulia Customer Conference
- [4] <https://www.centaursoft.com/mesh-cad-cloning>, abgerufen 22. Mai 2020
- [5] Nickel, Andreas; Benke, Konstantin: ParaFEM – innovative Zukunftsstrategie zur effektiven Nutzung von numerischen Methoden mit integrierter Parametrisierung für Konstruktionsaufgaben. In: KT 2011, 9. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik 2011, 06./07.10.2011, Rostock, S. 115-122, ISBN 978-3-8440-0381-9
- [6] Prüfer, Hans-Peter: Ein hybrider Ansatz für Festigkeitsnachweise von multiskaligen Strukturen. In: Entwerfen Entwickeln Erleben in Produktentwicklung und Design 2019, TUDpress TD 11, Dresden 2019
- [7] <https://www.code-aster.org/spip.php?article303>, abgerufen 22. Mai 2020
- [8] <http://gmsh.info>, abgerufen 22. Mai 2020
- [9] Billenstein, D.; Diewisch, P.; Dinkel, C.; Rieg, F.: Numerische Betrachtung von Zwangsbedingungen in der Finite Elemente Analyse. In: KT 2016, 14. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik 2016, 06./07.10.2018, Rostock, S. 302-309, ISBN 978-3-8440-4732-5

Detektion von Konstruktionsfehlern durch eine automatisierte Objekterkennung mittels Deep Learning

Patrik Müller, Paul Christoph Gembarski, Roland Lachmayer

Institut für Produktentwicklung und Gerätebau, Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover

An der Universität 1, 30823 Garbsen

Email: {Mueller, Gembarski, Lachmayer}@ipeg.uni-hannover.de; Internet: <https://www.ipeg.uni-hannover.de>

Inhalt: In der Produktentwicklung gelten diverse Richtlinien, an denen sich Ingenieure orientieren. Letztendlich sind aber die Erfahrungen des jeweiligen Anwenders dafür verantwortlich, ob eine Konstruktion korrekt gestaltet wird. Dieser Beitrag bietet einen Ansatz zur automatisierten Anwendung dieses Erfahrungswissens durch die Objekterkennung mittels Deep Learning. Dafür wird ein neuronales Netz anhand eines Beispiels so trainiert, dass es gießgerechte Gestaltungsmerkmale in einer Konstruktion erkennt und klassifiziert. Die Objekterkennung wird mithilfe des YOLOv4-Algorithmus realisiert, indem zweidimensionale Schnittansichten des Bauteils vom neuronalen Netz analysiert werden. Des Weiteren werden zwei Methoden zur dreidimensionalen Rekonstruktion der Schnittansichten vorgestellt. Abschließend wird die Methode bewertet und kritisch gewürdigt.

Stichwörter: Computer Vision, Deep Learning, CNN, YOLO, YOLOv4, KI, benutzerdefinierte Objektdetektion

Identification of constructional faults through automated object detection via Deep Learning

Abstract: Engineers are guided by multiple design guidelines in product development. Certainly, it is the experience of the respective user that determines whether a construction is designed correctly. This paper offers an approach to the automatized implementation of this experience knowledge by object detection using Deep Learning. For this purpose, a neural network is trained by means of an example in such a way that it detect and classify casting-compatible design features in a construction. The object recognition is realized with the YOLOv4-algorithm by analyzing two-dimensional sectional views of the component by the neural network. Furthermore, two methods for three-dimensional reconstruction of the sectional views are presented. Afterwards the method is evaluated and critically appraisal.

Keywords: Computer Vision, Deep Learning, CNN, YOLO, YOLOv4, AI, Custom Object Detection

1 Einleitung

„Die Entwicklung künstlicher Intelligenz könnte entweder das Schlimmste oder das Beste sein, was den Menschen passiert ist.“ Eine abschließende Bewertung des Zitats von Steven Hawking aus dem Jahr 2018 ist nicht möglich, da die Anwendung und Weiterentwicklung von KI-Methoden als Entscheidungsunterstützungssystem oder Problemlöser in verschiedensten Anwendungsgebieten noch Gegenstand aktueller Forschung ist. In der rechnerunterstützten Produktentwicklung stehen Ingenieure z. B. häufig vor Problemen, die intuitiv leicht zugänglich sind, sich allerdings schwer in Algorithmen formalisieren lassen und ein hohes Maß an Perzeption erfordern [1]. Ein Beispiel dafür, ist die Identifikation und Auflösung von Knotenpunkten sowie das Vermeiden von Materialanhäufungen innerhalb des gießgerechten Gestaltens [2]. Ein System, welches hierbei unterstützen soll, muss diese Materialanhäufungen wahrnehmen. Auf visueller Ebene kann die automatisierte Bilderkennung als Unterstützung fungieren. Das maschinelle Sehen (*engl. Computer Vision*) wird breit erforscht und bereits in einzelnen Domänen erfolgreich zur Anwendung gebracht, z.B. als Diagnosewerkzeug in der Radiologie [3]. Die reine Perzeption reicht jedoch zum Treffen von Entscheidungen nicht aus. Hierfür ist eine Kopplung mit anderen KI-Mechanismen oder wissensbasierten Systemen erforderlich. Dieser Artikel untersucht die Anwendung von neuronalen Netzen für die Bilderkennung bei ingenieurtechnischen Fragestellungen in Kombination mit fallbasiertem Schließen am Beispiel eines CAD-basierten Assistenzsystems zur Detektion von Materialanhäufungen.

2 Stand der Technik

Die maschinelle Fähigkeit, Bilder zu erfassen, zu erkennen und zu verarbeiten, weist kaum grundlegende Unterscheidungen zur Bilderkennung menschlicher Intelligenz auf. Da die neuronalen Netze dem menschlichen Gehirn nachempfunden sind, finden sich unzählige Analogien im Prozess der Bilderkennung zwischen Mensch und Maschine. [4]

2.1 Bildverarbeitung

Ein zweidimensionales digitales Bild wird durch ein Signal repräsentiert, welches Informationen in Form von Pixeln beinhaltet. In der Regel bildet jeder Pixel einen definierten Farbwert ab. Im RGB-Farbraum, der die Farbwahrnehmung durch die Mischung dreier Grundfarben nachbildet, wird jeder Pixel durch drei Intensitätswerte von 0-255 für die Kanäle

Rot, Grün, Blau beschrieben. In Bild 1 ist hierfür eine Beispielgrafik auf verschiedenen Abstraktionsniveaus mit diskreten Grauwerten dargestellt.

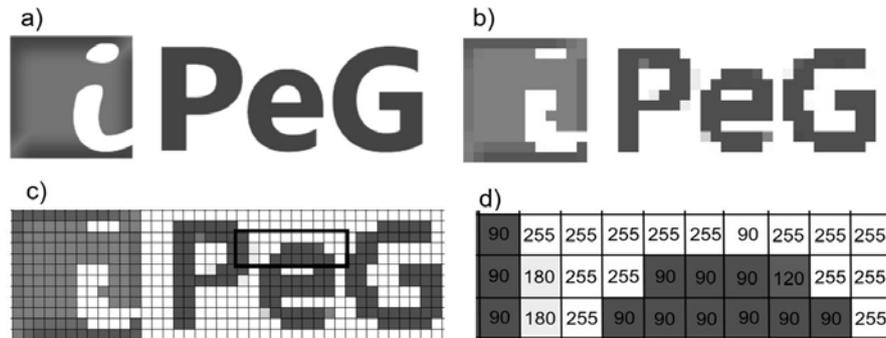


Bild 1: Bilddarstellung auf den verschiedenen Abstraktionsniveaus a) Ursprung, b) Verpixelt, c) Verpixelt mit Raster, d) Ausschnitt von c) mit diskreten Grauwerten.

Auf dieser Basis lassen sich Bilder als Signale rechnerunterstützt bearbeiten, auswerten, verändern und erkennen. Die menschliche Bildverarbeitung weist dabei wesentliche Ähnlichkeiten auf. Das menschliche Auge nimmt Bilder in Form von Lichtwellen wahr, welche je nach Wellenlänge Spannungs- und Stromänderungen auf der Retina erzeugen. Diese Änderungen werden von den Stäbchen und Zapfen detektiert. Bei den drei Arten von Zapfen gibt es jeweils eine für die Lichtkomponente Rot, Grün, Blau (Analogie zum RGB-Farbraum). Die Stäbchen und Zapfen erzeugen daraus Signale, welche im Gehirn z.B. zu Formen, Farben und Bewegungen verarbeitet werden [5]. Die genauen Prozesse innerhalb des Gehirns sind zum derzeitigen Kenntnisstand nicht präzise geklärt und Gegenstand der Hirnforschung bzw. Wahrnehmungspsychologie. Seherfahrungen und Gelerntes werden im Gehirn verknüpft und in Form von Modellen als Wissensbasis gespeichert. Bei einem wiederholten „Sehen“ einer bekannten Szene wird das Retinabild gefiltert und mit der Wissensbasis in Beziehung gesetzt. So ist der Mensch in der Lage innerhalb Bruchteilen von Sekunden eine Flut an Informationen aufzunehmen und zu verarbeiten. [6]

2.2 Convolutional Neural Network (CNN)

Neuronale Netze sind Netze aus künstlichen Neuronen mit einer definierten Architektur. Dabei addiert ein Neuron die gewichteten Eingangssignale und verarbeitet diese Summe gemäß einer Aktivierungsfunktion zu einem Ausgangssignal. Lernfähig ist das Netz unter anderem durch die Veränderung dieser Gewichte, sodass die Differenz zwischen berechnetem und vorhergesagtem Ausgangssignal minimal ist. Ein hochauflösendes Farbbild mit 1.000 x 1.000 Pixel besitzt demnach 3.000.000 Eingangsparameter. Eine

vollständig verbundene neuronale Netzschicht (*engl. Fully Connected Layer*) aus 1.000 Neuronen würde schon hier zu einer Matrix mit 3.000.000.000 Parametern führen. Typischerweise bestehen robuste neuronale Netze aus einer Vielzahl von Schichten (*engl. Layer*). Die hieraus resultierende Anzahl an Parametern ist enorm und nicht angemessen zu verarbeiten. Aus diesem Grund wurden die *Convolutional Neural Networks* (CNN) entwickelt [7]. Innerhalb dieser Struktur werden *Convolutional Layers* verwendet, die Bilder durch lernfähige Filter falten (*engl. to convolve*). Im nächsten Schritt werden die Informationen zusammengefasst (*engl. to pool*). Dadurch werden überflüssige Informationen gelöscht. Durch mehrere hintereinander angeordnete *Convolutional* und *Pooling Layer* werden Merkmale auf verschiedenen Abstraktionsebenen (bspw. Linie, Form, Muster) in *Feature Maps* extrahiert, die Anzahl der zu trainierenden Gewichte reduziert und die räumliche Zuordnung der Merkmale sichergestellt. Die Faltung erzeugt Schichten von *Feature Maps*, die aus dem vorherigen *Layer* zwar identische Eingaben bekommen, aber aufgrund der Gewichtsmatrizen verschiedene Merkmale herausfiltern. [7-9]

Anschließend werden die Signale in einen oder mehrere *Fully Connected Layer* geführt und ein Ausgangswert berechnet (Bild 2).

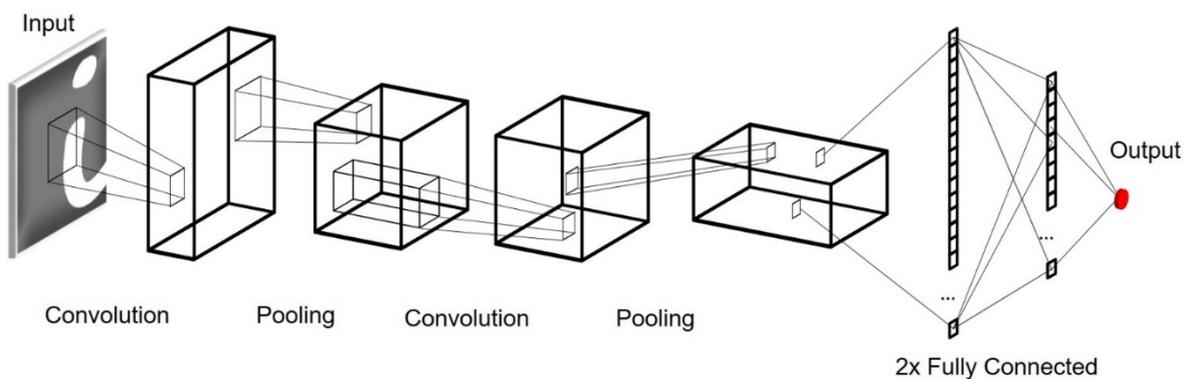


Bild 2: Architektur eines CNN zur Bildklassifikation. Dargestellt sind vier *Layer* (2x *Convolutional+Pooling* sowie 2x *Fully Connected*) mit mehreren Filterkernen, sodass eine hohe Anzahl an *Feature Maps* in den jeweiligen *Layern* gespeichert wird. Abbildung nach [9].

Mit dieser Methode lassen sich beispielsweise Bilder klassifizieren, segmentieren sowie Objekte präzise erkennen [10]. Aufbauend auf den CNNs gibt es diverse Features, Veränderungen und Optimierungen für spezielle Anwendungsfälle, sodass weiterentwickelte Formen des CNN unter diversen Bezeichnungen in der Literatur zu finden sind. In der Produktentwicklung finden CNNs noch keine breite Anwendung. Die Methoden der künstlichen Intelligenz werden hauptsächlich im Qualitätsmanagement sowie der industriellen Bildverarbeitung erfolgreich eingesetzt [11].

3 Verfahrensauswahl und Datengenerierung

Um die Lunkerbildung in Gießkonstruktionen zu vermeiden, werden verschiedene Regeln des gießgerechten Gestaltens vom Konstrukteur angewendet [12]. Wenn Rippen und Wände in Knotenpunkten aufeinandertreffen, entstehen Materialanhäufungen. Unter der Berücksichtigung von verschiedenen Gestaltungsrichtlinien lassen sich diese beispielsweise durch das Einlegen von Kernen auflösen oder durch die Anordnung von Steigern über der Materialanhäufung entschärfen [2]. Um eine oder mehrere günstige bzw. ungünstige Knotengestaltungen in zweidimensionalen Schnittansichten von Gießkonstruktionen zu detektieren, sollte die Konstruktion nicht im gesamten, sondern die gesuchten Merkmale räumlich lokalisiert und klassifiziert werden. Als Methode wird daher die Objektdetektion verwendet. Beim *Deep Learning* gibt es zwei Wissensquellen, die dem Anwender helfen, ein zuverlässiges und robustes neuronales Netz aufzubauen: Gelabelte, zugängliche Daten sowie effektive und erprobte Netzarchitekturen. Als State-Of-Art für die Objektdetektion gilt aktuell die Netzarchitektur YOLOv4 (You-Only-Look-Once Version 4) [13]. Der Algorithmus zeichnet sich dadurch aus, dass das CNN die zu testenden Bilder nur einmal sehen muss, um sie vollständig zu analysieren (daher *You-Only-Look-Once*). Anders als bei Methoden, welche die Regionen eines Bilds sequentiell analysieren (bspw. das bewährte R-CNN [14]), teilt YOLO die Grafik in eine definierte Anzahl an Zellen. Anschließend werden interessante Bereiche innerhalb der Zellen in sogenannten *Bounding Boxes*, die das gesuchte Objekt umschließen, vorhergesagt [15]. In Bild 3 ist dafür der Algorithmus der Objektdetektion nach YOLO als Regressionsproblem dargestellt.

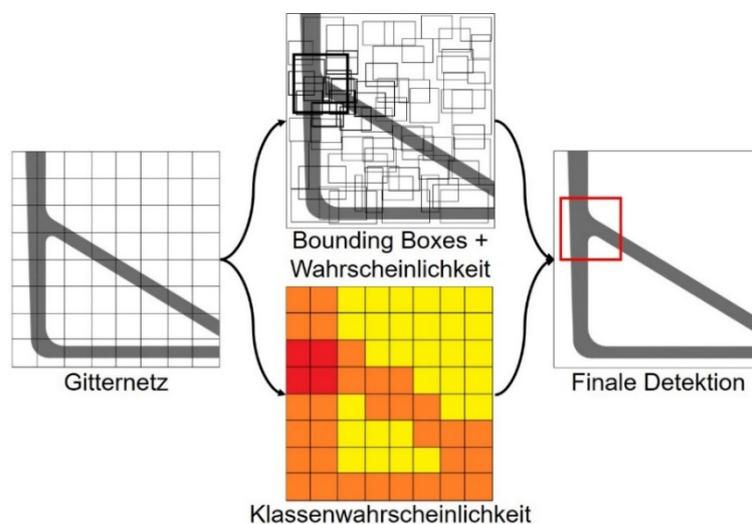


Bild 3: Objektdetektion mit dem YOLO-Algorithmus am Beispiel eines ungünstigen Knotenpunktes.

Abbildung nach [15].

Der regressionsbasierte Algorithmus errechnet die Wahrscheinlichkeiten, dass ein Objekt korrekt innerhalb von einer Zelle mit der *Bounding Box* umschlossen wurde und führt eine Klassifikation durch. Da durch diesen Algorithmus eine Vielzahl an verschiedenen *Bounding Boxes* entsteht, werden am Ende nur diejenigen beibehalten, die mit einer definierten Wahrscheinlichkeit ein gesuchtes Objekt detektiert haben. YOLO zeichnet sich nicht nur durch eine ausgezeichnete Netzarchitektur aus, sondern beinhaltet zusätzlich diverse weitere Features. Neben der Möglichkeit, das Netz mit selbsterstellten gelabelten Daten bzw. Grafiken zu trainieren, besitzt es zahlreiche Algorithmen, die das Training optimieren. So werden Features zur Erweiterung der vorhandenen Daten (*engl.* Data Augmentation) verwendet, die Grafiken so verändern, dass das Netz zuverlässiger trainiert wird und robuster auf neue Daten reagiert [13]. Dadurch werden die Trainingsbilder beispielsweise automatisch gespiegelt, verwechselt, verzerrt, gedreht und in YOLOv4 außerdem zu Mosaiken zusammengesetzt. Dadurch steht eine Vielzahl der gegebenen Anzahl an Trainingsbildern zur Verfügung, mit welchen das Netz trainiert wird.

Als Datenbasis wird eine zur Verfügung gestellte Kundenbibliothek verschiedener CAD-Gusskonstruktionen mit jeweils 30 Schnittansichten von günstigen und ungünstigen Knotengestaltungen verwendet sowie durch *Data Augmentation* Algorithmen vormodifiziert. Das Training wird GPU-basiert in Google Colab durchgeführt.

Das Potential der Methode wird bewusst bei einer kleineren Datenbasis ermittelt, da in der Regel der Teilestamm in einem konstruierenden Betrieb keine unendlich große Datenbasis ergibt. Diese Datenbasis stellt im neuronalen Netz die Grundlage für die Objektdetektion durch fallbasiertes Schließen dar. Im fallbasierten Schließen werden Problemstellungen durch einen Analogieschluss gelöst [16]. Dabei ist ein ständiger Abgleich von neuen und gelernten Fällen innerhalb der Datenbasis notwendig [17]. Auch hier existiert eine Analogie des maschinellen Lernens zur Problemlösung menschlicher Verhaltensweisen. Ein Mensch, der mit einem neuen Problem konfrontiert wird, versucht Lösungsvorgehen zu ähnlichen Problemen aus seiner persönlichen Vergangenheit zu ermitteln. Sollte ein ähnliches Problem schon einmal erfolgreich gelöst worden sein, wird der Mensch versuchen, das aktuelle Problem ähnlich zu lösen. Ist dies nicht der Fall, ist eine Erweiterung der Datenbasis (für Mensch bzw. Maschine) zwingend erforderlich [18]. Neuronale Netze können durch dieses Vorgehen Ähnlichkeiten gewichten und letztendlich abbilden.

4 Benutzerdefinierte Objekterkennung

Im Folgenden werden die Ergebnisse der benutzerdefinierten Objekterkennung mittels YOLOv4 dargestellt und das neuronale Netz anhand verschiedener Beispiele validiert. Abschließend wird die Methode kritisch bewertet und das Potential analysiert.

4.1 Prozesskette und Ergebnisse

Durch die Data Augmentation Features von YOLOv4 wird das Netz, ausgehend von der ursprünglich generierten Datenbasis, mit insgesamt 256.000 individuellen Datensätzen trainiert und optimiert. Innerhalb der Prozesskette werden dafür automatisiert 2D-Schnittansichten von den Gussgehäusen in der Konstruktionsumgebung erstellt und in einem gängigen Bildformat gespeichert. Weitere Nachbearbeitungen der Bilddaten zur Durchführung der benutzerdefinierten Objekterkennung sind nicht notwendig. Das trainierte neuronale Netz kann auf den Speicherort der zu überprüfenden Schnittansicht zugreifen und diese anschließend analysieren. Anhand einer Gegenüberstellung von zwei Konstruktionsschnitten (analog zum eingangs verwendeten Beispiel in Bild 3), die dem Netz unbekannt sind, lässt sich das Potential der Objektdetektionsmethode abschätzen (Bild 4).

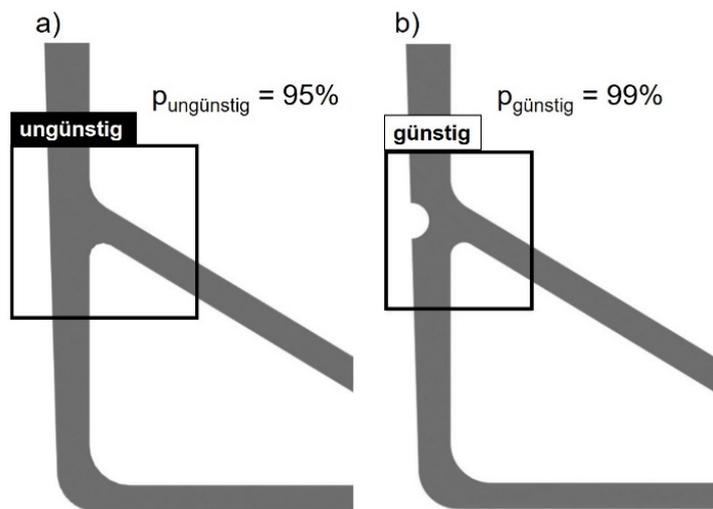


Bild 4: Vorhersage des neuronalen Netzes a) einer ungünstigen Knotenkonstruktion und b) einer günstigen Knotenauflösung mit den jeweiligen Vorhersagewahrscheinlichkeiten.

Es werden für jedes Bild ca. 1.500 Vorhersagen getroffen, von denen alle unter einer Vorhersagewahrscheinlichkeit von 30% verworfen werden. Um eine dreidimensionale Ergebnisdarstellung als ergänzende bzw. zusätzliche Fehlerüberprüfung vorzunehmen, lassen sich weitere Methoden des Image Processing an die zweidimensionale

Objektdetektion anschließen. Bild 5 zeigt dafür zwei Varianten, die eine manuelle Überprüfung erlauben. Dadurch ist eine Aussage darüber möglich, ob eine vom neuronalen Netz erkannte Fehlerstelle des Beispiels in Bild 4a) tatsächlich einen Fehler darstellt. Durch diese rekonstruierenden Methoden der 2D-Schnittansichten in ein 3D-Volumenmodell können die detektierten Fehler dreidimensional verifiziert werden. Beispielsweise lassen sich die Schnittansichten mithilfe von Filtern so bearbeiten, dass das Volumen nach den Intensitäten der Materialanhäufungen durchleuchtet werden kann. In Kombination mit verschiebbaren Ebenen (in alle Koordinatenrichtungen) durch das Bauteil kann so eine zuverlässige Entscheidung durch den Anwender bzw. Konstrukteur getroffen werden.

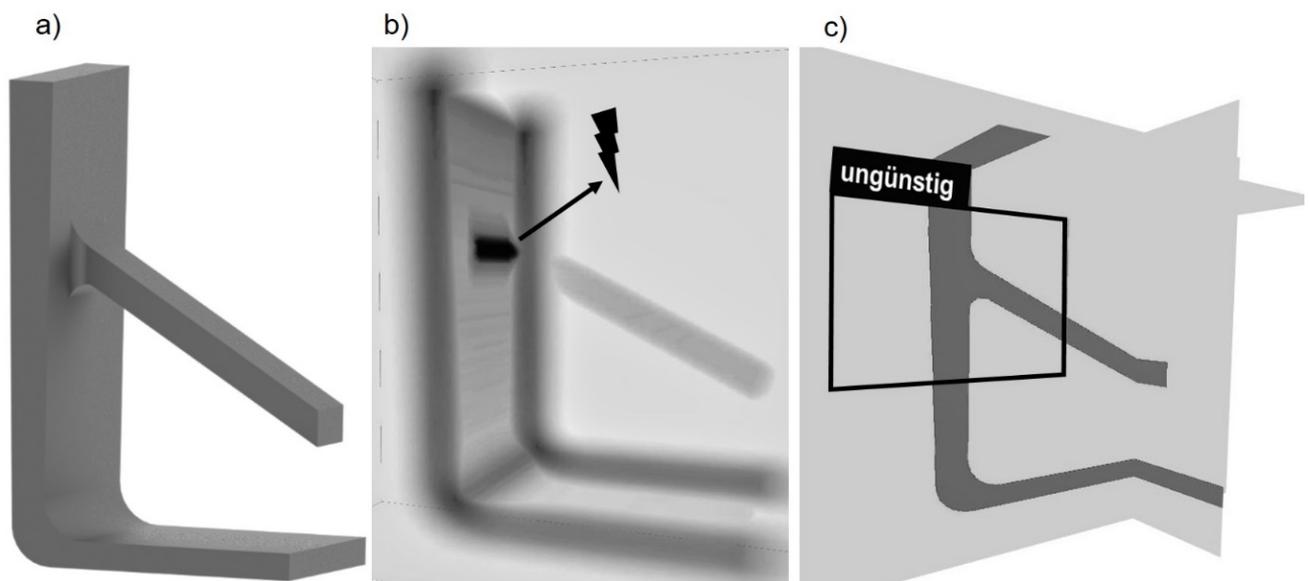


Bild 5: Weiteres Image Processing des a) realen Bauteils mit einer ungünstigen Knotengestaltung zu b) einer gefilterten und intensitätsbasierten Darstellung der Materialanhäufungen sowie c) einer Darstellung mit verschiebbaren Fenstern durch alle Ebenen.

Mithilfe der intensitätsbasierten Darstellung ist eine Weiterverarbeitung der Informationen des Image Processing möglich. Sollte der Anwender die detektierte Materialanhäufung endgültig als Fehlerstelle bewerten, ist eine weitere Filterung nach den Zentren der maximalen Dichteintensitäten möglich. Diese Maximalstellen können in ein Koordinatensystem transformiert und beispielsweise als Marker in die CAD-Konstruktion zurück überführt werden. Hierbei ist auf eine Homogenität des Schnittebenen- und des globalen Konstruktions-Koordinatensystems zu achten. Allerdings zeigen sich bei Robustheitstests des Netzes einige Schwierigkeiten. Im Vergleich zu einem einzigen Knoten entlang einer Wand stellen sich deutlich geringere Vorhersagewahrscheinlichkeiten bei

einer komplizierteren Geometrie mit günstigen und ungünstigen Knotenkonstruktionen in näherer Umgebung zueinander heraus (Bild 6).

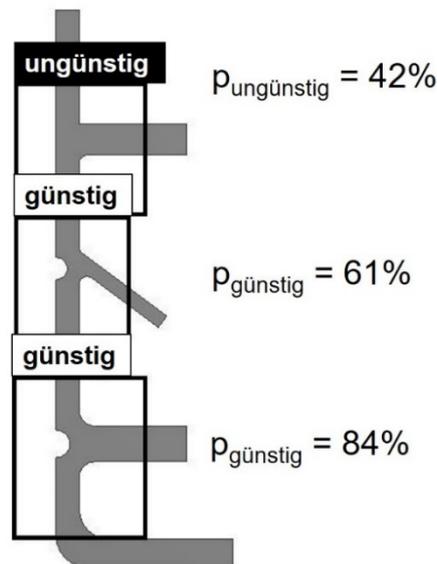


Bild 6: Vorhersage des neuronalen Netzes einer komplizierteren Wandgeometrie mit günstigen und ungünstigen Knotenpunkten sowie den jeweiligen Vorhersagewahrscheinlichkeiten.

Es lässt sich feststellen, dass die Ungenauigkeit der Vorhersagewahrscheinlichkeit mit der Kompliziertheit der Geometrie korreliert. Mit einem gewissen Optimierungsaufwand der Netzparameter lassen sich diese Vorhersagewahrscheinlichkeiten erhöhen.

4.2 Kritische Würdigung des Vorgehens

Grundsätzlich gilt für neuronale Netze der Zusammenhang „je größer die Datenbasis, desto zuverlässiger das Ergebnis“. Dies ist vor allem bei der aufwendigen Aufgabe der Objektdetektion in Bildern zu beachten. Die Objektdetektion mithilfe des YOLOv4-Algorithmus funktioniert für die Datenbasis COCO (Common Objects in Context – 330.000 Bilder, davon über 200.000 gelabelt, über 1.500.000 Objekt-Datensätze in 80 Objektklassen) außergewöhnlich gut. An der Masse der Daten in COCO zeigt sich auch der Grund: Für die 80 Objektklassen, bezogen auf die Objektlabel, sind durchschnittlich knapp 18.000 Datensätze für jede Kategorie vorhanden. Im Rahmen dieser Arbeit wurde das neuronale Netz hingegen lediglich mit 30 Datensätzen pro Objektklasse trainiert. Trotzdem zeigen die Ergebnisse bereits ein wesentliches Potential dieser Methode. Ein maximal robustes neuronales Netz braucht jedoch eine Vielzahl von günstigen und ungünstigen Knotenkonstruktionen, welche die derzeitige Datenlage bei weitem übertreffen muss.

Eine Fragestellung, die sich aus der Diskussion über die Größe der Datenbasis ableiten lässt, ist die Erweiterbarkeit auf weitere Klassen. Neben der gießgerechten Auflösung von Knotenpunkten gibt es weitere Richtlinien, wie beispielsweise schematische Querschnittsabstufungen und das Vermeiden von Hinterschneidungen. Sollten all diese möglichen Fehlerquellen zuverlässig detektiert werden können, ist eine aufwändige bzw. umfassende Datenbasis notwendig, die auch eine lokale Überlagerung verschiedener Fehler sicher erkennen muss. Auch hier ist der Nutzen mit dem Aufwand zur Erzeugung dieser Datenbasis ins Verhältnis zu setzen.

Weitere Herausforderungen finden sich in der Transformation der zweidimensionalen Schnittansicht in ein dreidimensionales Volumen. Dieser Schritt ist bei einer ganzheitlichen und automatisierten Betrachtung notwendig, um alle Gestaltungsrichtlinien vollständig in die Einbindung der Regeln zu integrieren. So sind zum Beispiel Materialanhäufungen nicht als solche zu klassifizieren, wenn darüber (aber außerhalb der analysierten Schnittebene) ein Steiger liegt. Eine mögliche Lösung hierfür wäre die Speicherung der detektierten Objekte in 2D und ein anschließender regelbasierter Abgleich der Ergebnisse in 3D.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Die im Rahmen dieses Beitrags vorgestellte Methode der automatisierten Objektdetektion zur Erkennung von Konstruktionsfehlern mittels *Deep Learning* zeigt ein grundsätzlich positives Potential. Durch dessen Anwendung lassen sich Konstruktionsansichten auch zum derzeitigen Kenntnisstand geeignet vorselektieren. Allerdings ist eine manuelle Nachbearbeitung und Überprüfung der Ergebnisse zwingend erforderlich. Des Weiteren sind Verbesserungen der Robustheit des Netzes sowie die regelbasierte Transformation der zweidimensionalen Ergebnisse in ein dreidimensionales Objektdetektionssystem sinnvoll. Eine Möglichkeit zur dreidimensionalen Objektdetektion ist die semantische Segmentierung von 3D-Volumen durch die Verwendung von Punktwolken aus den CAD-Konstruktionen. In der Literatur sind potentialabschätzende Versuche der dreidimensionalen Objektsegmentierung verschiedener Umgebungen aufgeführt. Mithilfe dieser Anwendungen lässt sich beispielsweise zwischen Bäumen, Flugzeugen und Gebäuden im dreidimensionalen Raum unterscheiden [19].

Von diesem Vorgehen wurde allerdings an dieser Stelle abgesehen, da bei Konstruktionsfehler nicht zwischen beispielsweise Menschen und Autos unterschieden wird, sondern zwischen günstigen und ungünstigen Lösungen – also Objektklassen mit teilweise

marginalen Unterschieden. Eine Untersuchung der CAD-Konstruktionen im dreidimensionalen Raum ist demnach erst zielführend, wenn die Methode in 2D für den gegebenen Anwendungsfall hinreichend beherrschbar ist.

Da der Einsatz dieser Methode für zweidimensionale Schnittansichten mit einem anschließenden dreidimensionalen, manuellen Post-Processing vielversprechend ist, ist eine Überprüfung dieser Konstruktionsmerkmale im dreidimensionalen Volumen das Ziel kommender Untersuchungen.

Literatur

- [1] Gembarski, Paul C.: *On the Conception of a Multi-agent Analysis and Optimization Tool for Mechanical Engineering Parts*. In: Agents and Multi-Agent Systems: Technologies and Applications 2020, 21. Mai 2020, S. 93-102.
- [2] Kurz, Ulrich; Hintzen, Hans; Laufenberg, Hans: *Konstruieren, Gestalten, Entwerfen: Ein Lehr- und Arbeitsbuch für das Studium der Konstruktionstechnik*. Wiesbaden. Vieweg+Teubner Verlag, 2009, ISBN: 978-3-8348-0219-4.
- [3] Dheeba, Jacob; Singh, N Albert; Selvi, S Tamil: *Computer-aided detection of breast cancer on mammograms: A swarm intelligence optimized wavelet neural network approach*. In: Journal of Biomedical Informatics, 2014.
- [4] Jesan, John P.; Lauro, Donald M: *Human Brain and Neural Network Behavior: A Comparison*. In: Ubiquity, November 2003.
- [5] Fatt, Irving; Weissman, Barry A.: *Physiology of the Eye*. Butterworth-Heinemann, 1992, ISBN: 978-0-7506-9085-0.
- [6] Kosslyn, Stephen M.: *Mental images and the Brain*. In: Cognitive Neuropsychology, 05. Januar 2007, S. 333-347.
- [7] Krizhevsky, Alex; Sutskever, Ilya; Hinton, Geoffrey E.: *ImageNet Classification with Deep Convolutional Neural Networks*. In: Advances in neural information processing systems, Mai 2012, S. 1097-1105.
- [8] Wang, Tao; Wu, David J.; Coates, Adam; Ng, Andrew Y.: *End-to-End Text Recognition with Convolutional Neural Networks*. In: 21st International Conference on Pattern Recognition (ICPR 2012), 11.-15. November 2012.
- [9] LeCun, Yann; Bottou, Léon; Bengio, Yoshua; Haffner, Patrick: *Gradient-Based Learning Applied to Document Recognition*. In: Proceedings of the IEEE, 1998, S. 2278-2324.
- [10] Ayyadevara, Kishore: *Pro Machine Learning Algorithms: A Hands-On Approach to Implementing Algorithms in Python and R*. Apress, 2018, ISBN: 978-1-4842-3564-5.
- [11] Plappert, Stefan; Gembarski, Paul Christoph, Lachmayer, Roland: *The Use of Knowledge-Based Engineering Systems and Artificial Intelligence in Product Development: A Snapshot*. In: Information

Systems Architecture and Technology: Proceedings of 40th Anniversary International Conference on Information Systems Architecture and Technology (ISAT 2019), 15.-17. September 2019.

- [12] Conrad, Klaus-Jörg: *Grundlagen der Konstruktionslehre: Maschinenbau-Anwendungen und Orientierung auf Menschen*. Carl Hanser Verlag, München, 2018, ISBN: 978-3-446-45321-0.
- [13] Bochkovskiy, Alexey; Wang, Chien-Yao; Liao, Hong-Yuan Mark. *YOLOv4: Optimal Speed and Accuracy of Object Detection*. In: arXiv:2004.10934, 23. April 2020.
- [14] Girshick, Ross; Donahue, Jeff; Darrell, Trevor; Malik, Jitendra: *Rich feature hierarchies for accurate object detection and semantic segmentation*. In: arXiv:1311.2524, 22. Oktober 2014.
- [15] Redmon, Joseph; Divvala, Santosh; Girshick, Ross; Farhadi, Ali: *You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection*. In: arXiv:1506.02640, 8. Juni 2015.
- [16] Richter, Michael M.; Weber, Rosina: *Case-Based Reasoning: A Textbook*. Berlin Heidelberg, Springer-Verlag, 2013, ISBN: 978-3642401664.
- [17] Aamodt, Agnar; Plaza, Enric: *Case-Based Reasoning: Foundational Issues, Methodological Variations, and System Approaches*. In: AI communications 7, 1994.
- [18] Siqueira, Renan; Bibani, Mehdi; Duran, Deniz; Mozgova, Iryna; Lachmayer, Roland; Behrens, Bernd-Arno: *An adapted case-based reasoning system for design and manufacturing of tailored forming multi-material components*. In: International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM), 24. April 2019, S. 1175-1184.
- [19] Qi, Charles R.; Su, Hao; Mo, Kaichun; Guibas, Leonidas J.: *PointNet: Deep Learning on Point Sets for 3D Classification and Segmentation*. In: arXiv:1612.00593, 2. Dezember 2016.

Potential ungenutzter Rechenleistung Mikrocluster für Forschungsinstitute

Henrik Stromberg, Viktor Martinewski

Institut für Maschinenwesen, Technische Universität Clausthal

Robert-Koch-Straße 32, 38678 Clausthal-Zellerfeld

Email: info@imw.tu-clausthal.de; Internet: <https://www.imw.tu-clausthal.de/>

Inhalt: *Forschungsinstitute, die Konstrukteure ausbilden, verfügen meist über PC Pools mit CAD Workstations, deren Ressourcen außerhalb des Lehrbetriebes brachliegen. Daher wurde eine Softwarelösung entwickelt, die diese Ressourcen für Berechnungsaufgaben nutzbar macht um die Betriebs- und Anschaffungskosten für Berechnungsserver zu reduzieren und Engpässe zu vermeiden.*

Ein zentraler Server übernimmt hierbei als Jobmanager die Verteilung von Berechnungsaufträgen abhängig restringierender Parameter an den zur Verfügung stehenden Rechner. Ein auf diesen Rechnern ausgeführter Client übersetzt die Anweisungen des Servers und stößt die Berechnung des Auftrags an. Ein- und Ausgabedateien werden über einen NAS Server ausgetauscht. Das Potential des auf diese Weise hergestellten „Rechenclusters für Jedermann“ wird anhand einer Beispielsimulation untersucht. Es wird eine Reduktion des Zeitaufwandes von 95 % im Vergleich zu einem Rechenserver erreicht.

Die Software unter einer Open-Source-Lizenz veröffentlicht.

Stichwörter: *Rechencluster, Simulationen, FEM, Jobserver, Verteiltes Rechnen, Rechenleistung*

Potential of unused resources micro clusters for research institutes

Abstract: *Research institutes, which educate design engineers usually, have pc pools with CAD workstations. Their resources often remain unused out of course hours. Thus, a software solution was developed to make them available for calculation jobs in research. This can reduce costs and eliminate bottlenecks.*

A central server manages the distribution of jobs to the client computers under given constraints. The client computers are running software, which decodes the Instructions of the server and executes calculation tasks. The server is also used to store calculation results and receive calculation jobs.

The potential of this setup as a poor men's cluster is examined with an exemplary simulation task. It is shown, that the created cluster configuration can reduce calculation time by 95 % in comparison to using a calculation server.

The developed software for server and clients is published under an open source license.

Keywords: *computing cluster, simulation, FEM, job server, distributed computing, computing power*

1 Ausgangssituation und Bedarf

Am Institut für Maschinenwesen stehen den Mitarbeitern einige leistungsstarke Computer für die Berechnung von Simulationsmodellen zur Verfügung. Der stetig steigende Anteil von Simulations- und Berechnungsarbeiten in Forschungsprojekten führt in der Folge zu einem erhöhten Bedarf an Rechenkapazität und –verfügbarkeit. Dies deckt sich mit der allgemeinen Situation in Industrie und Forschung. [1] Weiterhin kommt es stoßweise zu Überschneidungen der Nutzung, sodass eine Priorisierung der Projekte in der Nutzung zwangsweise stattfindet. Die Option der Erweiterung der Anzahl und Leistung der derzeit verfügbaren Kapazitäten wäre ein möglicher Weg, den Bedarf zu decken. Ein anderer praktikabler Weg soll in dieser Arbeit vorgestellt und das Potential diskutiert werden.

Lehrstühle, die mit der Vermittlung rechnerbasiertem Lehrinhalts beauftragt sind (CAD/FEM-Ausbildung, etc.) haben in der Regel einen Zugang zu einem Rechnerpool, der außerhalb der Lehrveranstaltungen größtenteils ungenutzt bleibt. Nach dem Motto Quantität statt Qualität soll die Nutzung dieses Rechenkapazitätspotentials ermöglicht werden. Speziell die Durchführung großer zeitaufwändiger Parameterstudien, welche die Verfügbarkeit von Rechenleistung für einen längeren Zeitraum blockieren können, sollen hierbei den Fokus darstellen, da diese im Optimalfall Modelle darstellen, welche geringere Anforderungen an die Spezifikation der benötigten Computerleistung stellen. Diese Aufgaben stellen häufig den Regelfall dar.

Vor diesem Hintergrund wird eine Infrastruktur zur Ressourcenverwaltung geschaffen, welches die Berechnungsaufträge verwalten soll und auf alle zur Verfügung stehenden Rechnerkapazitäten abhängig der Anforderungen aufteilt, sodass den Nutzern ein erweiterter Kapazitätspool bei höchstmöglichem Komfort zur Verfügung steht. Diese ist als kostengünstige Alternative zu herkömmlichen HPC Clustern konzipiert, deren Bedeutung in Industrie und Forschung ebenfalls zunimmt. [2] Konzeptionell baut dieser Ansatz auf dem BOINC Projekt der Berkeley University auf.

2 Infrastruktur zur Ressourcenverwaltung

Der Modellaufbau, sowie die Konvergenz- und Validierungsuntersuchungen finden wie gewohnt auf den zur Verfügung stehenden Computern statt. Sobald das Modell steht und

eine Parameterstudie durchgeführt werden soll, erstellt der Nutzer eine Liste aller zu untersuchender Parameterkombinationen. Da so eine Parameterstudie meist mehrtägig abläuft, können die Jobs statt auf einem leistungsstarken Rechner auch von vielen weniger starken Rechnern mit höheren Rechenzeiten bearbeitet werden.

2.1 Übersicht

Um dieses Vorgehen zu realisieren, wurde eine Infrastruktur zur Ressourcenverwaltung entwickelt, die eine automatisierte Jobverwaltung und -ausführung für die gesamte zur Verfügung stehende Rechnerkapazität unter Nutzung unterschiedlicher Berechnungsprogramme ermöglicht.

Die schematische Darstellung des Informations- und Datenflusses dieses Systems ist der nachfolgenden Abbildung zu entnehmen und wird im Folgenden näher erläutert und diskutiert.

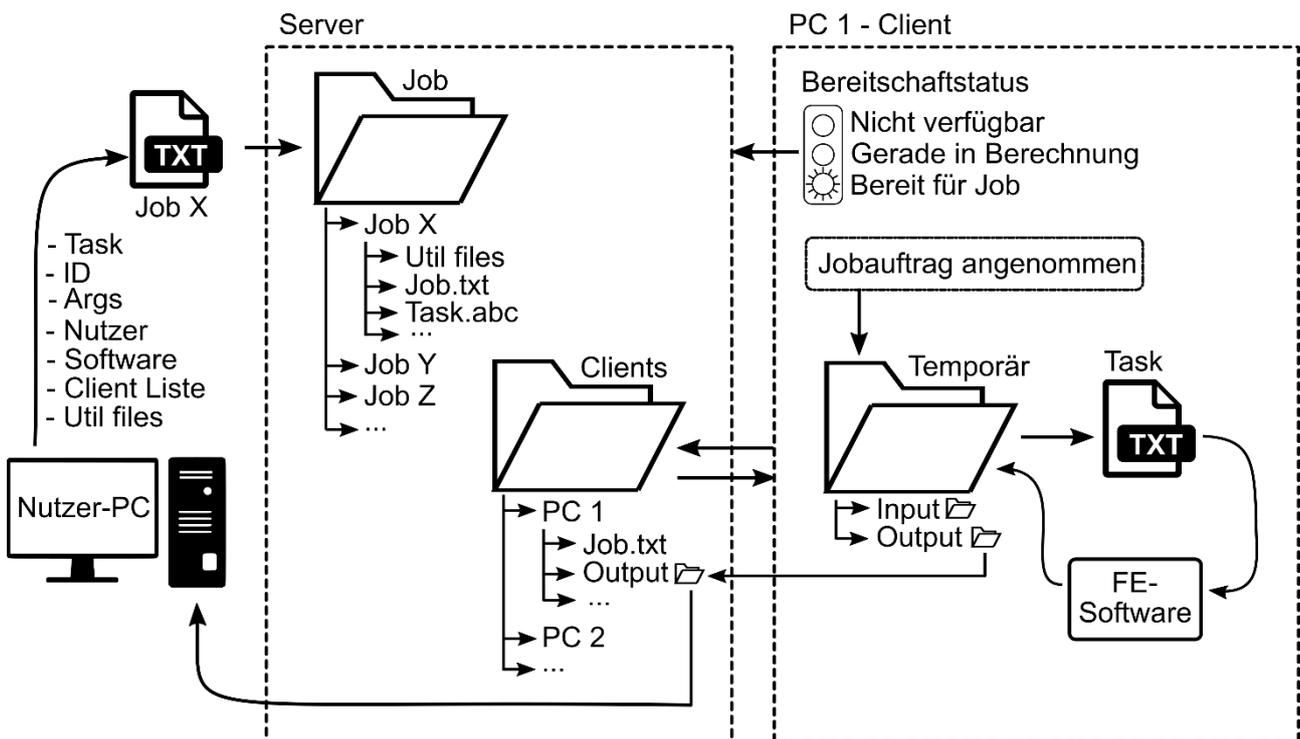


Bild 1: Schematische Darstellung des Prozesses

Der Nutzer erstellt an seinem persönlichen Computer eine Job-Datei in der alle benötigten Spezifikationen des Rechenauftrags zusammengetragen sind:

- Task: Ein Task ist eine Datei die dem Programm als Eingabe übergeben wird, z.B. Iron Python Skripte für die ANSYS Workbench.
- ID: Diese ist die systeminterne eindeutige Bezeichnung des Jobs Sie wird vom System zugewiesen und soll nicht vom Benutzer verändert werden.
- Args: Beinhaltet Kommandozeilenargumente mit denen das jeweilige Programm gestartet wird.
- Nutzer: Angabe des verantwortlichen Nutzers, um eine spätere Zuordnung der Ergebnisse durchführen zu können.
- Software: Angabe der zur verwendeten Software.
- Client Liste: Stellt zusammen, welche Computer den Job ausführen können. Wird bei Modellen benötigt, die besondere Anforderungen an die Computerleistung stellen. Bleibt die Liste leer wird ein beliebiger zur Verfügung stehender Computer für den Job gewählt, der über die angegebene Software verfügt.
- Util files: Dies ist ein Ordner, der, alle Dateien, die für die Ausführung des Jobs benötigt werden enthält. Dies ist z.B. die nötige Projektdatei für die zu verwendende Software, welche das auszuführende Modell beinhaltet.

Diese Informationen werden an den Server übergeben. Der Server stellt die zentrale Verwaltungsinstanz dar und ist für die Sicherstellung der ordnungsgemäßen Kommunikation zwischen Nutzer und Berechnungscomputer zuständig. Die eingegangenen Jobs der Nutzer werden in einer Ordnerstruktur abgelegt und der Reihe nach abgearbeitet. Aufgaben, für die nur bestimmte Clients verwendet werden sollen werden priorisiert. Der Server beinhaltet weiterhin eine Verwaltung der zur Verfügung stehenden Clients. Ein Client ist ein auf allen zur Verfügung stehenden Systemen im Hintergrund laufendes Programm um deren Rechenkapazität anzubieten.

Sobald der Server einen Job in das Austauschverzeichnis ablegt, kopiert der Client die Daten in einen temporären Ordner auf die lokale Festplatte. Die Befehle, die im Job Ordner hinterlegt sind werden ausgeführt. Die definierte Software wird gestartet, Util files, Tasks und Args werden übergeben und die Berechnung kann durchgeführt werden. Sobald diese abgeschlossen ist und die Ergebnisdateien vorliegen, legt der Client die Ergebnisdateien wieder auf dem Dateiserver ab und löscht alle temporären lokalen Daten von der Festplatte

und steht für einen weiteren Berechnungsauftrag zur Verfügung. Der Nutzer kann nun die Ergebnisdateien vom Dateiserver entnehmen und auswerten.

2.2 Der Server

Der Server wurde als Anwendung mittels VB.NET umgesetzt. Er überwacht sowohl das Verzeichnis zur Abgabe von Aufgaben, als auch das Austauschverzeichnis mit den Clients auf Änderungen. Wenn für Jobs ein Timeout eingestellt wurde, nachdem diese als gescheitert gelten, setzt er deren Status auf „failed“, falls dies der Fall ist.

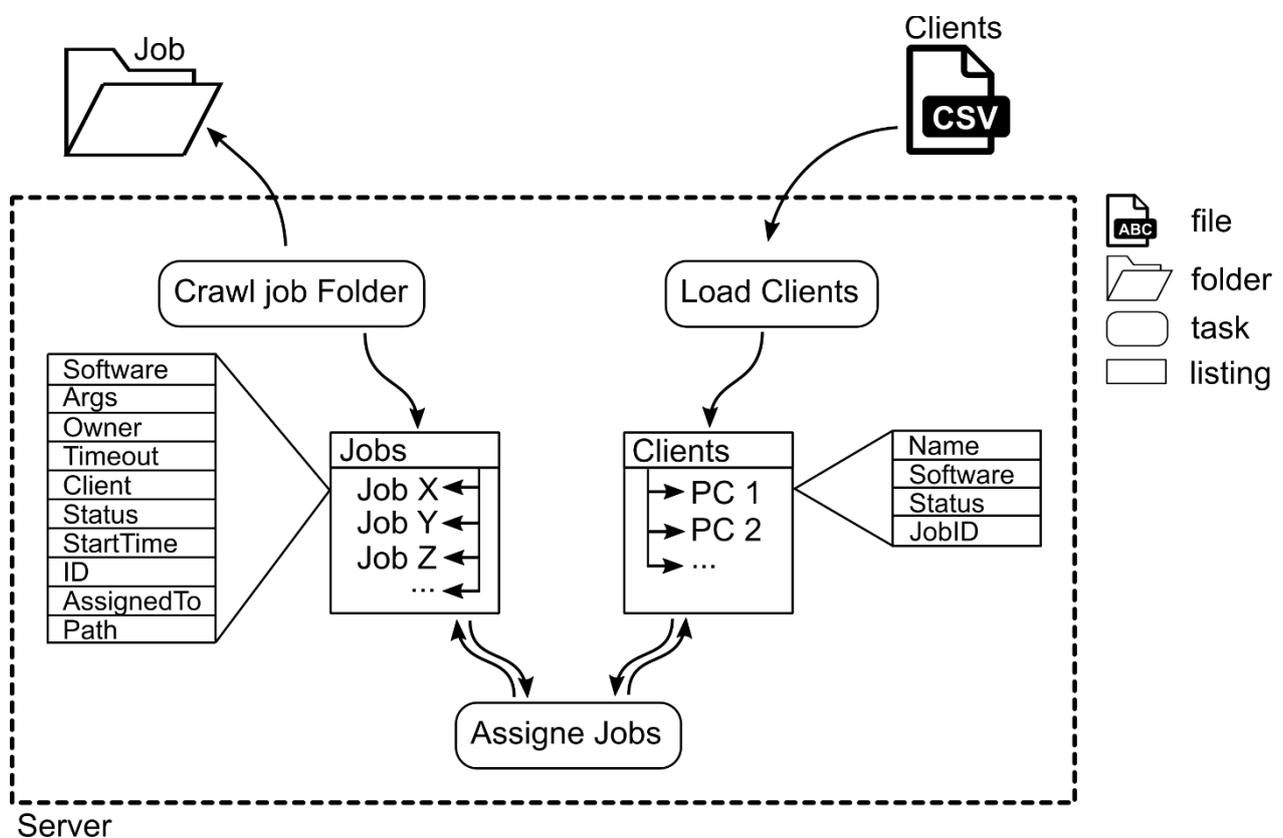


Bild 2: Schematische Darstellung des Servers

Der Server lädt beim Start die Datei Clients.csv aus dem Arbeitsverzeichnis. Diese enthält alle zu nutzenden Clients und eine Liste ihrer installierten Programme.

Der Server erstellt hieraus zwei Listen, eine enthält alle Jobs mit den Eigenschaften Software, Args, Owner, Client, Status, StartTime, ID, AssignedTo und Path. Owner bezeichnet den verantwortlichen Benutzer, AssignedTo den verwendeten Client bei bereits laufenden Jobs und Path den Pfad, unter dem die Dateien des Jobs abgelegt sind.

Die zweite Liste enthält alle Clients mit den Eigenschaften Name, Software, Status und JobID. Hierbei muss Name eindeutig sein. Es wird empfohlen die Computernamen zu verwenden. Software ist eine Liste aller auf dem Client verfügbaren Berechnungsprogramme. Die Methode CrawlJobFolder() nimmt neue Jobs in die Liste auf. Die Methode AssigneJobs() vergibt diese an Clients. Die Methode PrintStatus() erzeugt eine HTML Seite im Arbeitsverzeichnis, aus der die Benutzer den aktuellen Arbeitszustand des Servers und ihrer Aufträge ablesen können.

Der Server wurde unter Microsoft Windows entwickelt und getestet. Prinzipiell ist er aber auch mit der freien .NET Implementierung Mono kompatibel und kann daher auf anderen Betriebssystemen genutzt werden. [4]

2.3 Der Client

Der Client wurde ebenfalls in VB.NET entwickelt. Er ist in seinen Funktionen minimalistisch gehalten, da das Gesamtkonzept eine Zentralisierung der im Server vorsieht.

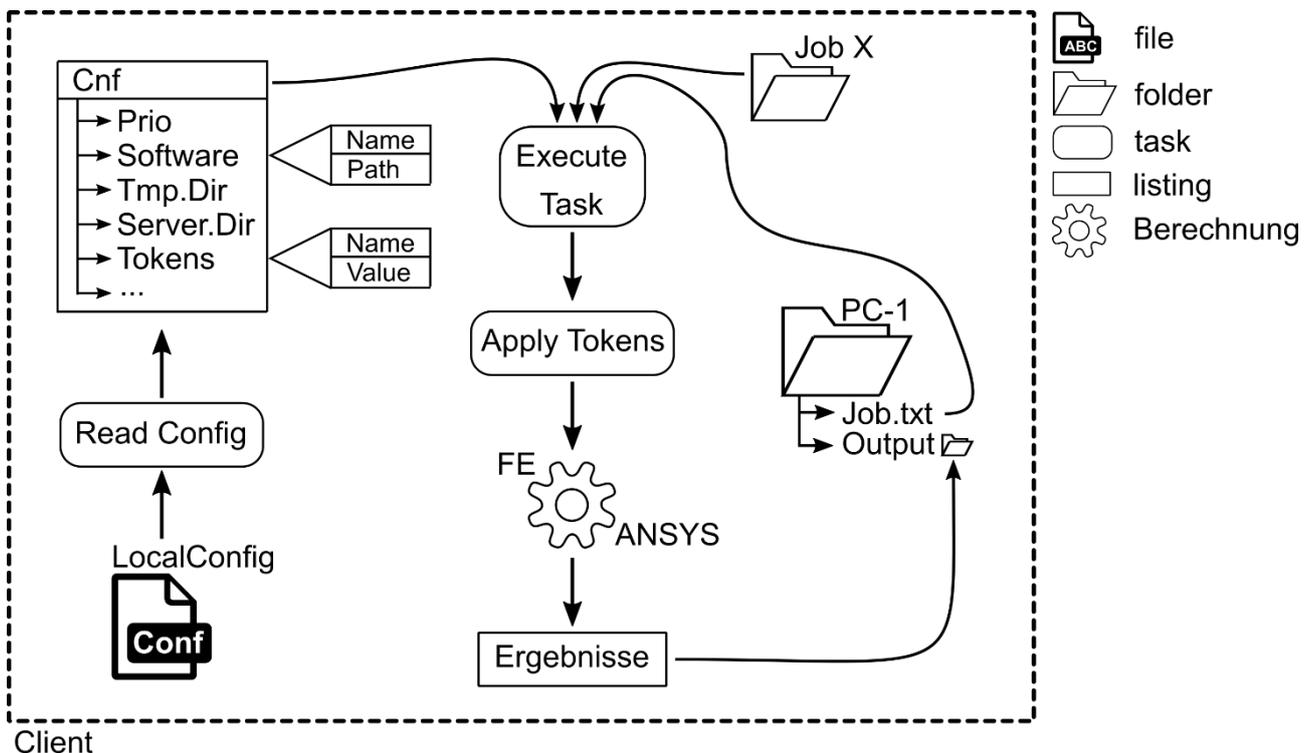


Bild 3: Schematische Darstellung des Servers

Beim Programmstart lädt der Client die im Programmverzeichnis abgelegte LocalConfig.conf Datei. Diese ist als Liste von Wertzuweisungen aufgebaut:

```
ServerPath=...VA-5  
TempDir=...VMWJQ_Clientent  
Priority=1  
Software=AnsysWB;C:\...\runwb2.exe  
Software=Testapp;..VMWJQ-Testapp.exe  
Token=ANSYS_WORKING_DIR;C:\Ansys
```

Die Reihenfolge der Einträge ist beliebig. ServerPath ist der Kommunikationspfad des Clients im Dateiserver. Der Ordnername ist der Name des Clients. TempDir bezeichnet den Ordner, in dem der Client lokal temporäre Daten zwischenspeichern darf. Priority definiert die Prozesspriorität der Berechnungen auf dem Client. Die Prozesspriorität legt fest wie der Prozess bei der Verteilung der CPU Zeit auf dem Client berücksichtigt wird. [3] Hierbei ist 1 die geringste und 5 die höchste Priorität. Für die Verwendung auf IT, die für andere Hauptaufgaben genutzt wird, wird die Priorität 2 empfohlen.

Einträge in der Config, die mit Software beginnen definieren auf dem Client installierte Berechnungsprogramme. Dort werden der Name des Programms und der Pfad zur ausführbaren Datei angegeben. Der angegebene Name ist frei wählbar, muss aber mit den Abgaben in der Clients.csv des Servers sowie den Job Dateien übereinstimmen. Ein Semikolon trennt Name und Pfad.

Token Einträge werden genutzt, um Dateipfade im lokalen Dateisystem des Clients und die Task Datei an den Client anzupassen. Alle Token-Strings, die in lokalen Dateipfaden oder der Task-Datei gefunden werden, werden durch den hinter dem Semikolon im Token Eintrag der Config Datei angegebenen String ersetzt. So kann z.B: ein bestimmtes Arbeitsverzeichnis für Berechnungsprogramme vorgegeben werden.

2.4 Voraussetzungen

Um die vollständige Umsetzung der Nutzung der PC-Pool-Rechner für Simulationsaufgaben zu gewährleisten, bedarf es einiger Voraussetzungen. Eine der wichtigsten Voraussetzungen ist die Gewährleistung, dass andere Nutzer keinen Zugriff auf die Berechnungsergebnisse haben. Hierzu wird ein lokaler Account erstellt, welcher dauerhaft

im Hintergrund angemeldet ist und einen temporären Ordner im für andere Teilnehmer nicht einsehbaren Benutzerbereich erstellt. Weiterhin ist diesem Account nur die Kommunikation zu einem Dateiserver genehmigt, andere Netzlaufwerke sind für diesen Account nicht erreichbar. Um die teilweise sehr hohen Datenmengen zu bewerkstelligen wird der bereits angesprochene Dateiserver eingerichtet, sodass die Performance anderer Netzlaufwerke nicht gestört wird und eine zentrale Austauschplattform für die Simulationsjobs sowie die Berechnungsergebnisse vorliegt. Es ist zudem sinnvoll keine automatischen Backups vom Austauschverzeichnis zu erzeugen.

2.5 Erweiterungspotential

Momentan laufen die Erprobung des Programms sowie die Entwicklung eines Programms zur automatischen Erstellung von Jobs aus Parameterstudien in Ansys. Dieser ist als AnsysWBJobMaker auch über das Github im Repository veröffentlicht. Weitere Hilfsprogramme zur automatischen Erzeugung von Jobs sind eine sinnvolle Ergänzung zur Verbesserung der Handhabbarkeit der Software. Ein weiteres Aufgabenfeld, an dem weiter gearbeitet werden kann, ist die Portierung der Anwendung für andere Betriebssysteme mit Hilfe der freien .NET-Implementierung Mono. [4]

2.6 Öffentliche Verfügbarkeit

Die vorgestellten Programme und Funktionen werden zur freien Nutzung zur Verfügung gestellt. Der nachfolgende Link führt Sie zur entsprechenden GIT Repository auf Github.

<https://github.com/HenrikJStromberg/IMWJQ>

Hier soll der Entwicklungsprozess auch mit institutsexternen Interessenten fortgesetzt werden. Bitte kontaktieren Sie uns bei Interesse an gemeinsamer Weiterentwicklung. Das Gesamtprojekt steht unter der MIT-Lizenz. Es darf unter Nennung der ursprünglichen Autoren verbreitet, genutzt und modifiziert werden. Auch kommerzielle Nutzung ist gestattet. Es bestehen keinerlei Haftungsansprüche.

3 Potential

Das Potential dieses Vorgehens wurde anhand eines 2D-Simulationsmodells eines Klemmrollenfreilaufs überprüft. Das 2D-Modell stellt einen Hertzschen Kontakt dar, welcher hinsichtlich seiner Beanspruchungsmaxima und deren Tiefe untersucht werden soll. Neben den reinen Geometrie- und Lastparametern sollen darüber hinaus verschiedene Werkstoffmodelle, sowie Plastifizierungseffekte, die anhand einer Variation des Härteprozesses und der damit verbundenen Härtemaxima- und -tiefenvariation resultieren, analysiert werden. Das 2D-Modell besteht aus 151.761 Knoten in 152.216 linearen Hexaedern. Der Berechnungsablauf stellt ein zehnmaliges Be- und Entlasten dar, um die asymptotische Annäherung an den resultierenden Verformungszustand zu gewährleisten. Als Ergebnisse werden die Kontaktpressung, die Vergleichsspannungsverläufe, sowie die verbleibenden Eigenspannungen und Verformungen ausgewertet.

Es entsteht ein breites Feld an zu untersuchenden Parameterkombinationen, schätzungsweise 300 – 500 Einzelrechnungen sollen in diesem Zuge durchgeführt werden.

Für den Vergleich der Geschwindigkeitsunterschiede zur Verfügung stehender Computer wurde ein Simulationsrechner mittlerer Leistung ausgewählt und dem gegenübergestellt ein Pool-Rechner der langsameren Konfiguration. Die Leistungsdaten sowie die resultierenden Berechnungszeiten sind nachfolgender Tabelle zu entnehmen:

Tabelle 1: Übersicht der Leistungsdaten und Berechnungszeiten der verwendeten Vergleichscomputer

Variante	1	2	3
CPU	Intel Xeon Silver 4210	Intel Xeon Silver 4210	Intel Xeon E31245
Kerne	10	4	4
Takt	2,2 Ghz	2,2 Ghz	3,3 Ghz
Massenspeicher	NVME	NVME	SATA
RAM-Größe	384 GB	384 GB	16 GB
Berechnungszeit	55 Minuten	94 Minuten	126 Minuten

Das Simulationsmodell wurde auf dem leistungsstärkeren Vergleichsrechner einmal mit 10 und einmal mit 4 Kernen berechnet. Wie zu erwarten war sind die Berechnungszeiten mit 10 Kernen deutlich geringer als mit 4 Kernen. Es sei an dieser Stelle zu erwähnen, dass für dieses Problem lediglich ca. 2 GB Arbeitsspeicher benötigt werden, sodass die Arbeitsspeicherkapazität für dieses Problem nicht den limitierenden Faktor darstellt, sondern die Anzahl genutzter Kerne. Der PC-Pool-Rechner ist mit 126 Minuten Berechnungszeit etwa 2,3 Mal langsamer als der leistungsstärkere Simulationsrechner. Für eine Einzelrechnung ist dieser Zeitunterschied nicht entscheidend. Die Relevanz jeder Minute steigt mit der Anzahl durchzuführender Berechnungen, also speziell bei großen Parameterstudien. Tabelle 2 stellt die kumulierte Rechenkapazität der speziell für die Durchführungen von Simulationsrechnungen vorgesehenen Computer sowie die darüber hinaus zur Verfügung stehenden Computer dar.

Tabelle 2: Kumulierte Rechenkapazitäten der für Simulationsrechnungen zur Verfügung stehenden Computer und die gesamten im PC-Pool verfügbaren Computer

PC-System	Simulation	PC-Pool
Anzahl	6	54
kumulierte Kerne	58	220
Kumulierter Arbeitsspeicher	1.598 GB	848 GB
Massenspeicher	NVME	SATA

Die speziell für Simulationsrechnungen zur Verfügung stehenden PC-Systeme weisen aufeinander abgestimmte Komponenten auf, sodass bestimmte Probleme optimal berechnet werden können. Gerade Simulationen mit einem erhöhten Bedarf an Arbeitsspeicherkapazität werden hierdurch ermöglicht. Dem gegenübergestellt sind viele leistungsschwächere Standard-PC-Systeme ohne Spezialisierung. Durch die in Kapitel 2 dargestellte eingerichtete Infrastruktur zur Ressourcenverwaltung können die Kapazitäten und Potentiale beider Systeme kombiniert werden und damit die zur Verfügung stehende Rechnerleistung deutlich erweitert werden. Nachfolgende Tabelle vergleicht die resultierenden Berechnungszeiten der Kombination der spezialisierten PC-Systeme mit den PC-Pool-Systemen.

Tabelle 3: Vergleich resultierender Berechnungszeiten für die Lösung des Gesamtproblems. Annahme 500 Einzelrechnungen.

PC-System	Simulation einzeln	PC-Pool einzeln	Simulation kombiniert	PC-Pool kombiniert
Berechnungszeit Einzelproblem [Min]	55	126	-	-
Berechnungszeit Gesamtproblem [Min]	27.500	63.000	4.583	1.167
Berechnungszeit Gesamtproblem [d]	19,09	43,75	3,18	0,81

Es zeigt sich, dass sich durch den Jobverwaltungsserver die Berechnungszeit des zu berechnenden Problems mit 500 Einzelrechnungen durch Nutzung der sonst ungenutzten Rechnerkapazitäten auf ca. einen Tag kumuliert. Durch dieses Vorgehen bleiben die leistungsstärkeren Computer für größere Probleme oder Einzelrechnungen zur Verfügung.

4 Fazit

Das vorgestellte Vorgehen bietet Instituten, welchen bedingt durch Ihren Lehrauftrag ein PC-Pool zugänglich ist, die Möglichkeit, die zur Verfügung stehenden Rechnerkapazitäten deutlich zu erweitern und damit große Parameterstudien auf sonst ungenutzte Computer zu verlagern und damit die leistungsstärkeren Rechensysteme für Einzelprobleme oder spezialisierte Berechnungsaufgaben frei zu halten.

Das Potential dieses Vorgehens lässt sich auch auf einen Umweltaspekt beziehen. In Wintermonaten könnte die Jobserververwaltung dazu genutzt werden, die durchzuführenden Berechnungen auf den am Tage ungenutzten Rechnern der PC-Pools durchzuführen, um durch die entstehende Prozesswärme die Räume zu erwärmen und damit Energiekosten einzusparen. [5]

Literatur

- [1] Nielsen, F.: *Introduction to HPC with MPI for Data Science*, Switzerland: Springer International Publishing, 2016. – ISBN 978-3-319-21903-5
- [2] Lange, Christian; et. al.; *Entwicklung einer webbasierten Schnittstelle für den effizienten Einsatz von HPC in der digitalen Produktentwicklung*, 17. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik, Aachen, 2019, <http://publications.rwth-aachen.de/record/766755/files/766755.pdf>
- [3] Tanenbaum, Andrew: *Moderne Betriebssysteme*; 2. Aufl. München: Pearson Studium, 2002. – ISBN 978-3827370198
- [4] Mono Project, <https://www.mono-project.com/>
- [5] Maaß, Christian; Sandrock, Matthias; Fuß, Gerrit: *Strategische Optionen zur Dekarbonisierung und effizienteren Nutzung der Prozesswärme und –kälte*, 2018, https://www.hamburg-institut.com/images/pdf/studien/180405-BEE-Prozesswrme_fin.pdf

Implementierung einer direkten und hochflexiblen Netz-Kontur-Kopplung zur Formoptimierung strömungsdynamischer Profile

M.Sc. Stephan Trautsch, Prof. Dr.-Ing. Heike Mrech*, Prof. Dr.-Ing. Karl-Heinrich Grote

Lehrstuhl für Konstruktionstechnik, Institut für Maschinenkonstruktion, Otto-von-Guericke-Universität
Magdeburg, 39106 Magdeburg

Email: {stephan.trautsch, karl.grote}@ovgu.de; Internet: www.ovgu.de

* Fachbereich Ingenieur- und Naturwissenschaften, Hochschule Merseburg,
06217 Merseburg

Email: heike.mrech@hs-merseburg.de; Internet: www.hs-merseburg.de

Inhalt: *In der Strömungslehre wird der Querschnitt eines Körpers in Strömungsrichtung als strömungsdynamisches Profil beschrieben. Durch dessen Umströmung werden Kräfte erzeugt, die an der Profilgeometrie angreifen und sich in eine Auftriebs- und eine Widerstandskomponente separieren lassen. Dabei hat die Form der Profilkontur einen entscheidenden Einfluss auf die resultierenden Kräfte am umströmten Querschnitt und somit auch auf die zu optimierenden Zielparameter. Diese können je nach Anwendungsgebiet stark variieren. Die Maximierung der Leistung einer Rotorschaukel und die Reduzierung des Treibstoffverbrauchs eines Verkehrsflugzeuges durch optimale Gestaltung der Tragflächen sind nur zwei mögliche Beispiele. Die komplexen strömungsmechanischen Vorgänge bei der Profilmströmung und die unterschiedlichsten Anforderungsrestriktionen machen die Suche nach der optimalen Form sehr kompliziert und zeitaufwändig. Um effektive Optimierungsverfahren aufzubauen, wurde lange Zeit versucht, die Anzahl der zu variierenden Formparameter möglichst gering zu halten. Der rasante Anstieg der Prozessorleistung und der Verfügbarkeit der IT-Systeme zur Optimierung erlauben heute jedoch eine deutlich höhere Parametrisierung. In der vorliegenden Forschungsarbeit wird dieser Aspekt aufgegriffen und durch die Ausformung der Profilkontur auf Basis einer hochdimensionierten Punktwolke in ein innovatives Optimierungssystem überführt. Dieses vernetzte und hochflexible Optimierungssystem ermöglicht die Entwicklung unkonventioneller Profilformen für die vielfältigen Strömungsrestriktionen. Dabei gliedert sich die strömungsmechanische Formoptimierung in mehrere Teilschritte, wobei die numerische Strömungssimulation in der Kombination mit naturalogenen Optimierungsverfahren den Kern darstellt. Ziel ist es, den Konstruktionsprozess durch eine direkte und flexible Netz-Kontur-Kopplung so zu verbessern, dass die resultierende Formänderung in direkte Korrelation zu der initiiierenden, charakteristischen Strömungsgröße gesetzt werden kann.*

Schlüsselwörter: Formoptimierung, dynamische Strömungsprofile, direkte Netz-Kontur-Kopplung

Investigations on the shape optimization of flow-dynamic profiles through a direct and flexible mesh-contour coupling

Abstract: *In fluid mechanics, the cross-section of a body in the direction of flow is described as a fluid dynamic profile. The flow around the profile generates forces which act on the profile geometry and can be separated into a lift and a drag component. The shape of the profile contour has a decisive influence on the resulting forces at the cross-section around which flow occurs and thus also on the target parameters to be optimised. These can vary greatly depending on the area of application. Maximizing the performance of a rotor blade and reducing the fuel consumption of a commercial aircraft by optimizing the design of the wings are only two possible examples. The complex fluid mechanical processes involved in airfoil flow around the airfoil and the wide variety of requirement restrictions make the search for the optimum shape very complicated and time-consuming. In order to build up effective optimisation procedures, attempts have long been made to keep the number of shape parameters to be varied as low as possible. Today, however, the rapid increase in processor power and the availability of IT systems for optimization allow a much higher parameterization. In the present research work this aspect is taken up and transferred into an innovative optimization system by forming the profile contour on the basis of a highly dimensioned point cloud. This networked and highly flexible optimization system enables the development of unconventional profile shapes for the various flow restrictions. The flow-mechanical shape optimization is divided into several sub-steps, whereby the numerical flow simulation in combination with nature-analogous optimization methods represents the core. The aim is to improve the design process by means of a direct and flexible mesh-contour coupling in such a way that the resulting change in shape can be directly correlated with the initiating characteristic flow quantity.*

Keywords: *shape optimization, dynamic flow profiles, direct mesh-contour coupling*

1 Einleitung

Bei der Entwicklung von Turbinenschaufeln, der Gestaltung von Propellern und der Auslegung von Tragflügeln kann der Konstruktion und Formoptimierung strömungsdynamischer Profile eine besondere Bedeutung zugeschrieben werden. Die spezielle Ausformung der Profile ermöglicht die Maximierung von dynamischem Auftrieb, wobei der ebenfalls durch das Profil bestimmte Strömungswiderstand auf einem möglichst geringen Niveau gehalten werden soll. Dies erfordert die Lösung wichtiger und schwieriger Optimierungsaufgaben zur Effizienzsteigerung der Systeme, die in der Regel hohe Konstruktionskosten nach sich ziehen. Dies ergibt sich sowohl aus dem Bedarf an Entwicklungs- und Optimierungszeit als auch aus der Notwendigkeit des Einsatzes von Experten und komplexen Optimierungsmethoden sowie Berechnungswerkzeugen. Die Form der Profilkontur hat einen entscheidenden Einfluss auf die resultierenden Kräfte am

umströmten Querschnitt und somit auch auf die zu optimierenden Zielparameter. Diese können je nach Anwendungsgebiet stark variieren. Die Maximierung der Leistung einer Rotorschaukel und die Reduzierung des Treibstoffverbrauchs eines Verkehrsflugzeuges durch optimale Tragflächengestaltung sind nur zwei mögliche Beispiele. Die komplexen strömungsmechanischen Vorgänge bei der Profilmströmung und die unterschiedlichsten Anforderungsrestriktionen machen die Suche nach der optimalen Form sehr kompliziert und zeitaufwändig. Um effektive Optimierungsverfahren aufzubauen, wurde lange Zeit versucht, die Anzahl der zu variierenden Formparameter möglichst gering zu halten. Der rasante Anstieg der Prozessorleistung und der Verfügbarkeit der IT-Systeme zur Optimierung erlauben heute jedoch eine deutlich höhere Parametrisierung. In der vorliegenden Forschungsarbeit wird dieser Aspekt aufgegriffen und durch die Ausformung der Profilkontur auf Basis einer hochdimensionierten Punktwolke umgesetzt. Ziel ist es, den Konstruktionsprozess durch eine direkte und flexible Netz-Kontur-Kopplung so zu verbessern, dass die resultierenden Formänderungen in direkte Korrelation zu den initiierenden, charakteristischen Strömungsgrößen gesetzt werden können. In diesem Forschungsbeitrag wird das entwickelte Optimierungsverfahren anhand einer modellbasierten Effizienzsteigerung eines standardisierten NACA-Profiles demonstriert. Die Formoptimierung erfolgt so, dass der Widerstand in Strömungsrichtung minimiert und der Auftrieb quer zu dieser maximiert wird. In Anbetracht der weltweiten Verbreitung dieser Energieerzeuger aber auch dem immer weiter ansteigenden Luftverkehr und der damit verbundenen CO₂-Emission erscheint eine weitere Verbesserung des Wirkungsgrades als durchaus anzustreben, wobei auch kleinste Effizienzsteigerungen einen enormen globalen Mehrwert generieren können.

2 Stand der Technik

Der aktuelle Stand der Technik erlaubt bei der Entwicklung und Konstruktion strömungsdynamischer Profile den standardmäßigen Einsatz eines multikriteriellen Optimierungsverfahrens. Dabei erfreuen sich Mehrzieloptimierungen auf Basis dreidimensionaler Navier-Stokes-Gleichungen hoher Popularität. *Samad* [1] gebraucht eine vergleichbare Vorgehensweise. Ausgehend von den vier verwendeten Konstruktionsparametern generiert er eine Mehrziellösung bezüglich der Zielfunktionen

Effizienz, Gesamtdruck und Drehmoment. *James* [2] verwendet ebenfalls einen genetischen Mehrzieloptimierungsalgorithmus zur Steigerung der Leistungsfähigkeit von Windkraftanlagen. Dieser wurde vom National Renewable Energy Laboratories unter der Bezeichnung HARP_Opt entwickelt und zur Verfügung gestellt. Dabei soll sowohl die jährlichen Energieproduktion der Turbine maximiert als auch die Schaufelmasse minimiert werden. *James* verwendet dabei ein Verfahren, wobei das Laufrad der Windturbine in einzelne Schaufelsegmente diskretisiert und aus einer zweidimensionalen Perspektive analysiert wird. Die optimierten Laufradschaufeln werden anschließend mit der Referenzanlage verglichen, es ergab sich eine Leistungssteigerung von etwa 2% bei einer Reduzierung des Materialbedarf von ca. 15%. *Fischer* und sein Team [3] entwickelten zwei Jahre zuvor ein ähnliches Optimierungsverfahren für Windkraftanlagen namens CoBOLDT 1.0 wobei sie sogar die jährliche Energieausbeute um 5% steigern konnten. Die multikriterielle Optimierung hat sich bei der Turbomaschinengestaltung als durchaus sinnvoll herausgestellt. Eine unflexible und einseitige Optimierungsstrategie generiert oft mehr Nachteile als Vorteile insbesondere hinsichtlich der Kombination Festigkeit/Aerodynamik. Künstliche neuronale Netze können diesen Optimierungsprozess beschleunigen und unter gewissen Voraussetzungen auch zu einer Effizienzerhöhung beitragen. Die Kombinationen aus formsuchenden genetischen Algorithmen und zeitsparenden künstlichen neuronalen Netzen genoss somit in den vergangenen Jahren große Aufmerksamkeit. *Pierret* [4] kommt nach der Realisierung einer darauf basierenden Herangehensweise zu dem Resultat, dass eine starke Erhöhung der Anzahl zu berücksichtigender geometrischer Konstruktionsparameter unabdinglich für eine realistische Schaufelmodellierung ist. *Achenbach* beschreibt in seinem Forschungsbericht [5] die Unzulänglichkeit mathematischer, evolutionärer und genetischer Optimierungsalgorithmen in der konstruktiven Belastbarkeitserhöhung. Dabei argumentiert er mit der komplexen und schwierigen Formulierung der Problemstellung solcher Optimierungsalgorithmen und einer sehr langen Rechenzeit. Durch eine Varianzanalyse kann in einem iterativen Prozess die Wirkung einer (oder mehrerer) Einflussvariablen auf eine (oder mehrere) Zielvariablen untersucht werden. Eine detaillierte Beschreibung dieses Verfahrens ist in [6] nachzulesen. *Jung* stellt eine analoge Systematik in Kombination mit einem evolutionären Optimierungsalgorithmus in seinem Fachbeitrag [7] vor. Dabei wurde

der Einfluss von zwölf Entwurfparametern auf den Auftriebsbeiwert und dem Gleitverhältnis eines Flügelprofils untersucht. Zu den dominierenden Designparametern gehörten der Vorderkantenradius der oberen Profilfläche, der Krümmungsradius bei der maximalen Profildicke und die Positionierung der Hinterkante. Artverwandte Beiträge sind in den Artikeln [8], [9] und [10] zu finden. Ungeachtet der Vorteile, die ein naturanaloges Optimierungsverfahren auf Basis parametrisierter mathematisch definierter Kurvenzüge verspricht, ergeben sich auch einige grundlegende Probleme bei dessen Verwendung. Es wird vorausgesetzt, dass „gute“ Lösungen sich ähnlich sind und dass man daher durch Mutation und Rekombination schrittweise zu besseren Lösungen gelangen kann. Es ist demnach davon auszugehen, dass unkonventionelle Formvarianten oder neue Design-Konzepte mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht erzeugt werden.

3 Formgebung mithilfe einer hochflexiblen und direkten Konturparametrisierung

Bei der konstruktiven Gestaltung von strömungsdynamischen Profilen nehmen mathematisch definierte Kurvenformen (Bézier-, B-Spline-, NURBS-Kurven) eine zentrale Funktion ein. Diese verfolgen die grundlegende Prämisse die kennzeichnenden Kontrollparameter weitestgehend zu minimieren. Dadurch wird das Spektrum an möglichen Profilkonturen eingeschränkt, da die Gestaltungsvielfalt auf das Potential der formgebenden mathematischen Kurvenzüge reduziert wird. Des Weiteren ist es nicht möglich, die charakteristischer Strömungsgrößen in eine direkte und unmittelbare Korrelation mit der Gestaltung der Profilform zu setzen. Eine direkte Verknüpfung der strömungsmechanischen Eigenschaften des Fluides mit der Formgebung des Optimierungsverfahrens kann somit nicht erzielt werden. Eine Unzulänglichkeit, die *Pierret und Van den Braembussche* schon 1999 erkannten und in ihrer Abhandlung [11] formulierten. Die vorliegende Forschungsarbeit soll an dieser Problemstellung ansetzen. Dafür wird die Profilgeometrie zunächst in zweidimensionale Profilschnittebenen (Abb. 2) separiert, wobei deren Profilkontur durch eine hochdimensionierte Punktwolke substituiert wird (Abb. 1).

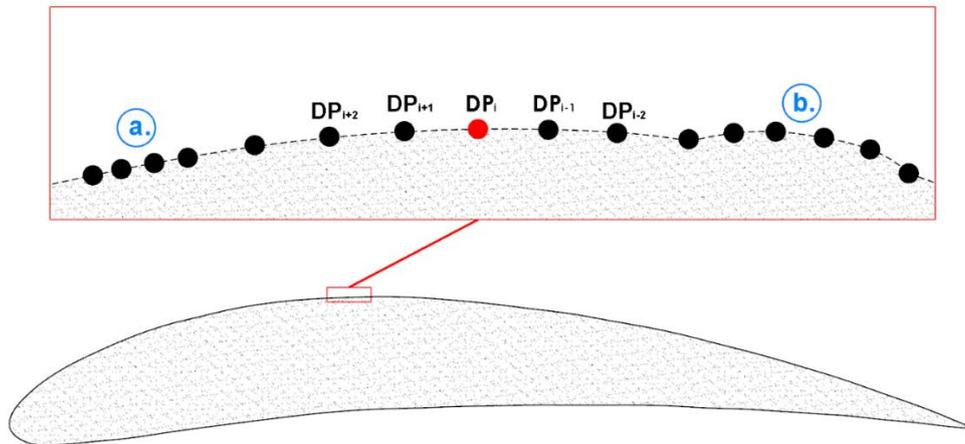


Abbildung 1 - Schematische Darstellung der direkten Parametrisierung eines dynamischen Profils

Ausgehend von der Profilnase werden die x- und y-Koordinaten der einzelnen Design-Punkte (DP) anhand des prozentualen Verhältnisses im Hinblick auf die Gesamtlänge beschrieben. Die damit erzielte Flexibilität in der Formgebung ermöglicht lokale Individualänderungen (Abb. 1 (b.)) im Konturverlauf und eine unkonventionelle und innovative Profilstaltung. Des Weiteren können Design-Punkte lokal erhöht werden, um Gradienten besser auflösen zu können (Abb. 1 (a.)). Ausschlaggebend für eine genaue geometrische Abbildung der Profilkontur und der darauf aufbauenden exakten numerischen Strömungsberechnung ist die Präsenz der zur Verfügung stehenden Design-Punkte auf der Profilkontur. Dabei zeigte sich nach ersten Untersuchungen, dass die Distanz zwischen den einzelnen Design-Punkten einen im Verhältnis zur Profillänge abhängigen Wert nicht überschreiten darf. Andernfalls wird die Profilkontur in einer unbrauchbaren Qualität wiedergegeben, insbesondere bei der Ausbildung lokaler Individualstrukturen. Eine zu große Anzahl an Design-Punkten erhöht jedoch das erforderliche Zeitinvestment zu stark. Ziel ist eine flexible Positionierung der Design-Punkte entsprechend der vorliegenden Strömungsrestriktionen ohne den Einsatz mathematisch definierter Kurvenformen. Ein entsprechender Gegenpol wird durch die Implementierung einer Festigkeit- und Formuntersuchung geschaffen. Die Wechselwirkung von struktur- und strömungsmechanischer Analyse ist für einen realistischen Optimierungsprozess unabdinglich. Dabei werden geometrische Strukturen verhindert, die einen strömungsdynamischen Vorzug erhalten würden, strukturell jedoch nicht zu vertreten sind.

4 Entwicklung und Implementierung von Dynamischen Finiten Strömungsfeldern „DFSF“

Die Implementierung einer direkten und hochflexiblen Netz-Kontur-Kopplung bedarf einer speziellen und neuartigen Strukturierung des zu verwendenden Rechengitters zur Durchführung der numerischen Strömungsberechnung. Dafür wird auf Basis der Präsenz und Positionierung der formgebenden Design-Punkt-Struktur ein globales Rechengitter generiert, dass durch eine individuelle lokale Struktur charakterisiert ist. Jedem Design-Punkt wird dabei ein Quartett von Wertepunkten (Value-Points - VP) zugewiesen (Abb. 2). Eine dadurch aufgespannte „Strömungsfläche“ stellt den formgebenden Design-Punkten charakteristische strömungsrelevante Informationen zur Verfügung. Die daraus resultierenden Dynamischen Finiten Strömungsfelder - DFSF stehen in unmittelbarer Korrelation zur Profilkontur. Eine im Rahmen der Auslegung vorgeschlagene Formänderung kann somit in direkte Relation zu der initiiierenden Strömungsgröße gesetzt werden. Folglich kann die Positionierung eines einzelnen Design-Punktes durch den Strömungscharakter des Fluides in seiner unmittelbaren Umgebung beschrieben werden.

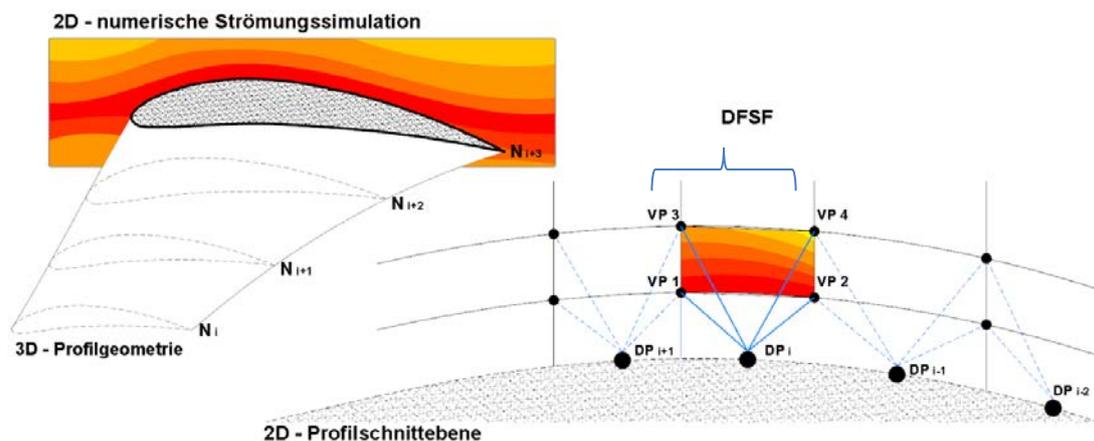


Abbildung 2 - Modellkonzept des Dynamischen Finiten Strömungsfeldes

Die Größe, Ausrichtung und Positionierung der einzelnen Strömungsfelder ist das entscheidende Kriterium für eine erfolgreiche Implementierung. Der Abstand der Gitterebenen untereinander muss regulierbar sein, da die jeweiligen kennzeichnenden Strömungseffekte sich in unterschiedlichen Schichten des umströmenden Fluides befinden. Naheliegender ist eine Ausrichtung, die sich an den geforderten Zielparametern orientiert.

Insbesondere laminar/turbulente Übergangsbereiche können somit erfasst und dahingehend beeinflusst werden, dass sie einen positiven Wirkeffekt auf die vordefinierten Zielparameter generieren. Im Gegensatz zu einer punktuellen Detektion der charakteristischen Strömungsgrößen ermöglichen die zweidimensionalen Strömungsfelder eine entsprechende dynamische Beurteilung.

5 Positionierung und Korrektur der formgebenden Design-Punkt-Struktur

Die Positionierung der Design-Punkte bildet das Fundament des iterativen Formoptimierungsprozesses. Hier werden die profilbeaufschlagenden Strömungsgrößen und die daraus resultierende Korrelation mit der Profilkontur analysiert und in eine darauf aufbauende Lageänderung eines jeden einzelnen Designpunktes transformiert. Das zuvor ermittelte Druckprofil an den jeweiligen Design-Punkten dient als Basis. Anschließend werden daraus abschnittsweise die resultierenden Kraftvektoren berechnet (Abb. 3 (rechts)). Deren Summe bildet die resultierende Kraft die letztendlich auf die Profilgeometrie wirkt. Diese kann in einen horizontalen und vertikalen Teil separiert werden (Abb. 3 (links)).

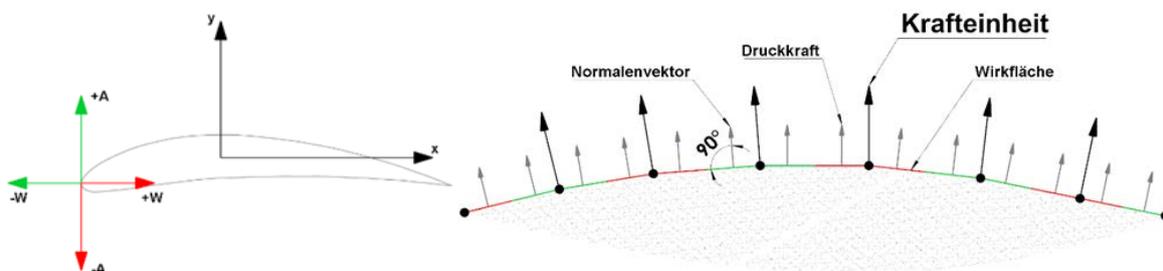


Abbildung 3 - Auftrieb/Widerstand am Tragflügel (links) und Kraftvektor auf der Profilkontur (rechts)

Eine positive vertikale Komponente (+A) bildet den Auftrieb. Dieser wird dementsprechend maximiert. Wobei negative Auftriebselemente (-A) weitestgehend reduziert werden müssen. Die horizontale Kraft wird als Widerstand deklariert (+W). Dieser ist immer vorhanden. Muss aber auf einem geringen Niveau gehalten werden. Dazu wird die Profilkontur so ausgerichtet, dass möglichst viele Design-Punkte eine negative horizontale Kraftkomponente entwickeln (-W).

Iterativ wird nun die Lage der einzelnen Design-Punkte so verändert, dass die vordefinierten Zielparameter angenähert werden. Dabei wird die Positionierung eines jeden Design-

Punktes anhand einer gewichteten Zielfunktion beschrieben, diese setzt sich zum einen aus dem aktuellen Datensatz der strömungsmechanischen Berechnung und zum anderen aus dem generierten Datenpool der vorherigen Iterationsschritte zusammen. Die Gewichtungen richten sich dabei nach der Position des Design-Punktes auf der Profilkontur, der Größe der zur Verfügung stehenden Datenbank, des aktuellen Iterationsschrittes und der vorliegenden Randbedingungen. Um einen homogenen Verlauf der Profilkontur zu gewährleisten, wurde eine Profilkorrektur in den Positionierungsprozess integriert. Dabei werden zunächst alle unspezifischen Positionsänderungen einzelner Design-Punkte aus der Menge filtrierte. Darauf aufbauend werden von drei aufeinanderfolgenden Design-Punkten die resultierenden Schnittwinkel und vordefinierten Grenzwerte der Schnittgeraden miteinander verglichen und gegebenenfalls durch eine Neupositionierung des mittleren Design-Punktes korrigiert. Es ist in diesem Zusammenhang zu erwähnen, dass sich bei der Positionierung der Design-Punkte ausschließlich deren Y-Koordinaten (Dickenverteilung) ändern. Die X-Koordinaten bleiben im Rahmen des Optimierungsprozesses unverändert.

Um eine technische Eignung der formoptimierten Profilgeometrie zu gewährleisten, ist es zwingend erforderlich die strukturmechanischen Belastungen innerhalb der Profilkontur zu analysieren und gegebenenfalls formkorrigierend zu reagieren. Eine integrative Festigkeits- und Verformungsuntersuchung bildet dafür die Basis. Nach Abschluss einer iterativen Optimierungsschleife steht in jeden einzelnen Berechnungsknoten der zugehörige Spannungstensor zur Verfügung. Durch die mathematische Interpolation auf eine quadratische Netzstruktur entsteht ein schachbrettartiges Muster wobei die geometrische Profilkontur mit den jeweiligen Materialspannungen visuell dargestellt wird. Die Freiflächen werden nicht abgebildet.

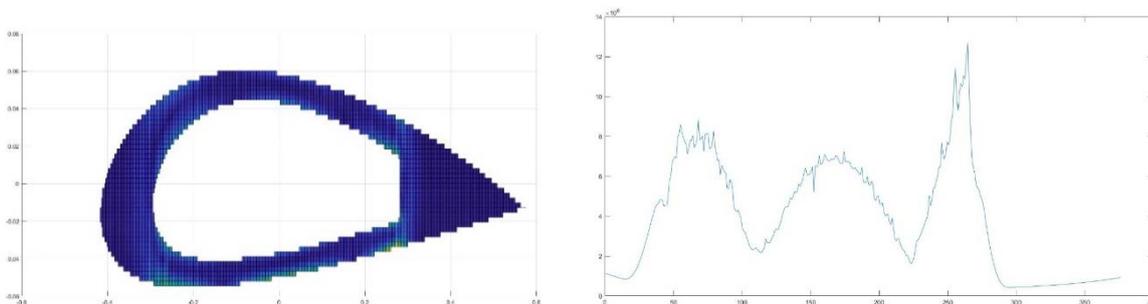


Abbildung 4 – Strukturmechanische Belastung des Querschnittes (links) und vertikaler Spannungsverlauf (rechts)

Anschließend werden alle vertikal übereinanderliegenden Spannungssegmente ermittelt und tabellarisch separiert. Aus diesen kann sowohl die jeweilige durchschnittliche Belastung als auch der vorliegende Maximalwert berechnet werden. Diese beiden Größen bilden die Basis für die Grenzwertberechnung. In der Abb. 4 (rechts) ist die jeweilige summierte durchschnittliche Vertikalspannung ersichtlich. Angefangen von der Profilnase bis hin zur Profilhinterkante. Dabei sind die einzelnen Profilsektionen im Vertikalspannungsprofil gut ersichtlich. Sowohl Profilnase als auch Profilhinterkante sind spannungsarm. Kritische Sektionen sind insbesondere der vordere und hintere Übergang am inneren Hohlkörperprofil. An der Profilnase und der Profilhinterkante liegt die notwendige Profilstärke bei nahezu null. Ein Wert, der technisch sicherlich nicht sinnvoll aber mathematisch aufgrund der dort niedrigen Spannungen zu vertreten ist. Die minimale strukturelle Bedeutung dieser Profilabschnitte gewährt dem Optimierungsprozess somit höchste Flexibilität bei der Gestaltung von Profilnase und Profilhinterkante. In der Abb. 5 wurden die resultierende minimal notwendige Profilstärke und die aktuell vorliegende Profilstärke dargestellt. Der potentielle strukturelle Handlungsspielraum bei der Profilgestaltung zeigt sich deutlich. Dieser variiert sehr stark hinsichtlich des betrachteten Profilabschnittes. Somit könnte in diesem Beispiel der mittlere Profilabschnitt noch erheblich schmaler ausgeführt werden. Eine weitere Reduzierung der Widerstandskraft wäre die Folge. Die Profilstärke am hinteren Hohlraumübergang deckt sich dagegen schon relativ deutlich mit der minimalen Profilstärke. Von einer weiteren Reduzierung der Materialstärke ist daher abzuraten. Alle beschriebenen Modellierungs- und Berechnungsvorgänge werden automatisiert von der im Rahmen dieser Forschungsarbeit entwickelten Optimierungssoftware durchgeführt. Für die technische Umsetzung wird das Programm MATLAB verwendet, wobei die numerische Strömungsberechnung durch die Toolbox QuickerSim ergänzt wurde.

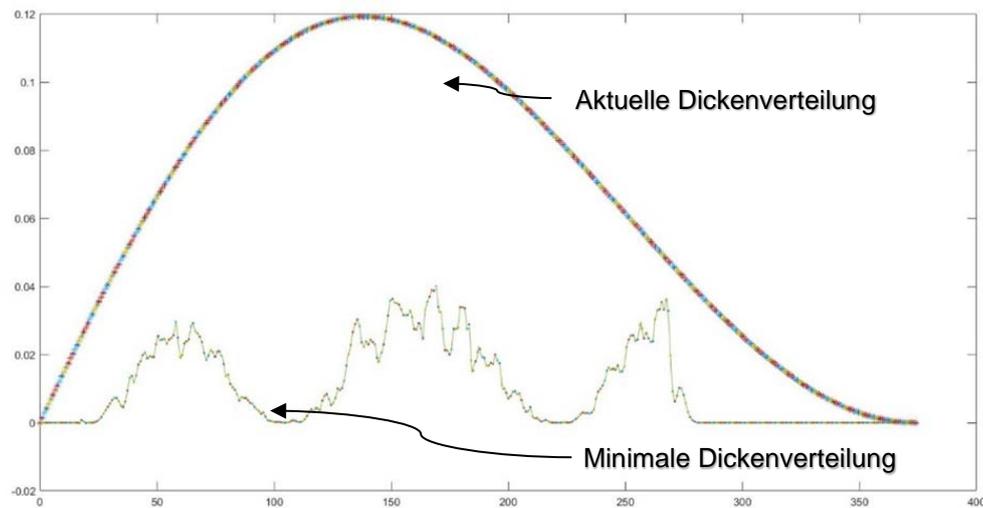


Abbildung 5 - Vergleich aktuelle und minimale Dickenverteilung des Profilquerschnitts

6 Modellbildung auf Basis einer numerischen strömungsmechanischen Berechnung

Das Gesamtkonzept des Forschungsprojektes wird durch die Modellierung und anschließende Formoptimierung einer konventionellen Tragflügelgeometrie verifiziert. Dazu wird das Berechnungsgebiet deutlich verkleinert, indem die dreidimensionale Profilgeometrie zunächst in zweidimensionale Profilschnittebenen überführt wird (Abb. 2).

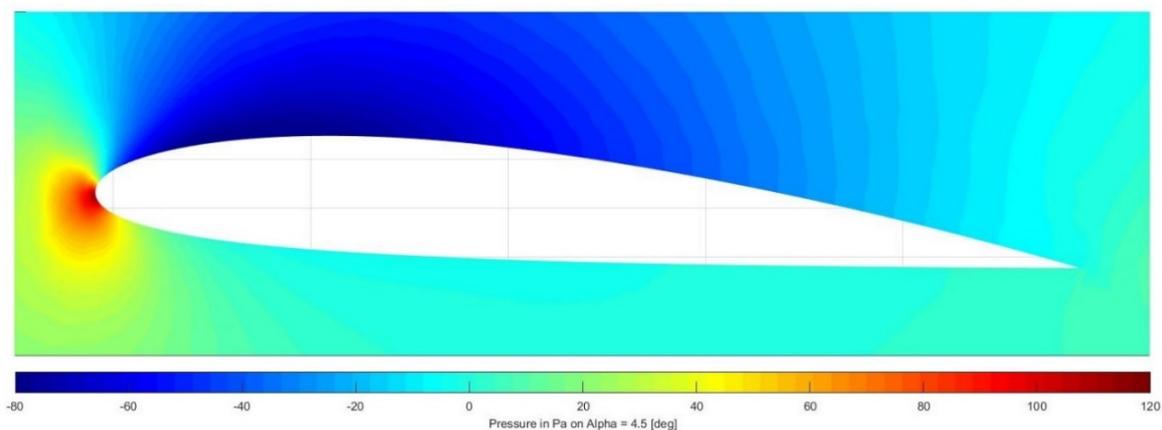


Abbildung 6 – Druckprofil der Profilschnittebene

Diese Vorgehensweise dient der Reduzierung des erforderlichen Zeitinvestment zur Optimierung und wurde erstmalig von Wu [12] initiiert. Die Grundlage des anvisierten

Modellkonzeptes wird durch eine numerische Strömungssimulation der betrachteten Profilschnittebene gebildet (Abb. 6).

Die Konturmodellierung erfolgt durch die zuvor beschriebene hochdimensionierte Punktwolke und der darauf aufbauenden Implementierung der dynamischen finiten Strömungsfelder. Als repräsentative Zielgrößen werden sowohl Widerstandsbeiwert als auch Auftriebsbeiwert definiert. Die Formoptimierung strebt eine Maximierung des Auftriebs bei gleichzeitiger Minimierung des Widerstandes an. Nach der erfolgreichen strömungsdynamischen Optimierung der zweidimensionalen Profilschnittebenen werden diese nun wieder zu dem ursprünglichen dreidimensionalen Profildesign zusammengefügt. Das Gesamtkonzept wird nun durch eine Vergleichsdarstellung von originaler und formoptimierter Profilgeometrie auf eine potentielle Verbesserung der Zielparameter im Verhältnis zum erforderlichen Zeitinvestment hin untersucht. Erste Optimierungsversuche an standardisierten NACA-Profilen ergaben ein deutlich breiteres Gestaltungsspektrum bei der Ausformung der Profilkontur mit größeren konstruktiven Freiheitsgraden im Optimierungsprozess. Die Kombination von strömungsmechanischer Optimierung und strukturmechanischem Kontrollmechanismus erweist sich als unabdinglich für die Entwicklung technisch relevanter Profilformen.

7 Fazit

In diesem Forschungsbeitrag soll der Konstruktionsprozess von strömungsdynamischen Profilen durch eine direkte und flexible Netz-Kontur-Kopplung dahingehend verbessert werden, dass die resultierende Formänderung in direkte Korrelation zu der initiierenden, charakteristischen Strömungsgröße gesetzt werden kann. Gelingt eine technische Umsetzung, können strömungsdynamische Profile auf Basis eines wesentlich exakteren Modells, mit größeren konstruktiven Freiheitsgraden in einem effizienten, schnellen Konstruktions- und Optimierungsverfahren ausgelegt werden. Dabei wird der individuelle Charakter eines jeden Profilabschnittes strömungsmechanisch erfasst und formgebend umgesetzt. Die technische Herausforderung liegt in der Ausformung der Profilkontur, wobei die darauf aufbauende technische Umsetzbarkeit einen entscheidenden Aspekt darstellt. Mögliche Fehlerquellen sind in der zweidimensionalen numerischen Strömungssimulation zu sehen. Physikalische Effekte die nur in einer dreidimensionalen Strömung auftreten,

können somit nicht erfasst werden und fließen daher auch nicht mit in das Modellkonzept ein. Nach der Entwicklung des zweidimensionalen dynamischen finiten Strömungsfeldes ist in Zukunft der dreidimensionale Ausbau möglich.

8 Literatur

- [1] A. Samad, K.-Y. Kim und K.-S. Lee, „Multi-Objective Optimization of a Turbomaschinery Blade,“ 5th Joint ASME/JSME Fluids Engineering Conference, San Diego, California USA, 2007.
- [2] A. James und S. K. K., „Multi-Objective Design Optimization of Wind,“ International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), Vol. 3, Issue 12, Indien, 2014.
- [3] G. R. Fischer, T. Kipouros und A. M. Savill, „Multi-objective Shape Optimisation for Horizontal-Axis Wind Turbine Blades,“ 53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference
20th AI, Honolulu, Hawaii, 2012.
- [4] S. Pierret, „Multi-objective and Multi-Disciplinary Optimization of Three-dimensional Turbomachinery Blades,“ 6th World Congresses of Structural and Multidisciplinary Optimization, Rio de Janeiro, Brazil, 2005.
- [5] M. Achenbach, J. Edler, R. J. Hellmig, C. Mattheck, H. Moldenhauer, W. Sachs und I. Tesari, „Entwicklung von effizienten, einfach anzuwendenden Konstruktionsprinzipien für technische Bauteile nach dem Vorbild der Natur,“ Bundesministerium für Bildung und Forschung, 2010.
- [6] K. Backhaus, W. Plinke, B. Erichson und R. Weiber, Multivariate Analysemethoden - Eine anwendungsorientierte Einführung, 15.,vollständig überarbeitete Auflage, Springer Gabler © Springer-Verlag Berlin Heidelberg1980, 1982, 1985, 1987, 1989, 1990, 1994, 1996, 2000, 2003, 2006, 2008, 2011, 2016, 2018, 2018.
- [7] S. Jung, W. Choi, . L. S. Martins-Filho und F. Madeira, „An Implementation of Self-Organizing Maps for Airfoil Design Exploration via Multi-Objective Optimization Technique,“ in *Journal of Aerospace Technology and Management*, Vol. 8., No. 2, Brasilien, 2016, pp. 193 - 202.
- [8] S. Jeong, K. Chiba und S. Obayashi, „Data Mining for Aerodynamic Design Space,“ *Journal of Aerospace Computing Information and Communication* 2, pp. 452-469, 2005.
- [9] K. Chiba, H. Morino , S. Jeong und S. Obayashi, „Data Mining for Multidisciplinary Design space of regional-jet wing,“ *IEEE Congress on Evolutionary Computation, IEEE CEC 2005*, pp. 2333 - 2340, 2005.
- [10] K. Chiba, T. Omori, Y. Sunada und T. Imamura, „Cognition of Parameters' Role on Vertical Control Device for Aerodynamic Characteristics of Aircraft Using Data Mining,“ The University of Electro-Communications; The University of Tokyo (Department of Aeronautics and Astronautics), Japan , 2015.

- [11] S. Pierret und R. A. Van den Braembussche, „Turbomachinery Blade Design Using a Navier-Stokes Solver and Artificial Neural Network,“ in *Journal of Turbomachinery, Volume 121, Issue 2*, 1999, pp. 326 - 332.
- [12] C.-H. Wu, „A General Theory of the 3D Flow in Subsonic and Supersonic Turbomachines of Axial, Radial and Mixed-Flow Types,“ National Advisory Committee for Aeronautics, Washington, 1952.

Validierung gedruckter Kurvenscheiben für einen Kurvenscheibenprüfstand in der Lehre

B. Corves, E. Hüsing, V. Bolte, M. Hüsing

Institut für Getriebetechnik, Maschinendynamik und Robotik, RWTH Aachen University

Eilfschornsteinstraße 18, 52062 Aachen

Email: corves@igmr.rwth-aachen.de, huesinge@igmr.rwth-aachen.de, volker.bolte@rwth-aachen.de, huesing@igmr.rwth-aachen.de; Internet: <https://www.igmr.rwth-aachen.de/index.php/de>

Inhalt: Kurvengetriebe finden Anwendung in vielen industriellen Maschinen. Dementsprechend ist ihre Auslegung ein wichtiger Bestandteil in der Lehre der Bewegungstechnik. Um die Theorie auch durch Praxisbeispiele zu bestärken wurde durch eine studentische Abschlussarbeit ein Kurvenscheibenprüfstand für die Lehre konzipiert und entworfen. Zur Kostenreduktion sollten die Kurvenscheiben mittels 3D-Druck hergestellt werden. Im vorliegenden Beitrag wird der Prüfstand vorgestellt und die Verwendung von gedruckten Kurvenscheiben validiert. Betrachtungsaspekte der Validierung sind dabei die Übereinstimmung und eindeutige Zuordnung der Abtriebsbewegung mit der Sollbewegung und die zugehörigen Kennwerte.

Stichwörter: Kurvenscheibenprüfstand, Lehrmodell, additive Fertigung.

Validation of 3D-printed cams for an educational purpose workbench

Abstract: Cams are still quite often used in industrial machines. Due to this fact the cams design process is important in education of design engineering. Based on a student's thesis a concept of a cam workbench for education in mechanical engineering was developed and designed. To save costs, the cams for the workbench have been manufactured by 3D-printing technology. The following paper presents the workbench for educational purposes and validates the usage of printed cams. For the validation a closer look is taken on the motion of the output link and the motion characteristics of the cams.

Keywords: cam workbench, educational model, additive manufacturing.

1 Einleitung

Auch wenn heutzutage die Verwendung von Servoantrieben stark zugenommen hat, so finden Kurvengetriebe immer noch in den unterschiedlichsten Maschinen, wie beispielsweise in Textil- und Verpackungsmaschinen Anwendung [6]. Der Grund für die

Vielzahl an eingesetzten Kurvengetrieben liegt an ihren Vorteilen, wie z.B. das hohe Maß an Bewegungssteuerung [6].

Auf Grund der Bedeutung von Kurvengetrieben in der Bewegungstechnik, ist es notwendig, den Studierenden des Maschinenwesens die Grundlagen und Besonderheiten der Auslegung von Kurvengetrieben zu vermitteln. Um das theoretische Wissen zum Auslegungsprozess anschaulich zu vertiefen, ist es sinnvoll, die theoretischen Kenntnisse an einem Prüfstand praktisch anzuwenden. An verschiedenen Institutionen werden Kurvenscheibenprüfstände bereits genutzt. Solche Prüfstände bestehen beispielsweise in der Industrie [7]. Ein anderes Gebiet ist die Lehre. So dient der Kurvenscheibenprüfstand vom „Worcester Polytechnic Institute“ dazu, den Studierenden zu zeigen, was Kurvengetriebe sind und wie diese funktionieren [5].

Bereits 2016 wurde am IGMR ein Konzept für einen Kurvenscheibenprüfstand entwickelt. Dieser basiert darauf, dass erlernte Wissen zur Auslegung von Kurvenscheiben zu vertiefen und zu visualisieren [1]. Zunächst sollen die Studierenden anhand des Prüfstandes die Funktionsweise der Kurvengetriebe mit Stößel und Hebel, die Unterschiede zwischen den Kennwerten von typischen Übertragungsfunktionen sowie den Einfluss der Hauptabmessungen kennenlernen. Abschließend sollen die Studierenden ihre gesammelten Erfahrungen dazu nutzen, selbständig eine Kurvenscheibe auszulegen und am Prüfstand zu validieren.

Für den Prüfstand sind zum einen Kurvenscheiben mit den bekannten Übertragungsfunktionen, wie ausführlich in Abschnitt 2.2 erläutert, und zum anderen die von den Studierenden ausgelegten Kurvenscheiben zu fertigen. Die Besonderheit bei der Fertigung ist, dass Kurvenscheibenkonturen durch Kurven mit sich ändernden Krümmungen und Anstiegen charakterisiert sind [4; 6]. Die Herstellung von Kurvenscheiben durch typische traditionelle Verfahren und Materialien, wie beispielsweise durch eine CNC-Maschine [6], kann dementsprechend kostspielig werden. Alle Kurvenscheiben werden deshalb mittels 3D-Druck-Verfahren direkt am Institut hergestellt. Die Gründe für die additive Fertigung sind die Ersparnis von Zeit und Kosten. Außerdem wird der Vorteil der additiven Fertigung genutzt, beliebige Geometrien ohne Einsatz produktspezifischer Werkzeuge herzustellen [3].

Die Veröffentlichung konzentriert sich auf die Darstellung der Anwendung der gedruckten Kurvenscheiben beim Kurvengetriebe mit Stößel. Dabei wird unter anderem auf folgende Fragestellungen eingegangen:

- Führen die gedruckten Kurvenscheiben zur gewünschten Stößelbewegung?
- Entsprechen die Kennwerte der Kurvenscheiben den Sollkennwerten der jeweiligen Übertragungsfunktion?
- Können die gemessenen Bewegungen den entsprechenden Übertragungsfunktionen eindeutig zugeordnet werden?

2 Hintergrund

2.1 Aufbau und Funktionsweise des Kurvenscheibenprüfstandes

Das Herzstück des Kurvenscheibenprüfstandes bilden die beiden Kurvengetriebe, einmal das mit einem Stößel als Abtriebsorgan und einmal das mit Hebel, siehe Bild 1. Basis beider Getriebetypen ist eine im Gestell gelagerte Welle, auf der mehrere Kurvenscheiben mittels lösbarer Welle-Nabe-Verbindungen befestigt werden können, um den Studierenden schnell Vergleiche unterschiedlicher Kurven zu ermöglichen. Aktuell sind auf der Welle die Kurvenscheiben mit typischen Übertragungsfunktionen montiert.

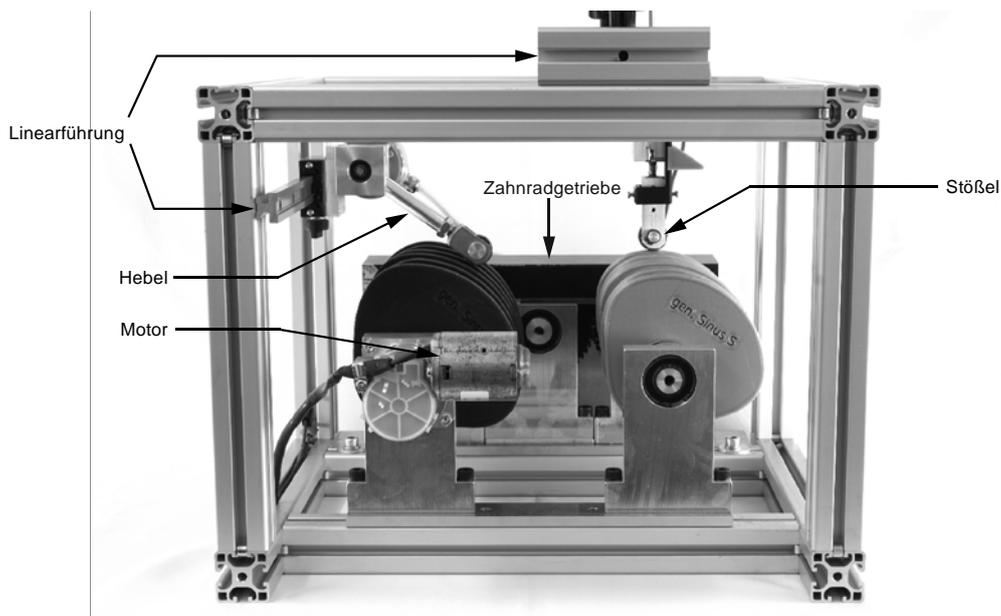


Bild 1: Kurvenscheibenprüfstand

Für beide Getriebetypen wird die Zwangslaufsicherung durch Kraftschluss mittels einer Rückstellfeder realisiert. Um zwischen den verschiedenen Kurvenscheiben einfach wechseln zu können, sind beide Eingriffsglieder jeweils auf einer Linearführung befestigt. Damit können Stößel oder Hebel horizontal in Richtung der Kurvenscheibendrehachse verschoben werden. Für den Stößel kann diese Linearführung wiederum senkrecht zur Kurvenscheibendrehachse horizontal verschoben werden. Diese horizontale Verschiebung ermöglicht beim Kurvengetriebe mit Stößel die Exzentrizität variabel einzustellen. Der Grund ist, dass auf diese Weise die Studierenden den Einfluss der Hauptabmessungen kennenlernen sollen. Im Fall des Stößels ist das ausschließlich über die Veränderung der Exzentrizität möglich, weil die restlichen Hauptabmessungen, wie beispielsweise der Grundkreisradius, schon durch die gefertigten Kurvenscheiben festgelegt sind. Analog sind beim Hebel die Hauptabmessungen durch die Gestelllänge und die Hebellänge bestimmt. Um nicht die Hebelabmessungen zu verändern, wird im Versuchsmodell die Gestelllänge variiert. Die Linearführung des Hebels ist dementsprechend relativ zum Gestell vertikal verschiebbar.

Der Prüfstand wird über einen Elektromotor angetrieben. Damit der Motor beide Wellen gleichzeitig treibt, sind beide Wellen über ein Zahnradgetriebe konstanter Übersetzung miteinander verbunden.

2.2 Bewegungsaufgabe

Am Kurvenscheibenprüfstand lernen die Studierenden unter anderem die Unterschiede zwischen typischen Übertragungsfunktionen kennen. Dementsprechend beinhaltet der Prüfstand einen festgelegten Satz an Kurvenscheiben mit jeweils unterschiedlichen Übertragungsfunktionen.

Alle Arbeitskurven der Kurvenscheiben gründen auf einer Rast-in-Rast-Bewegung (R-R-Bewegung). Die Entscheidung für eine R-R-Bewegung beruht darauf, dass die R-R-Bewegung am häufigsten angewendet wird [6] und die Studierenden ihr Wissen anhand einer einfachen Bewegungsaufgabe vertiefen sollen. Die realisierten R-R-Bewegungsgesetze besitzen den selben maximalen Abtriebsparameter, unterscheiden sich aber in der Hubanstiegs- und Hubabstiegsfunktion. Insgesamt sind sechs verschiedene Übertragungsfunktionen realisiert, wodurch jeweils sechs unterschiedliche Kurvenscheiben

für die beiden Getriebetypen existieren. Die ausgewählten Funktionen sind die quadratische Parabel, das 2-3-Polynom, die Sinuslinie, das 3-4-5-Polynom, 4-5-6-7-Polynom und die geneigte Sinuslinie. Die ersten drei genannten Funktionen verletzen die Empfehlung, Funktionen mit stetigem Verlauf in erster und zweiter Ordnung zu verwenden [2; 4; 8]. Aber die Folgen dieser Missachtung sind aus Sicht der Lehre wichtig.

Ein charakteristischer Kennwert, der den einzelnen Hubfunktionen eindeutig zugeordnet werden kann, ist der

Geschwindigkeitskennwert

$$C_v = \frac{\max |\dot{y}|}{\dot{x}} \cdot \frac{x_{P/N}}{y_H} = \max |f'(z)| \quad (1)$$

und der Beschleunigungskennwert

$$C_a = \frac{\max |\ddot{y}|}{\ddot{x}} \cdot \frac{(x_{P/N})^2}{y_H} = \max |f''(z)| \quad (2)$$

mit der normierten Bewegungsfunktion $f(z)$, dem Antriebsparameter x und dessen Maximalwerten x_P und x_N sowie dem Abtriebsparameter y und seinem Maximalwert y_H [2; 4]. Die Geschwindigkeits- und Beschleunigungskennwerte der sechs Übertragungsfunktionen sind in Tabelle 1 im Kapitel 3.1 aufgeführt oder können [2] entnommen werden.

Für das Verfahren zur Auslegung der einzelnen Kurvenscheiben wird auf die vorrangigere Veröffentlichung [1] verwiesen.

3 Messung und Validierung

Zur Validierung, ob 3D-gedruckte Kurvenscheiben beim Kurvengetriebe mit Stößel in der Lehre eingesetzt werden können, wurden die von den sechs Kurvenscheiben erzeugten Stößelbewegungen einzeln erfasst. Bei der Messung hat der Motor eine Antriebsspannung von 9000mV und dreht mit etwa 62 U/min. Am Stößel wird der Hub über einen Linearpotentiometer PY2 der Firma Gefran und die Beschleunigung über den Beschleunigungsaufnehmer PCB 338A35 aufgezeichnet. Mittels des 24-bit

Universalmeßverstärker QuantumX MX440B werden die Daten verstärkt. Die Aufzeichnungsdauer beträgt etwa 19 s und die Abtastfrequenz 1200 Hz.

Für die Auswertung wird die jeweilige Geschwindigkeit des Stößels über numerische Integration der Beschleunigungsdaten bestimmt. Der Grund, die Geschwindigkeit nicht über numerische Differentiation des gemessenen Hubes zu ermitteln, liegt unter anderem daran, dass die numerische Differentiation zu einem verrauschten Ergebnis führen kann. Die numerische Integration glättet die Messwerte wiederum [6].

In den nachfolgenden zwei Abschnitten 3.1 und 3.2, werden die Messdaten hinsichtlich der in der Einleitung erwähnten Fragestellungen analysiert.

3.1 Ergebnisse

Zur Veranschaulichung sind die Messdaten von Hub, Geschwindigkeit und Beschleunigung in Perioden vereinzelt und jeweils zusammen mit der entsprechenden Bewegungsaufgabe (Sollbewegung) über die Dauer einer Periode dargestellt. Exemplarisch für die sechs Kurvenscheiben, zeigt Bild 2 die überlagerten Perioden für die Kurvenscheibe mit quadratischer Parabel und mit 4-5-6-7-Polynom.

Zu erkennen ist, dass der Stößel wiederkehrend bei den einzelnen Perioden den Sollhub und die Sollgeschwindigkeit erfährt. Die gemessene Beschleunigung ist stark verrauscht und setzt sich aus hochfrequenten Ausschlägen zusammen. Die entsprechende Sollbeschleunigung kann aus den Messungen nicht abgelesen werden. Basierend auf einer Frequenzanalyse werden die Beschleunigungsdaten sequenziell durch ein Tiefpassfilter und ein Gaußfenster prozessiert. Um auch bei unstetigen Beschleunigungsverläufen, wie beispielsweise bei der quadratischen Parabel, eine sinnvolle Filterung zu gewährleisten, wird eine Grenzfrequenz für das Tiefpassfilter aus der Frequenzanalyse des Sollsignals abgeleitet.

Die Breite des Gaußfensters ist eins höher als der Quotient aus Abtastfrequenz und Grenzfrequenz. Das Ergebnis ist in Bild 3 dargestellt. Hier ist die gewünschte Sollbeschleunigung des Stößels in den Messungen deutlich wiederzuerkennen.

Die Messungen von Hub, Geschwindigkeit und Beschleunigung weichen über die einzelnen Perioden wenig voneinander ab. Die hochfrequenten Ausschläge in den Geschwindigkeits-

und Beschleunigungskurven tauchen zudem wiederkehrend in allen Perioden zum gleichen Zeitpunkt auf.

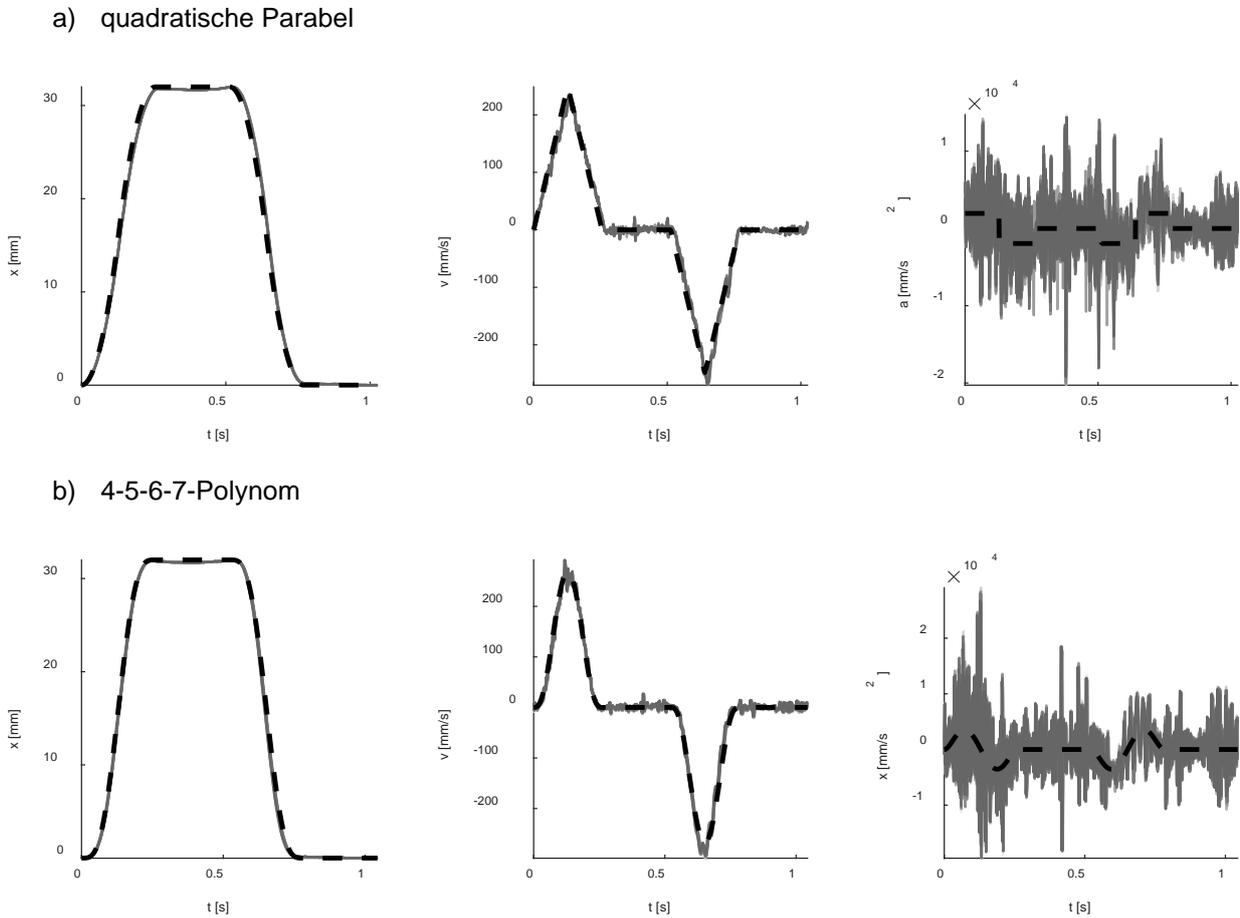


Bild 2: Vergleich der Sollkurve (gestrichelt) mit den Messdaten (graue Linien) über eine Periode

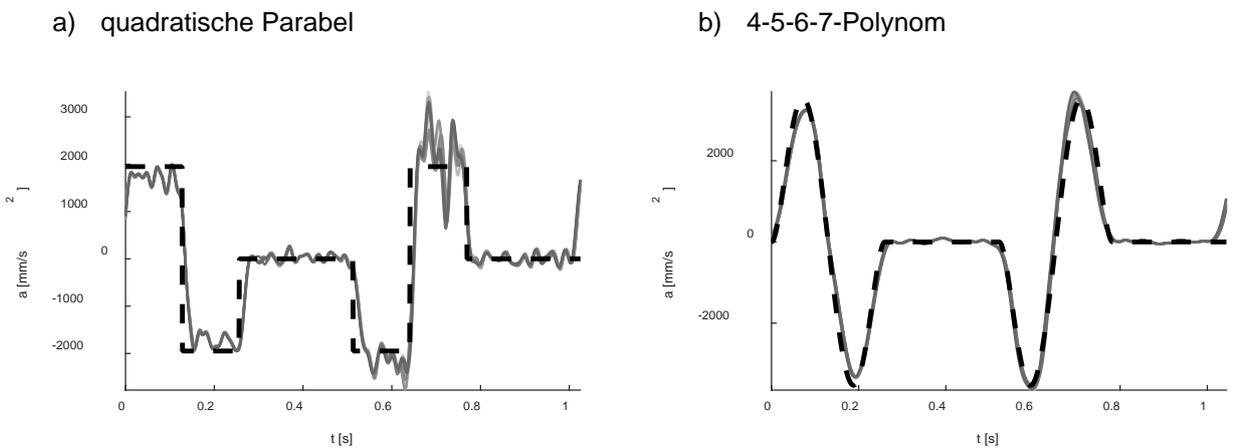


Bild 3: Vergleich der Sollkurve (gestrichelt) mit der gefilterten und geglätteten gemessenen Beschleunigung (graue Linien) über eine Periode

Gütekriterien für Kurvengetriebe sind, wie im Kapitel 2 erwähnt, der Geschwindigkeits- und Beschleunigungskennwert. Es ist zu untersuchen, ob bei Kurvengetrieben mit gedruckten Kurvenscheiben die Kennwerte den theoretischen Vorgaben entsprechen. Dazu sind die Extrema der Hubanstiege und -abstiege der Geschwindigkeitskurven sowie der gefilterten und geglätteten Beschleunigungskurven über den Perioden gemittelt und entsprechend Gleichung (1) und (2) ausgewertet worden. Das Ergebnis ist in Tabelle 1 zusammengefasst. Die Ergebnisse zeigen, dass die ermittelten Geschwindigkeitskennwerte bei allen Übertragungsfunktionen im Hubabstieg eine höhere Abweichung vom Sollwert aufweisen als im Hubanstieg. Insgesamt liegen die Abweichungen beim Hubabstieg zwischen 7 und 15% und die im Hubanstieg zwischen 0,91 und 8%. Bei den Beschleunigungskennwerten liegt die Differenz vom Soll zwischen 2 und 19%.

Tabelle 1: Vergleich von den Soll- und Istwerten des Geschwindigkeits- und Beschleunigungskennwert

	Geschwindigkeitskennwert					Beschleunigungskennwert				
	Soll	Hubanstieg		Hubabstieg		Soll	Hubanstieg		Hubabstieg	
			Δ [%]		Δ [%]			Δ [%]		Δ [%]
quadratische Parabel	2	1,88	5,86	2,14	6,76	4	3,26	18,62	3,73	6,72
2-3-Polynom	1,5	1,58	5,07	1,70	13,36	6	5,38	10,35	5,85	2,47
3-4-5-Polynom	1,88	1,93	2,76	2,06	9,58	5,77	5,44	5,66	6,36	10,19
4-5-6-7-Polynom	2,19	2,36	7,97	2,39	9,51	7,51	7,02	6,48	7,65	1,81
Sinuslinie	1,57	1,59	0,97	1,80	14,69	4,93	5,07	2,78	5,69	15,45
geneigte Sinuslinie	2	1,98	0,91	2,27	13,40	6,28	5,42	13,81	6,5	3,47

Interessant ist nun zu klären, ob die gemessenen Stößelbewegungen den entsprechenden Bewegungsaufgaben (Sollbewegungen) möglichst eindeutig zugeordnet werden können. Das ist besonders dann interessant, wenn z.B. nur Messergebnisse vorliegen, aber das ursprüngliche Bewegungsgesetz unbekannt ist. In Bild 2 und 3 ist erkennbar, welche Messergebnisse jeweils der quadratischen Parabel und welche dem 4-5-6-7-Polynom zuzuweisen sind. Beide Übertragungsfunktionen sind allerdings in ihrer Sollgeschwindigkeit und –beschleunigung sehr verschieden. Vor diesem Hintergrund sind Messergebnisse von Übertragungsfunktionen viel interessanter, welche sich in ihrer 0., 1. und 2. Ordnung ähneln. Daher werden die Messungen vom 4-5-6-7-Polynom zusätzlich mit den Sollbewegungen

vom 3-4-5-Polynom und der geneigten Sinuslinie verglichen, siehe Bild 4. In allen Ordnungen unterscheiden sich die Messkurven vom 4-5-6-7-Polynom zu den Sollkurven vom 3-4-5-Polynom und der geneigten Sinuslinie. Die Abweichung ist bei der Beschleunigung am stärksten zu erkennen. Wie erwartet weichen dort in den Hüben die Steigungen und Extremwerte zwischen Messung und Soll deutlich voneinander ab.

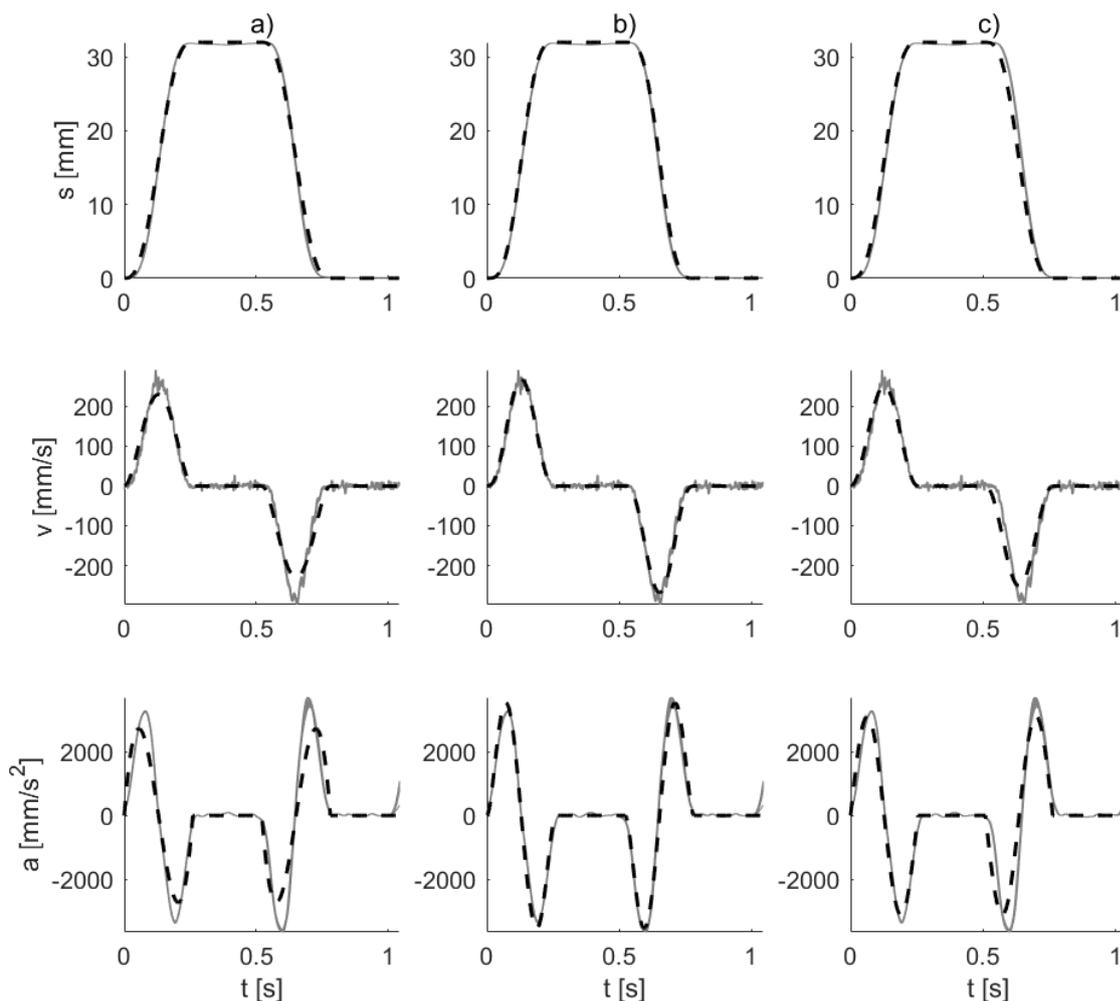


Bild 4: Vergleich der Messkurven vom 4-5-6-7-Polynom mit den Sollkurven vom 3-4-5 Polynom a), vom 4-5-6-7-Polynom b) und von der geneigten Sinuslinie c)

3.2 Diskussion

Aus den vorangegangenen Ergebnissen ist zu schließen, dass die gedruckten Kurvenscheiben zuverlässig die gewünschten Bewegungsaufgaben erzeugen. Dies ist

darauf zurückzuführen, dass über alle Perioden hinweg die Bewegung des Stößels in Form mit dem Soll übereinstimmt und die ermittelten Kennwerte auch den theoretischen Vorgaben entsprechen. Zwar gibt es bei den Kennwerten Abweichungen von mehr als 10%, dies beruht jedoch darauf, dass Geschwindigkeits- und Beschleunigungskurven überlagert sind von Ausschlägen hoher Frequenzen. Zusätzlich bezieht sich der Beschleunigungskennwert auf gefilterte und geglättete Messwerte. Diese mathematischen Operationen führen zu einem Verlust an Informationen, welcher vom Grad der Filterung und Glättung abhängt. Die Genauigkeit der Kennwerte ist für die Anwendung in der Lehre ausreichend.

Bei den Ergebnissen der Kennwerte stellt sich zudem heraus, dass die Geschwindigkeitskennwerte beim Hubanstieg eine geringere Abweichung vom theoretischen Kennwert aufweisen als beim Hubabstieg. Die Fragestellung ist, ob der Unterschied in der Höhe der Abweichung auf Fehler in der Fertigung zurückzuführen ist oder auf Auswirkungen der Trägheitskräfte. Um die Fragestellung zu klären, sollten die Messungen bei umgekehrter Drehrichtung nochmals ausgeführt werden. Sind bei dieser Messung die Abweichungen der Geschwindigkeitskennwerte höher beim Hubanstieg als Hubabstieg, liegen Fertigungsfehler vor. Bleiben die Abweichungen jedoch beim Hubabstieg höher, ist eine Betrachtung der Trägheit durchzuführen.

Die Ergebnisse der Auswertung veranschaulichen außerdem, dass die Messungen indem sie mit Sollfunktionen verglichen werden, eindeutig ihrer entsprechenden Übertragungsfunktion zugeordnet werden können.

Allerdings stellt sich heraus, dass die Beschleunigungsmessung gefiltert und geglättet werden muss, damit sie für Untersuchungen brauchbar ist. Das gleichbleibende Rauschen über alle Perioden lässt auf Unregelmäßigkeiten in der Lauffläche der Kurvenscheiben schließen. Bild 5 zeigt exemplarisch die Lauffläche der Kurvenscheiben. Mit bloßem Auge ist die Welligkeit der Oberfläche zu erkennen. Um das Rauschen zu reduzieren sollten die Kurvenscheiben dementsprechend in höherer Qualität gedruckt und anschließend die Lauffläche nachbearbeitet werden.

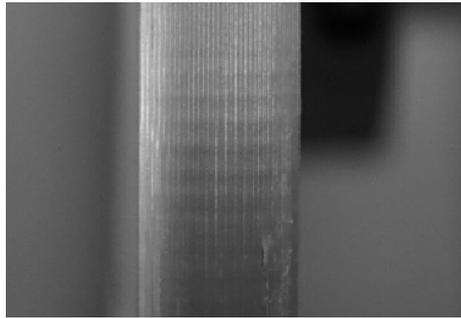


Bild 5: Ausschnitt der Lauffläche einer Kurvenscheibe

4 Schlussfolgerung

In der Veröffentlichung wurde die Verwendung von gedruckten Kurvenscheiben in einem Kurvenscheibenprüfstand für die Lehre validiert. Es wurden Kurvenscheiben mit typischen Übertragungsfunktionen gefertigt und die Stößelbewegungen gemessen. Es stellte sich heraus, dass die Kurvenscheiben die gewünschten Bewegungsaufgaben erzeugten und die ermittelten Geschwindigkeits- und Beschleunigungskennwerte ihrem Sollwert entsprachen. Weiterhin konnten die gemessenen Bewegungen eindeutig ihren entsprechenden Übertragungsfunktionen zugeordnet werden. Für die Anwendung in der Lehre müssen die Beschleunigungsmessungen allerdings bedingt durch hohes Rauschen gefiltert und geglättet werden. Es wird zudem empfohlen die Qualität des Druckes zu erhöhen bzw. die Lauffläche der Kurvenscheiben nachzubearbeiten, um das Rauschen zu reduzieren. Das Rauschen beruht nämlich auf Unregelmäßigkeiten in der Oberfläche der Kurvenscheiben. Es ist anzumerken, dass die Validierung der gedruckten Kurvenscheiben für das Kurvengetriebe mit Hebel noch aussteht.

Die erfolgreiche Validierung der gedruckten Kurvenscheiben führt zu weiteren möglichen Untersuchungen, die die Studierenden am Kurvenscheibenprüfstand betrachten können. Eine Überlegung ist, dass die Studierenden neben der Bestimmung von Geschwindigkeits- und Beschleunigungskennwert den dynamischen Momentenkennwert ermitteln. Der dynamische Momentenkennwert lässt eine Aussage zur Rückwirkung der Massenträgheit des Abtriebs auf das Antriebsglied zu und verdeutlicht somit den Studierenden die Wichtigkeit stoß- und ruckfreie Bewegungsgesetze anzustreben.

Abschließend ist eine weitere Überlegung, dass die Studierenden auch das Verfahren der numerischen Integration der Beschleunigung mit der numerischen Differentiation des Hubes zur Bestimmung der Geschwindigkeit miteinander vergleichen und bewerten.

Literatur

- [1] Chen, H.; Nguyen, T. T. N.; Müller, M.; Kurtenbach, S.; Pan, C.; Hüsing, M.; Corves, B., Application of a Cam Workbench for Education in Mechanical Engineering, In: Corves, B. et al. (Hrsg.), *New advances in mechanisms, mechanical transmissions and robotics*, Cham: Springer, 2017, ISBN 978-3-319-45449-8, S. 177–186.
- [2] Fricke, A.; Günzel, D.; Schaeffer, T., *Bewegungstechnik, Konzipieren und Auslegen von mechanischen Getrieben*, München: Fachbuchverlag Leipzig im Carl-Hanser-Verlag, 2015, ISBN 9783446444102.
- [3] Gebhardt, A., *Additive Fertigungsverfahren*, München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2016, ISBN 978-3-446-44401-0.
- [4] Kerle, H.; Corves, B.; Hüsing, M., *Getriebetechnik, Grundlagen, Entwicklung und Anwendung ungleichmäßig übersetzender Getriebe*, Wiesbaden: Springer Vieweg, 5., überarbeitete und erweiterte Auflage, 2015, ISBN 978-3-658-10056-8.
- [5] Morehouse, D. M.; Tashman, J. D., *Redesign of the Cam Dynamics Test Machine, Major Qualifying Project*, Worcester Polytechnic Institute, 2009.
- [6] Norton, R. L., *Cam design and manufacturing handbook*, New York: Industrial Press, 2. ed., 2009, ISBN 978-0-8311-3367-2.
- [7] Ottaviano, E.; Mundo, D.; Danieli, G. A.; Ceccarelli, M., Numerical and experimental analysis of non-circular gears and cam-follower systems as function generators, In: *Mechanism and Machine Theory*, 43 (2008) 8, S. 996–1008, DOI 10.1016/j.mechmachtheory.2007.07.004.
- [8] VDI 2143-1, *Bewegungsgesetze für Kurvengetriebe*, Norm, VDI Verein deutscher Ingenieure, Düsseldorf: VDI-Verlag GmbH, 1980.

Methodisches Vorgehen bei der Entwicklung eines Kernmaterialkonzeptes für Rotorblätter einer Großwindkraftanlage

Nele Kayser, Stefan Zorn, Hendrik Klein*, Kilian Gericke

Lehrstuhl für Produktentwicklung, Universität Rostock

Albert-Einstein-Str. 2, 18059 Rostock

Email: Stefan.zorn@uni-rostock.de; Internet: <https://www.pe.uni-rostock.de/>

*Nordex Energy GmbH

Hinrichshäger Straße 60, 18146 Rostock

Internet: <https://www.nordex-online.com>

Inhalt: Die Vorgehensweise der Konstruktionsmethodik wird in der Literatur meistens an idealen Beispielen verdeutlicht, welche zu eindeutige Vorzugslösungen führen. In der Praxis ist es nicht immer so eindeutig, da die Entwicklung in einem weitläufigen Spannungsfeld mit komplexen Zusammenhängen erfolgt. Die vorliegende Arbeit liefert hierfür ein praxisnahes Beispiel, indem das methodische Vorgehen bei der Entwicklung eines Kernmaterialkonzeptes für die Herstellung von Rotorblättern einer Großwindkraftanlage geschildert wird. Das Vorgehen führt nicht zu einer adaptierbaren Verbesserung, liefert aber Erkenntnisse über Verknüpfungen in der Prozesskette.

Stichwörter: Konstruktionsmethodik, Produktentwicklung, Praxisbeispiel

Methodical Approach for the Development of a Core Material Concept for Rotor Blades of a Large Wind Turbine

Abstract: The literature generally illustrates the procedure of the design methodology with ideal examples, which lead to clear preference solutions. In practice, it is not always so easy, since the development takes place in a wide field of tension with complex interrelations. The present paper provides a practical example of this by describing the procedure for the development of a core material concept for the production of rotor blades of a large wind turbine. The procedure does not lead to an adaptable improvement but provides insights into the links in the process chain.

Keywords: design methodology, product development, case example

1 Einleitung

Die theoretische Vorgehensweise der klassischen Konstruktionsmethodik ist in der Literatur hinreichend oft beschrieben. Die Erläuterungen beziehen sich dabei oft auf altbekannte Fallbeispiele, welche ebenfalls in der universitären Lehrausbildung aufgegriffen werden. Nicht immer lassen sich alle methodischen Herangehensweisen vollständig auf neue zu bearbeitende Aufgabenstellungen übertragen. Dies führt in manchen Fällen dazu, dass die Vorgehensweise zwar verstanden wurde, aber nicht für die gegebene Aufgabe adaptiert werden kann. Weiterhin führt die methodische Vorgehensweise mit den akademischen Lehrbuchbeispielen oft zu einer eindeutigen Vorzugslösung, sodass eine kritische Interpretation bzw. ganzheitlichere Betrachtungsweise der Ergebnisse nicht verinnerlicht wird.

Die vorliegende Arbeit versucht nun an einem praxisnahen Beispiel, die Schrittfolge der Konstruktionsmethodik darzustellen. Weiterhin werden die komplexen Zusammenhänge welche sich aus dem Spannungsfeld der Prozesskette ergeben dargestellt und ihr Einfluss auf die Vorzugslösung diskutiert. Ziel der praktischen Arbeit war dabei die Weiterentwicklung eines Konzeptes für das Kernmaterial eines Rotorblattes in einer Großwindanlage mit einem Rotordurchmesser über 100 m.

2 Fallbeispiel Großwindkraftanlage

Nach dem Ausstieg aus der Atomkraft und dem Beginn der Energiewende soll in Deutschland mit Hilfe des Erneuerbaren-Energien-Gesetzes (EEG) die konventionelle Energieerzeugung durch fossile Brennstoffe langfristig zu 100 Prozent durch erneuerbare Energien (EE) ersetzt werden. 2019 leistete dabei die Nutzung der Windenergie an Land in Deutschland mit 42,1 % (126 TWh) (Umweltbundesamt, 2019) bereits den größten Anteil zu der Energieversorgung aus erneuerbaren Energien (EE). In Deutschland sind 29000 Windenergieanlagen (WEA) an Land installiert, die zusammen eine Leistung von 53000 MW produzieren.

Der weiter steigende Energieanteil, welcher durch EE abgedeckt werden soll, sowie der begrenzte Platzbedarf an Land führen dazu, dass die notwendige Erhöhung der Energieausbeute der WEA mit einer Aufwärtsskalierung der Anlagen einhergeht (Abbildung 1). Dies widerspiegelt sich sowohl in den steigenden Nabenhöhen als auch in den zunehmenden Rotordurchmessern.

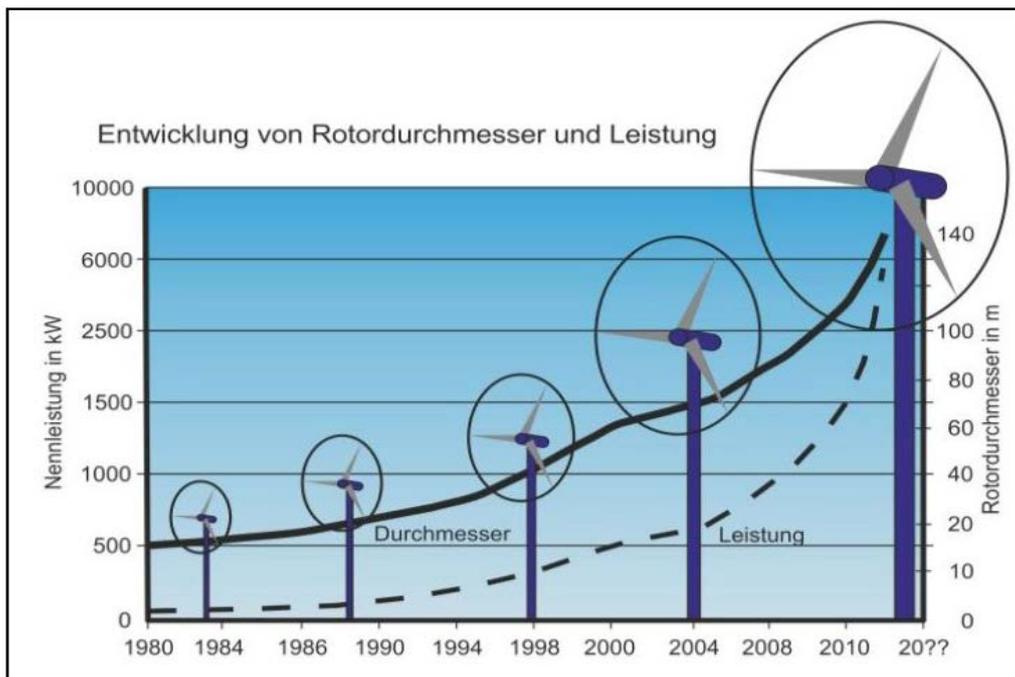


Abbildung 1: Entwicklung der Rotordurchmesser und Anlagenleistung [2]

Der durchschnittliche Leistungsbereich heutiger Anlagen (Stand 2019) liegt zwischen 3 und 3,5 MW mit einer gemittelten Nabenhöhe von 133 m und einem durchschnittlichen Rotordurchmesser von 122 m [3]. Ein Hersteller von Onshore-WEA ist die Nordex Energy GmbH. Die Spitzenwerte ihrer aktuell größten Anlage der Delta4000 Serie, die N163/5.X liegen bei einer Leistung von 5,0-5,X MW. Die maximale Turmhöhe beträgt bis zu 170 m und bei einem Rotordurchmesser von 163 m [4]

2.1 Steigende Anforderungen an die Rotorblätter

Durch die steigende Rotorblattlänge ergeben sich neue Herausforderungen an die Konstruktion. Rotorblätter ab einer Länge von 70 Metern weisen ein typisches Eigengewicht von etwa 20 Tonnen pro Blatt auf, welches wechselnde Zug- und Druckkräfte während des Rotorlaufes auf die Längsrichtung des Blattes erzeugt. Die Gewichtskraft nimmt von der Blattspitze zur Wurzel hin zu und verursacht hier große Biegemomente [5]. Bei Horizontalachsen-Anlagen bewirken die Eigengewichte zusätzliche Wechsellasten. Deshalb hat ein Rotorblatt an der Wurzel dickere Profile, welche auch die Festigkeitsanforderungen an dieser Stelle erfüllen, die zur Spitze hin immer schlanker werden. Durch die hohen Geschwindigkeiten ($v_{\text{spitze}}=320 \text{ km/h}$ bei der N163) greifen an den Rotorenden hohe Zentrifugalkräfte an, die eine hohe Zerreißfestigkeit der verwendeten Materialien erfordern. Die Effizienz der Gesamtanlage wird dabei in erster Linie von der

Wahl des Materials beeinflusst. Bei der Auswahl der Werkstoffe ist besonders eine hohe Beulsteifigkeit von Interesse, da es bei Rotorblättern häufiger zu einem Stabilitätsversagen in Form einer Beulung kommt als zu einem Spannungsversagen, welches aufgrund einer Überschreitung der vom Werkstoff ertragbaren Spannungen auftritt [6].

2.2 Nordex

Seit der Gründung 1985 entwickelt und produziert Nordex WEA in der Multimegawattklasse und beschäftigt über 6000 Mitarbeiter an Produktionsstätten in Deutschland, Spanien, Brasilien, den USA, Indien, Argentinien und Mexiko. Nordex hat in dieser Zeit mehr als 6000 Horizontalachsen-WKA mit drei Rotorblättern für den Onshore-Bereich mit zusammen über 25 GW Windenergieleistung in mehr als 40 Ländern installiert. Mit Einführung der Multi-MW-Plattform im Jahr 2000 liefert Nordex Anlagentypen der Generation Gamma, Delta und Delta4000 sowie die seit der Übernahme von Acciona Windpower im Jahr 2016 hinzugekommenen AW3000-Anlagen.

Die sich gerade in der Entwicklung befindende Anlage von Nordex nennt sich N163/5.X und gehört zur Delta4000-Anlagengeneration von Nordex. Das N in der Bezeichnung steht für Nordex und die Zahl 163 beschreibt den Rotordurchmesser der Anlage. Der zweite Teil der Anlagenbezeichnung entspricht der Nennleistung der WEA in MW. In diesem Fall besitzt die Anlage 5 bis 5,X MW, die je nach Standort- und Kundenanforderungen anzupassen sind.

2.3 Aufbau und Herstellung der Rotorblätter

Nordex fertigt Rotorblätter in differentieller Bauweise, diese ist in Abbildung 2 anhand des NR65.5 dargestellt. NR steht hier für Nordex Rotorblatt und die Zahl gibt den halben Rotordurchmesser an, d. h. den Abstand der Blattspitze zum Nabenmittelpunkt. Es unterteilt sich grundlegend in zwei Halbschalen, eine der Saug- und eine der Druckseite, die unabhängig voneinander produziert und zusammen mit den vorgefertigten Einzelkomponenten Abschlusssteg (AST), Hauptsteg (HS), Endkantensteg (EKS), auch Fahnensteg genannt sowie je Schale ein Haupt- (HG) und Endkantengurt (EKG) verklebt bzw. durch Laminate verbunden werden. Diese Bauweise wird als aufgelöste Bauweise bezeichnet und von einem Großteil der WEA-Hersteller angewendet.

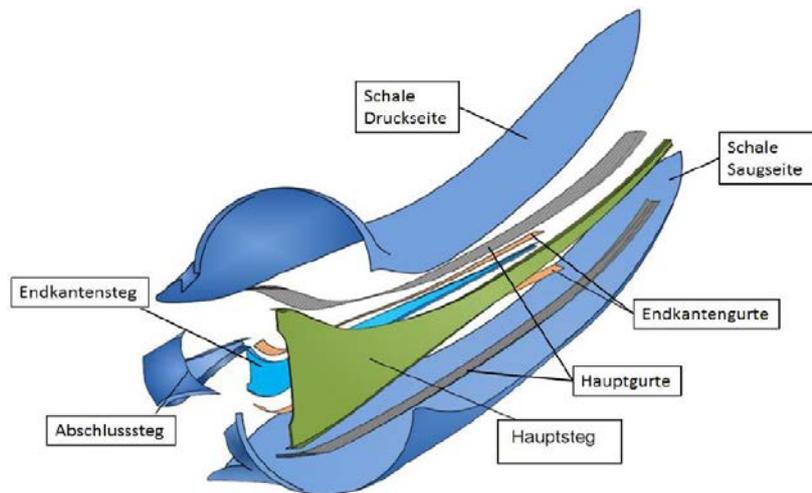


Abbildung 2: Strukturaufbau des NR65.5 [7]

Um das Eigengewicht von Rotorblättern möglichst gering zu halten und gleichzeitig eine hohe Stabilität zu generieren, werden die Schalen und Stege in Sandwichbauweise (Abbildung 3) gefertigt. Als Fasermaterial für die Deckschichten kommen im modernen Rotorblattbau maßgeblich Glasfaser mit Kunststoffen in Form von Epoxid- oder Polyesterharz als Matrix zum Einsatz. Um einen Betrieb über die Lebensdauer von 25 Jahren zu gewährleisten, muss das Kernmaterial der Sandwichstrukturen eines Rotorblattes zahlreichen Anforderungen genügen. Die Rotorblätter von Nordex nutzen dafür sogenannten Voll- und Schaumkerne in Form von Kunststoffschäumen und Balsaholz.

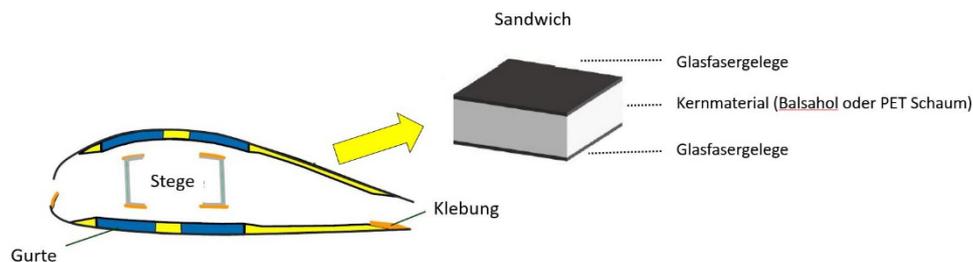


Abbildung 3: Sandwichbauweise in den Rotorblättern (in Anlehnung an [7])

Heutzutage beläuft sich die Länge eines Nordex-Rotorblattes auf bis zu 80 Meter. Solche Längen können in vielen Fertigungsschritten nicht maschinell gefertigt werden und verlangen einen hohen Handarbeitsaufwand, woraus sich weitere Herausforderungen ergeben. Das manuelle Einlegen des PET-Schaumes als Kernmaterial, sowie das Einlegen und Positionieren der Glasfasergelege ist in der nachfolgenden Abbildung 4 dargestellt.



Abbildung 4: Manuelles einlegen des Kernmaterials (links) und des Glasfasergeleges (rechts)

Die durchgeführte Kostenanalyse ergab, dass trotz des hohen manuellen Anteils in der Produktion. Die Kosten für die eingesetzten Materialien dominieren (60%-80%). Der Anteil des Kernmaterials beträgt dabei etwa 10% mit einem Volumen zwischen 10 -15 m³.

Für die Herstellung und Entwicklung des Kernmaterials eines Rotorblattes sind verschiedene Prozesse von externen und internen Instanzen notwendig (Abbildung 5).

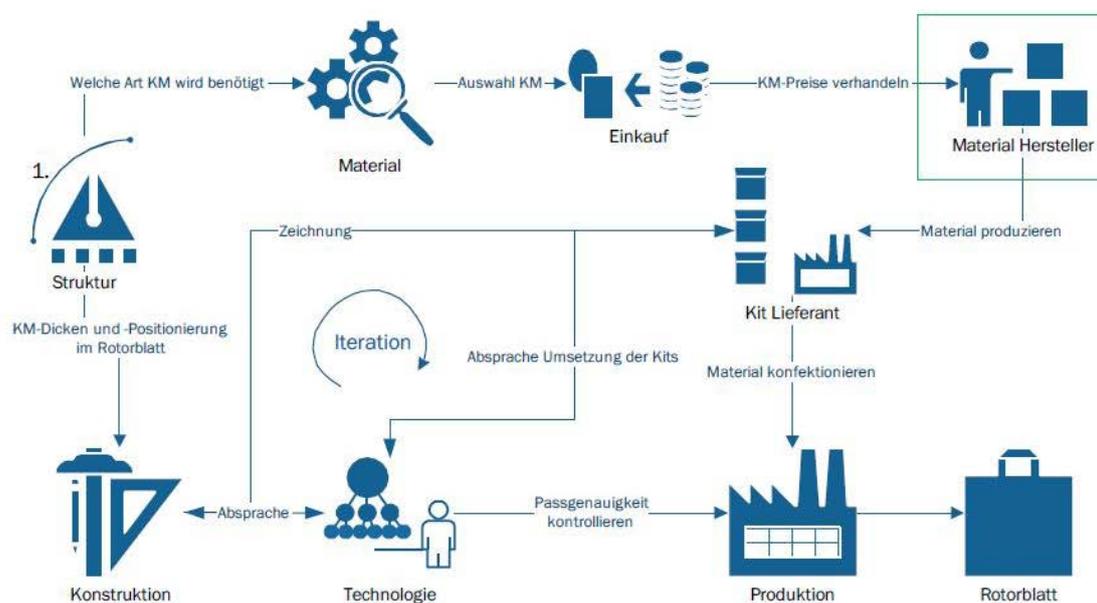


Abbildung 5: Ablauf der Kernmaterialentwicklung und -herstellung bis zur Rotorblattproduktion

Das Kernmaterial wird von externen Herstellern bereitgestellt, welche entweder den PET-Schaum extrudieren oder das Balsaholz anpflanzt und zu Rohmaterialblöcken verarbeitet. Im Anschluss dessen gelangt das Rohmaterial zu einem Kit-Lieferanten. Dieser verarbeitet wiederum das Rohmaterial zu Kernmaterial-Segmenten, die für den Einbau in die Rotorblattschale geeignet sind. Welche dann in der Produktion verarbeitet werden Die

Information zu den erforderlichen Schubfestigkeiten und Steifigkeiten der einzukaufenden Materialien liefert die Konstruktionsabteilung.

3 Vorgehensweise der methodischen Konzeptfindung

Die Konzepterstellung erfolgte in Anlehnung an die Vorgehensweise der VDI 2221 [8] und den Empfehlungen nach Pahl/Beitz [9].

3.1 Systematische Datenerhebung - Experteninterviews

Für das Auffinden von Optimierungspotenziale für ein Kernmaterial Konzept eines Rotorblattes hinsichtlich Kosten, Fertigbarkeit und Implementierungsmöglichkeiten standen verschiedene Erhebungsmethoden zur Auswahl. Für die Erfassung des notwendigen Prozesswissens der beteiligten Instanzen wurden Experteninterviews durchgeführt. Diese sind am besten geeignet [10], da sie den Zugang zu den subjektiven Relevanzen, Sichtweisen, Interpretationen, Deutungen und Erklärungsmuster der Experten in diesem Bereich ermöglichen [11]. Dies war vor allem für die Erfassung der Verbesserungswünsche ausschlaggebend.

Interview Aufbau und Planung

Für die Interviews wurden Experten aus den Nordex-internen Abteilungen Blade Design, Technology Blades, Blade Materials und Mitarbeiter aus allen 3 Schichten der Produktion (Kernmaterialverarbeitung) befragt. Außerdem wurden Interviews mit zwei Kit- und einem Materialherstellen durchgeführt. Insgesamt wurden so dreizehn Experten aus sechs Bereichen befragt.

Die Experten wurden zu folgenden Themenkomplexen befragt: der Auswahl des Materials, den Eigenschaften und die Prüfung der Kernmaterialien, der Verfügbarkeit, den Lagerungsbedingungen, dem Design und der Konfektionierung sowie der Lieferung, dem Belegeprozessen und dem Vakuuminfusionsverfahren.

Die Interviewthemen wurden entsprechend der Fachbereich des Experten ausgesucht und zu Fragenkatalogen zusammengestellt. Durchgeführt wurden die Interviews entweder in einem Vor-Ort-Termin oder in einem telefonischen Gespräch, um speziell auf die von Experte zu Experte variierenden Antworten einzugehen. Die Antworten wurden notiert und für weitere Auswertungszwecke aufgezeichnet.

Ergebnisse der Erhebung

Die Kernaussage der Interviews ist die aktuelle Problematik der geringen Materialverfügbarkeit, sowohl bei Balsaholz als auch bei PET-Schaum. Beide sind die zurzeit in der Sandwichbauweise hauptsächlich zum Einsatz kommenden Kernmaterialien. Das Balsa ist vor allem aufgrund von Fehlspekulationen der Plantagenbesitzer zur Mangelware geworden und kann erst über die nächsten fünf Jahre hinweg wieder die Nachfrage vollständig decken. Die in der Windbranche überwiegend und in anderen Branchen immer mehr an Zuwachs gewinnende Sandwichbauweise fordern außerdem immer mehr Kernmaterialien wie PET-Schaum. Um der steigenden Nachfrage gerecht zu werden, bedarf es einer deutlichen Erhöhung der Produktionsmengen.

Weiterhin gab es Aussagen zu den Bereichen der problematischen Lagerung von Balsaholz, diversen Anmerkungen zu den Konfektionier-Konzepten der Materialien sowie zur Verarbeitung der kleinteiligen Kernmaterialkonzepte.

3.2 Erstellen von Lösungskonzepten

Nachdem alle Daten und Informationen in den vorausgegangenen Arbeitsschritten gesammelt wurden, galt es unterschiedliche Konzepte unter Einhaltung der an Kernmaterial gestellten Anforderungen herauszuarbeiten. Zur Erarbeitung dieser Konzepte wurde ganz klassisch ein "morphologischer Kasten" erstellt (Abbildung 6).

Der Morphologische Kasten unterteilt sich in 15 Teilmerkmale (A-O) und sechs Teilfunktionen (1-6). Die Teilmerkmale resultieren aus den Recherchen zum Stand der Technik sowie den aus den Interviews gewonnenen Informationen und sind in technische und wirtschaftliche Merkmale unterteilt. In Absprache mit dem internen, am Herstellungsprozess beteiligten Instanzen wurden die Lösungskonzepte L1 bis L6 erstellt. Aus Platzgründen erfolgt nur die Darstellung der Lösungsvarianten L1, L3 und L5 welche für die weiterführenden Betrachtungen relevant sind.

Die Lösungsvariante L1 – „Design to Cost“ versucht, die aus der Recherche gewonnenen Erkenntnisse für eine Kostenoptimierung des Kernkonzeptes zu nutzen.

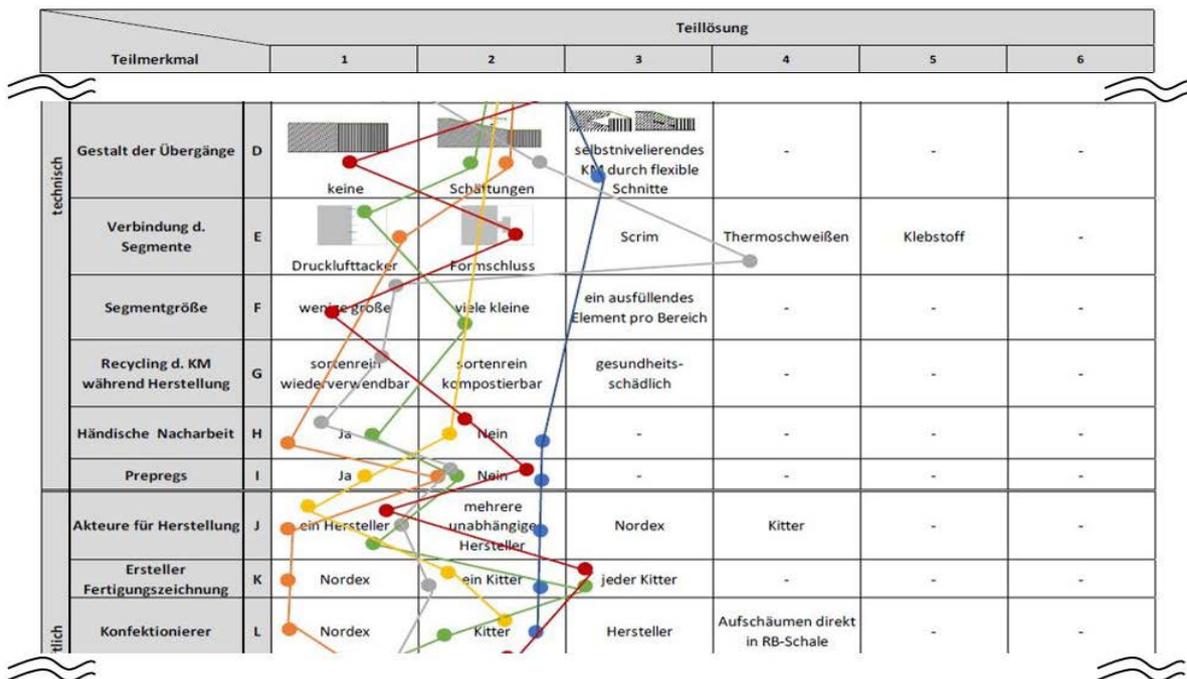


Abbildung 6: Auszug aus dem Morphologischer Kasten mit Lösungskonzepten

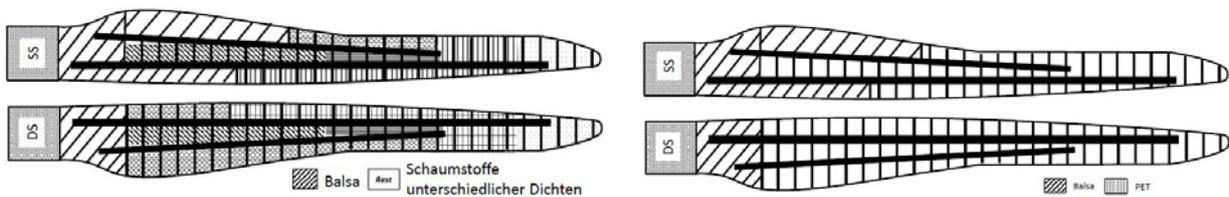


Abbildung 7: Rotorblattschale mit Kernmaterial im Lösungskonzept 1 - „Design-to-cost“ (links) und dem Lösungskonzept L3 – State-of-the-Art“ (rechts)

Die dargestellte Variante (Abbildung 7 li) beruht auf einen Materialmix mit den jeweiligen benötigten Dicken und Dichten in den entsprechenden Bereichen. Die teuersten Materialien kommen so nur in den wirklich notwendigen Blattabschnitten zum Einsatz. Die hohe Anzahl an Stufensprünge im Material sollen mit selbstnivellierende Übergänge [12] geglättet werden, um die Herstellungskosten zu mindern.

Bei der Lösung L3 „State-of-the-Art“ handelt es sich um das aktuell bei Nordex umgesetzte Gestaltungskonzept für das Kernmaterial (Abbildung re) Balsaholz kommt dabei hauptsächlich im Wurzelbereich zum Einsatz. Die Kit Lieferung erfolgt in zahlreichen kleinen Segmenten. Diese werden wie beschrieben manuell in die Schalen eingelegt, die zahlreichen Dickenübergänge in den PET-Schäumen werden durch Schäftungen im Kernmaterial überbrückt.

Das Lösungskonzept L5 –„One-Material-Design“ zeichnet sich dadurch aus, dass hier das Balsaholz substituiert wird und das gesamte Rotorblatt lediglich aus PET-Schaum unterschiedlicher Dichten aufgebaut ist (Abbildung 8).

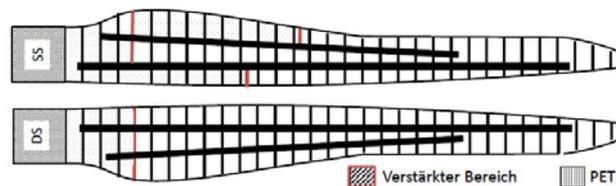


Abbildung 8: Rotorblattschale mit Kernmaterial im Lösungskonzept 5 – „One-Material-Design“

Da bisher keine adäquate Alternative zu Balsaholz auf dem Markt ist, hängt die Realisierbarkeit dieses Konzepts weitestgehend von den Entwicklungsergebnissen der Schaum-Hersteller ab. Aufgrund einer hohen Nachfrage der Rotorblatt-Hersteller an dieser Lösung, wird die Entwicklung weitläufig vorangetrieben. Für den Wurzelbereich sieht dieses Konzept eine zusätzliche Verstärkung der PET-Schäume durch sogenannte z-Pins vor. Die einzige, aber ausschlaggebende Herausforderung besteht darin, dass ein Material mit gleicher Qualität wie Balsa und mit konstanten Strukturkennwerten entwickelt wird.

3.3 Auswahl der Vorzugsvariante

Für eine technisch-wirtschaftliche Bewertung der Konzepte wurde im Folgenden mit einem Paarweisen Vergleich gearbeitet. Dieser vergleicht die das Kernmaterial betreffenden technischen (Masse, Verarbeitbarkeit und Strukturänderung) und wirtschaftlichen Kriterien (Materialverfügbarkeit, Zeitaufwand und Kosten) miteinander, um so eine Gewichtung dieser für die Bewertung der Konzepte erstellen zu können.

Die anschließende Punktbewertung erfolgte in einem interdisziplinären Team entsprechend der 4 Punkteskala der VDI 2225 Blatt 3 [13]. Das Ergebnis der Bewertung ist in der vorangegangenen Übersicht (Abbildung 9) dargestellt.

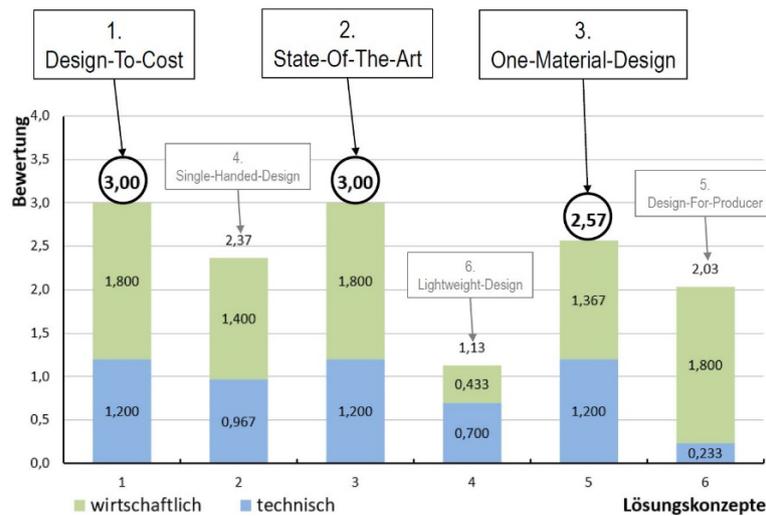


Abbildung 9: Ergebnis der Technisch- wirtschaftlichen Bewertung der Kernkonzepte

4 Auswertung

Im Anschluss an die Bewertung erfolgte der kritische Vergleich der Ergebnisse. Die schematische Darstellung zeigt, dass es keine eindeutige Vorzugslösung gibt, L1 und L3 erreichen die gleiche Punktzahl auf den Plätzen 1 und 2. Die Lösung L1 „Design-To-Coast“ ist mit Schutzrechten belegt, wodurch zusätzliche Lizenzgebühren anfallen könnten. Der aktuelle Stand der Technik (L3-State-Of-The-Art) gehört mit zu den am höchsten bewerteten Varianten, allerdings ist mit einer Verknappung der Ausgangsstoffe zu rechnen. Das Lösungskonzept L5 „One-Material-Design“ (Platz 3) geht von einer vollständigen Materialsubstitution des knappen Balsaholzes durch PET Schäume aus. Allerdings benötigt das One-Material-Design einen Ersatz für das hervorragende Steifigkeit- Gewicht- und Festigkeit-Gewicht-Verhältnis des Balsas im Wurzelbereich des Rotorblattes. Bis ein neues Material entwickelt wird, kann dieser mit verstärkenden Elementen wie beispielsweise Z-Pins ausgestattet werden. Aktuell befindet sich die Materialforschung hier noch in der Entwicklung geeigneter Materialien. Eine Umstellung auf diese Lösungsvariante wäre ohne technologische Änderungen möglich.

Durch die systematische Anwendung der Konstruktionsmethodik konnte also keine nutzbare Änderung an dem bestehenden Konzept erarbeitet werden. Allerdings gab es einige unerwartet Erkenntnisse, deren Ursache sich in allen Prozessbereichen wiederfand. Dies war die Notwendigkeit neuer Materialentwicklungen. Dies wird zusätzlich durch die steigenden Anforderungen an die Materialien getrieben und zusätzlich durch die Knappheit der aktuellen Ausgangsstoffe verstärkt. Es treten in diesem Beispiel also interessante

Verknüpfungen in der Prozesskette auf, welche in den Lehrbüchern nicht abgebildet werden.

Literatur

- [1] Umweltbundesamt, "Erneuerbare Energien in Zahlen," 13.03.2020, 2020. [Online]. Available: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/erneuerbare-energien/erneuerbare-energien-in-zahlen#statusquo>. [Accessed: 26-May-2020].
- [2] I. Jonuschies, "Hydrodynamisch wirkende zylindrische Radialgleitlager für die Rotorwellenlagerung in Windenergieanlagen - Beitrag zu den Einsatzmöglichkeiten und Anwendungsgrenzen," Dissertation, Universität Rostock, 2015.
- [3] Deutsche WINDGUARD, "Status des Windenergiehaushaltes in Deutschland: Erstes Halbjahr 2019," 2019. [Online]. Available: <https://www.windguard.de/statistik-1-halbjahr-2019.html>. [Accessed: 26-May-2020].
- [4] N. AG, "Die N163/5.X." [Online]. Available: <https://www.nordex-online.com/de/product/n163-5x/>. [Accessed: 28-May-2020].
- [5] E. Hau, *Windkraftanlagen: Grundlagen. Technik. Einsatz. Wirtschaftlichkeit*, 6. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2016.
- [6] A. Schaffarczyk, *Einführung in die Windenergietechnik*, 2. , aktua. München: Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag., 2016.
- [7] J. (Nordex E. G. Birkemeyer, "Fertigungstechnologien für Rotorblätter -Wünsche, Anforderungen und Trends," in *DLR Wissenschaftstag 2016*, 2016.
- [8] *VDI 2221:2019-11-00 Blatt 1*. Beuth Verlag GmbH.
- [9] B. Benders and K. Gericke, Eds., *Pahl/Beitz Konstruktionslehre - Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung*, 9. Auflage. Springer Vieweg, 2020.
- [10] A. Bogner, B. Littig, and W. Menz, *Interviews mit Experten*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2014.
- [11] C. Helfferich, "Leitfaden- und Experteninterviews," in *Handbuch Methoden der empirischen Sozialforschung*, Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2019
- [12] S. Randall, "Herstellung von Windturbinenschaufeln," EP000002855130B1, 2019.
- [13] *VDI 2225 Blatt3:1998-11 Technisch - wirtschaftliche Bewertung*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.

Die Einbettung kreislaufgerechter Konstruktionsansätze in den Produktentstehungsprozess

Phillip Wallat, Armin Lohrengel

Institut für Maschinenwesen, Technische Universität Clausthal

Robert-Koch-Straße 32, D-38678 Clausthal-Zellerfeld

Email: wallat@imw.tu-clausthal.de; Internet: <https://www.imw.tu-clausthal.de>

Inhalt: Die Kreislaufwirtschaft trägt zur Rohstoffsicherung und Ressourceneffizienz bei. Die strategischen Anforderungen an Produkte für diese Wirtschaftsform beeinflussen den Produktentstehungsprozess. Der Konstrukteur auf der operativen Ebene muss diese Anforderungen berücksichtigen und umsetzen. Durch Integration der Kreislaufanforderungen in die methodische Konstruktion wird dem Konstrukteur eine Möglichkeit geboten, die Produkte in Richtung einer Kreislaufwirtschaft zu entwerfen.

Stichwörter: Methodische Produktentwicklung, Kreislaufwirtschaft, Ressourceneffizienz, Güterklassen, Rohstoffgehalt, Obsoleszenz, Fügetechnik, Produktarchitektur, Ingenieurwerkstoffe

Embedment of Engineering Design for Circular Economy into the Product Creation Process

Abstract: The Circular Economy promotes the security of raw materials and the efficiency of such. Strategic requirements, based on a circular economy, effects the product development process. Design engineers on the operative level have to take those requirements into account while designing products. By integrating those circular requirements into the methodical design approach, engineers are able to design them accordingly.

Keywords: Methodical Product Development, Circular Economy, Resource Efficiency, Classes of Good, Raw Material Content, Obsoleszenz, Joint Technology, Product Architecture, Engineering Materials

1 Die Produktentwicklung für die Kreislaufwirtschaft

Für die Entwicklung von Produkten stehen heute eine Vielzahl von Ansätzen zur Verfügung. Über die Ressourceneffizienz und den Leichtbau gibt es viele Bestrebungen die zu entwickelnden Produkte besser mit der Umwelt in Einklang zu bringen. Die Kreislaufwirtschaft strebt an, alle eingesetzten Rohstoffe in einem Kreislauf zu halten. Um dies zu ermöglichen, müssen Produkte für diese Wirtschaftsform konstruiert werden. Diese wirtschaftlichen Beziehungen in die Entwicklung einzubetten, ist von komplexen Einflüssen geprägt. Durch

methodisches Vorgehen können die wirtschaftlichen Anforderungen an den möglichen Stellen in die Entwicklung einfließen und vom Konstrukteur gezielt beeinflusst werden.

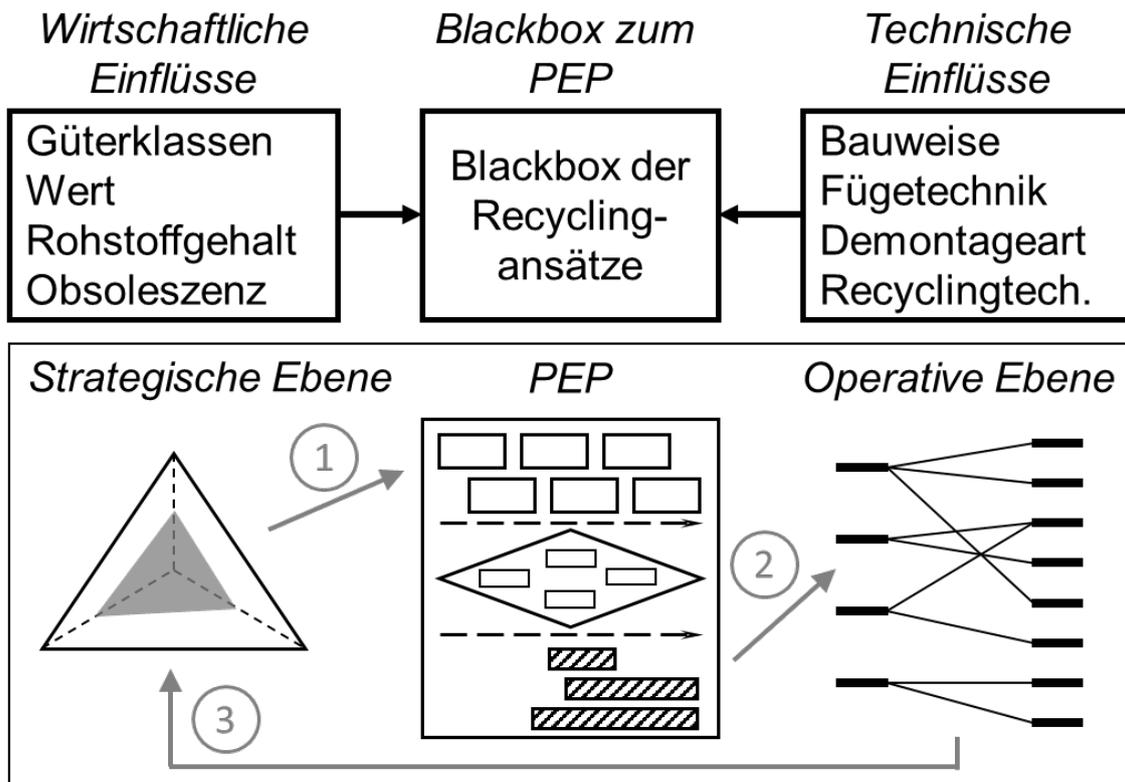


Bild 1: Übersicht der Einflüsse auf den Produktentstehungsprozess mit schematischer Darstellung der unterstützenden Elemente. Punkt 1: Einfluss der strategischen Ebenen auf den PEP; Punkt 2: zeitliche Berücksichtigung von operativen Faktoren im PEP; Punkt 3: Effekt der operativen Faktoren auf die Kreislaufgerechtigkeit des Produktes

Innerhalb des Produktentstehungsprozess (PEP) ist der Konstrukteur mit der Aufgabe konfrontiert, die wirtschaftlichen Anforderungen an das zu entwickelnde Produkt, mit den ihm zur Verfügung stehenden technischen Mitteln, zu realisieren. Eine Möglichkeit, wie eine kreislaufgerechte Konstruktion gezielt berücksichtigt werden kann ist in diesem Artikel genauer dargestellt. Die im Fokus liegenden wirtschaftlichen und technischen Einflüsse auf den PEP sind in Bild 1 gezeigt. Die Unternehmensführung auf strategischer Ebene stellt wirtschaftliche Einflüsse an das Produkt (Bild 1, Punkt 1). Diese müssen unter zeitlichen Restriktionen vom Konstrukteur auf der operativen Ebene berücksichtigt werden (Bild 1, Punkt 2) um die kreislaufgerechten Kriterien zu erfüllen (Bild 1, Punkt 3). Details zu den einzelnen Punkten werden in den folgenden Kapiteln genauer dargestellt.

2 Einflüsse der strategischen Ebene auf die Entwicklung

Der Ursprung für die Entwicklung eines neuen Produktes, sei es eine Anpassungs-/ oder Neukonstruktion entspringt der Idee einer Optimierung oder möglichen Befriedigung eines offenen Bedürfnisses. Daraus entstehen die Anforderungen an die Konstruktion. Der Einfluss der strategischen Ebene auf die Anforderungen werden an die operative Ebene weitergegeben. Über geeignete Kommunikationsmittel entstehen nur geringe Informationsverluste zwischen den Ebenen. Auf welchen Einflüssen und Faktoren diese Kommunikation stattfinden, wird im Folgenden dargestellt.

Güterklassen werden nach Kotler [1], siehe Tabelle 1, in Märkte und Güterarten unterteilt. Für den „*Business-to-Business*“ (B2B) Markt werden *Industriegüter* produziert, *Konsumgüter* werden hingegen auf dem „*Business-to-Consumer*“ (B2C) Markt vertrieben. Exemplarisch für Güter des B2B Markts

Tabelle 1: Kurzübersicht der Güterklassen

Industriegüter (B2B Markt)	Konsumgüter (B2C Markt)
Anlagegüter	Sachgüter
Zulieferteile / Rohstoffe	Güter des tägl. Bedarfs

werden *Anlagegüter* und *Zulieferteile/Rohstoffe* gewählt. Erstere werden herangezogen, um die Letzten zu Produkten zu veredeln und anschließend auf den B2C Markt als *Sachgüter* oder *Güter des täglichen Bedarfs* vertrieben werden.

Jede der genannten Güterklassen lässt sich nach drei gleichen Kriterien definieren [2]: *Wert*, *Rohstoffgehalt* und *Obsoleszenz-Wahrscheinlichkeit* (vgl Bild 2).

- *Wert* (Kurzform: Wert): Der Wert ist geprägt durch Qualität und Kosten des Produktes
- *Rohstoffgehalt* (Kurzform: Gehalt): Bestimmt durch *Rohstoffart*, *-menge* und *-preis* sowie die *Kritikalität* des Rohstoffes [3]
- *Obsoleszenz Wahrscheinlichkeit* (Kurzform: Obsoleszenz): setzt sich aus unterschiedlichen Richtungen zusammen. Diese umfassen die werkstoffliche, wirtschaftlich, funktionale und psychologische Obsoleszenz [4, 5].

Bei einer *werkstofflichen Obsoleszenz* ist der notwendige Werkstoff zum Erhalt des Produktes nicht mehr verfügbar. Werden die Kosten für eine Instandhaltung oder Reparatur für ein Produkt im Gegensatz zu einer Neuanschaffung zu hoch, handelt es sich um *wirtschaftliche Obsoleszenz*. Funktional kann ein Produkt nicht mehr nötig sein, diese *funktionale Obsoleszenz* liegt nah an der *psychologischen Obsoleszenz*, allerdings ist hier die

Funktion des Produktes noch sinnvoll, es existieren aber attraktivere Alternativen, welche den Besitzer dazu bewegen, das Produkt nicht länger zu nutzen.

Die Güterklassen lassen sich alle in einem charakteristischen Bereich eines Spinnennetzdiagramms darstellen. In Bild 2 ist exemplarisch in hellgrau der Lagebereich von Sachgütern hinterlegt und innerhalb des Bereichs ein Beispielprodukt mit einer Strich-Punkt-Linie gekennzeichnet. Der Ursprung jedes Kriteriums liegt im Zentrum des Dreiecks und hat dort die Ausprägung „minimal“. Entlang der gestrichelten Linie, in Richtung des jeweiligen Kriteriums steigt die Ausprägung, bis auf „maximal“.

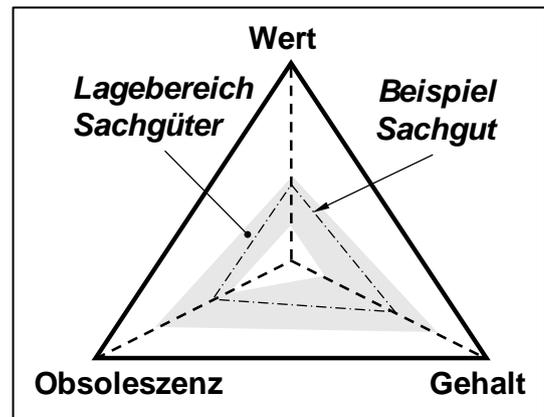


Bild 2: Wirtschaftliche Einflüsse und Anforderungen für Sachgüter im Spinnennetzdiagramm

Eine ausführlichere Beschreibung und Herleitung der Güterklassen sowie die Einordnung in das Spinnennetzdiagramm ist in Tagungsband zum Forschungsfeldkolloquium Rohstoff-sicherung und Ressourceneffizienz der TU Clausthal [2] zu finden.

Innerhalb der Kreislaufwirtschaft gibt es unterschiedliche Ansätze, um die Produkte oder das Material länger im Kreislauf zu halten. Die wesentlichen Kreislaufansätze in diesem Artikel sind angelehnt an das Kreislaufwirtschaftsgesetz [6]. Diese sind *Reuse*, *Repair*, *Remanufacturing* und *Recycling*. Die ersten drei Ansätze sorgen für eine Verlängerung der Lebensdauer, Letzterer zielt auf die Behandlung der Produkte am Ende des Lebenszyklus ab, wobei eine Verlängerung der Produktlebensdauer nicht vorgesehen ist, die enthaltenen Materialien allerdings im Kreislauf bleiben.

- Bei *Reuse* handelt es sich um einen Ansatz für robuste Produkte, welche für den vorgesehenen Zweck immer wieder verwendet werden können (Beispiel: Essbesteck aus Edelstahl).
- Der *Repair*-Ansatz ermöglicht es, effizient, defekte Komponenten zu ersetzen und damit das Produkt wieder einsatzbereit zu machen. Oft steht dieser Ansatz im Zusammenhang mit Verschleißteilen und Schwachstellen in den Produkten (Beispiel: Bremsanlagen im Kraftfahrzeug).

- *Remanufacturing* ist eine Weiterführung dieses Repair-Ansatzes ist. Dabei wird das Produkt, oft vom eigentlichen Hersteller, nach einer Nutzungsphase wieder aufbereitet und dabei optimiert, beispielsweise durch den Einsatz optimierter Module (Beispiel: Flugzeugturbinen).
- *Recycling* ist ein Ansatz, bei dem ein Produkt so konstruiert wird, dass alle enthaltenen Materialien nach der Nutzung aus dem Produkt wieder extrahiert werden (Beispiel: Konservendose).

Diese Auswahl an speziellen Ansätzen werden als Grundlage genutzt, um entsprechende Konstruktionsstrategien zu erarbeiten. Die Anforderungen an die Produkte sind unterschiedlich, abhängig vom Kreislaufansatz und müssen berücksichtigt werden. Zur Visualisierung können die Kreislaufansätze ebenfalls in das Diagramm aus Bild 2 eingebettet werden. In Bild 3 ist diese Einbettung für den Kreislaufwirtschaftsansatz des Recyclings in dunkelgrau vorgenommen.

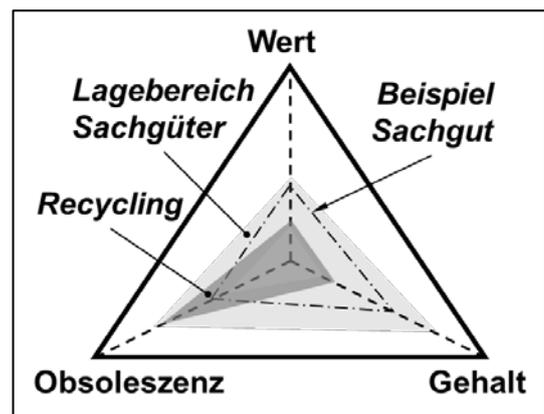


Bild 3: Der Recyclingansatz im Spinnennetzdiagramm für Sachgüter

Ein Beispielprodukt, welches hier nicht im Lagebereich des Recyclings liegt, ist ebenfalls eingezeichnet. Der Wert des Produktes muss gesenkt werden, ebenso der Materialgehalt. Für die Obsoleszenz-Wahrscheinlichkeit hat das Produkt bereits eine mögliche Ausprägung. Für den Konstrukteur im Entwicklungsprozess stellt sich nun die Frage: „*Wann kann ich welches Kriterium, mit welchen konstruktiven Mitteln, in die gewünschte Richtung des jeweiligen Recyclingansatzes beeinflussen?*“

3 Die Anschlussstellen der Kreislaufwirtschaft im Produktentstehungsprozess

Aus Pahl/Beitz [7] und der VDI 2223 [8] ist dem Konstrukteur ein generelles methodisches Vorgehen innerhalb des Produktentstehungsprozesses (PEP) bekannt, welches nach jedem Schritt Arbeitsergebnisse liefert. Mit den jeweiligen Arbeitsergebnissen aus dem PEP,

in Verbindung mit der Struktur der Metus-Raute, nach Pahl Beitz [7], kann ein Ablauf dargestellt werden, in dem sich die Ansatzpunkte der Kreislaufwirtschaft einbetten lassen. Eine Übersicht ist in Bild 4 dargestellt.

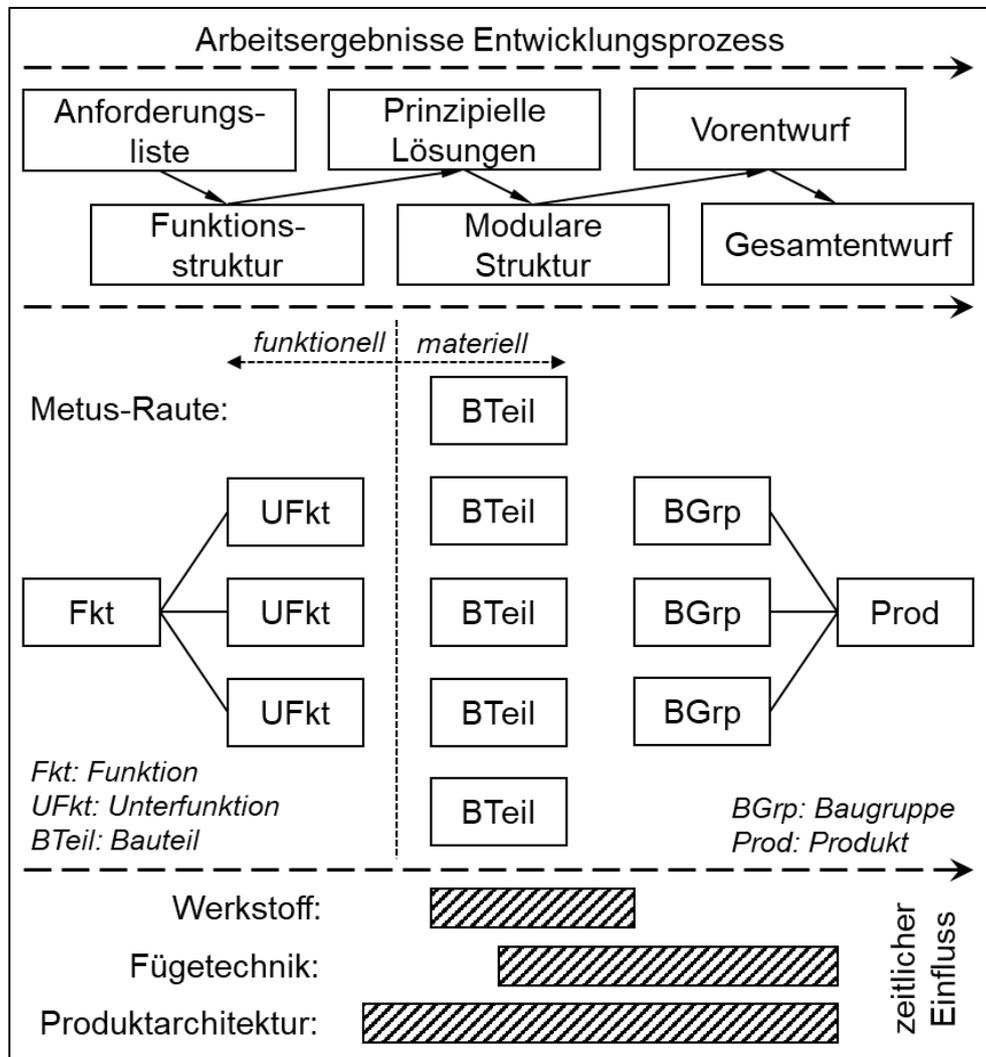


Bild 4: Arbeitsprozesse im PEP (oben), in Verbindung mit der Metusraute (mitte) und zeitlichen Einflussbereiche unterschiedlicher Variablen (unten)

Zu Beginn des PEP werden aus der Anforderungsliste – welche bereits Informationen zum Recyclingansatz enthält – Funktionen sowie deren Unterfunktionen abgeleitet und anschließend prinzipielle Lösungen gesucht. Nach Bewertung und Auswahl der Lösungen wird die modulare Struktur erarbeitet. Mit Abschluss der funktionellen Festlegung beginnt die materielle Festlegung und ermöglicht den Eingriff für die kreislaufgerechte Konstruktion. Der

Zeitraum zur Berücksichtigung der Kreislaufwirtschaft beginnt bereits im Vorentwurf und setzt sich bis in den Gesamtentwurf fort.

Die drei im Wesentlichen betrachteten Einflussfaktoren sind der Werkstoff, die dafür notwendige Fügetechnik und die daraus resultierende Produktarchitektur. Werden die einzelnen Bauteile zur Funktionserfüllung entworfen, legt dies auch die notwendigen Werkstoffe fest. Die Fügetechnik kann durch die Verbindungselemente in Maßen zur Werkstoffvielfalt beitragen, hauptsächlich ist diese allerdings dafür verantwortlich, auf welche Art und Weise die Bauteile zu Baugruppen und zum Gesamtprodukt gefügt werden. Daraus entwickelt sich eine Produktarchitektur, bei der einzelne Bauteile integral ausgeführt oder mehrere Bauteile zu einer Baugruppe in einem Modul gefügt werden. Die damit in Verbindung stehenden Lösungsmöglichkeiten muss der Konstrukteur nach dem Arbeitsergebnis der prinzipiellen Lösungsfindung bewerten, die Auswahl treffen und konstruktiv umsetzen.

4 Einflussmöglichkeiten auf die Produkteigenschaften der operativen Ebene

Die strategischen Entscheidungen für den Kreislaufwirtschaft-Ansatz stellen nun den Konstrukteur vor die anspruchsvolle Aufgabe, wann die Entscheidungen im PEP getroffen werden müssen. In Bild 5 ist dargestellt, mit welchen Faktoren der Konstrukteur die strategischen Anforderungen aus Bild 3 innerhalb der zeitlichen Restriktionen des PEP aus Bild 4 anwenden kann (vgl. Bild 1 zur Übersicht).

Eine Möglichkeit für eine gezielte Beeinflussung bietet der *Werkstoff*; dieser kann den Faktor *Gehalt* des Beispielprodukts aus Bild 3 beeinflussen. Nach Bild 5 sind über die Wahl des *Werkstoffs* die Art, Menge und Preis des Rohstoffes definiert und damit der *Gehalt* im Produkt. Die Einflusschnittstelle für den *Werkstoff* liegt im PEP nach dem Arbeitsergebnis der Funktionsstruktur. Daraus leiten sich die *Werkstoffe* der Bauteile ab, siehe Bild 4, und damit, was im Produkt enthalten ist. Größere Mengen, höhere Vielfalt und die Wahl von hochpreisigen Materialien erhöhen den Faktor *Gehalt*. Der Faktor *Gehalt* liegt in Bild 3 noch außerhalb des Bereiches für den Recycling Ansatz. Durch die Wahl gleicher Materialien und Verringerung der Menge kann dieser gesenkt werden. Ziel dieser konstruktiven Entscheidungen ist den Faktor so weit zu senken, dass dieser im dunkelgrauen Lagebereich des Recyclings liegt. Dieses muss innerhalb der Bauteilentwicklung geschehen. Spätere

Änderungen sind möglich, allerdings verlängert dies die jeweilige Iterationsschleife im PEP. Weiterhin beeinflusst der Werkstoff die *werkstoffliche Obsoleszenz*. Damit lässt sich der Wert und die Obsoleszenz im Spinnennetz Diagramm verändern. Eine Schlussfolgerung daraus ist, günstige und einheitliche Rohstoffe für einen Recyclinggerechten Ansatz zu nutzen. Durch die Senkung des Rohstoffgehaltes kann das Produkt immer weiter den Anforderungen für den Kreislaufansatz angenähert werden. Für eine konkrete Auswahl von Werkstoffen steht beispielsweise Moeller [9] zur Verfügung und für die Kritikalität kann die Richtlinie zu kritischen Rohstoffen der EU zu Rate gezogen werden [3]. Derartige Literaturen müssen im PEP nach dem Arbeitsergebnis der Funktionsstruktur und damit vor der Bauteildefinition zu Rate gezogen werden, siehe Bild 4.

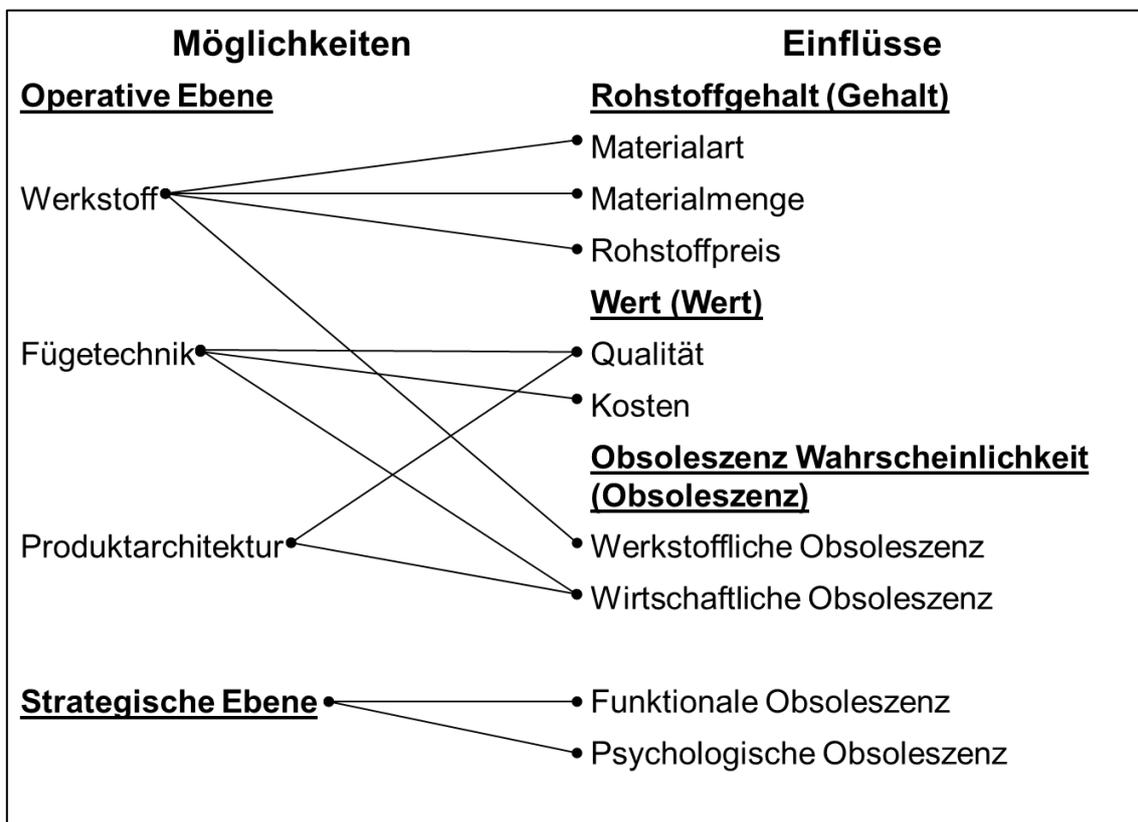


Bild 5: Operative Möglichkeiten und Wirkung auf die Kreislaufgerechten Einflüsse

Die im Anschluss notwendigen Fügemitte für die einzelnen Bauteile können die Vielfalt der Materialien wieder erhöhen. Aus Bild 5 lässt sich entnehmen, dass die Haupteinflüsse der Fügetechnik auf der *Qualität* und den *Kosten* für das Produkt liegen und damit maßgeblichen für den *Wert* des Produktes ist. Durch die Wahl der *Fügetechnik* wird weiterhin

die *wirtschaftliche Obsoleszenz* des Produktes bestimmt. Der Zeitpunkt zur Einflussnahme auf die *Fügetechnik* liegt nach der Definition der Bauteile, welche anschließend zu Baugruppen und abschließend zum Gesamtprodukt gefügt werden.

Für die Fügetechnik stehen drei grundsätzliche Verbindungsarten zur Verfügung: kraftschlüssige, formschlüssige und stoffschlüssige Verbindungen. In der DIN 8593 [10] sind Fügetechniken gelistet, welche für die jeweiligen Verbindungen zur Verfügung stehen. Detaillierte Informationen zu festen Füge- und Schraubverbindungen können aus VDI-Richtlinien entnommen werden [11, 12]. Im PEP wird über die notwendigen Fügetechniken bei der Festlegung der modularen Struktur des Produkts entschieden. Die Bauteile werden zu Baugruppen gefügt werden. Dazu gibt es verschiedenen Möglichkeiten, welche auch abhängig vom notwendigen Material und der Ausstattung innerhalb des Unternehmens sind. Im speziellen bestimmt der Einzelfall über die realisierbaren Fügetechniken für ein Produkt. Für das Beispielprodukt ist zu beachten, dass der Wert zu hoch ist. Damit muss die Qualität und / oder die Kosten gesenkt werden und dennoch wird die Anforderung aus dem Kreislaufansatz erfüllt. Bezogen ist die vor allem auf die Kosten für etwaige Reparaturen, aus Bild 3 ist ersichtlich, dass in diesem Beispiel die wirtschaftliche Obsoleszenz auch noch steigen kann.

Die *Fügetechnik* prägt die *Produktarchitektur*. Sie greift als Einfluss allerdings bereits vor den beiden vorherigen Faktoren im PEP ein. Über die Funktion und den daraus resultierenden Bauteilen wird die Fügetechnik maßgeblich bestimmt und lässt sich nachträglich nur mit einigem Aufwand beeinflussen. Hauptsächlich kann hier zwischen integral- und modular Bauweise unterschieden werden [7]. Hiervon werden die *Qualität* und die *wirtschaftliche Obsoleszenz*, zumeist wechselseitig, beeinflusst. Für die vier beschriebenen Kreislaufansätze existieren zu bevorzugende Bauweisen. Für den *Reuse-/* und den *Recyclingansatz* ist die Integralbauweise zu wählen. Durch die geringere Anzahl von Bauteilen und geringerer Materialvielfalt werden diese Ansätze begünstigt. *Repair* und *Remanufacturing* profitieren von der modularen Bauweise. Dadurch können defekte Komponenten wirtschaftlicher ersetzt oder überarbeitet werden. Für beide vorgehen folgen daraus wiederum indirekte Einflüsse auf den Werkstoff und die Fügetechnik. Diese Grundsätze sind als Tendenzen zu betrachten, für abweichende Einzelfälle soll das vorgestellte System nachvollziehbare Lösungsmöglichkeiten bieten.

Für die *funktionale* und die *psychologische Obsoleszenz* gibt es nach diesem Ansatz keine Einflussfaktoren, welche der Konstrukteur nutzen kann. Diese werden vorher von der strategischen Ebene innerhalb der Produktplanung festgelegt. Eine Unterstützung zur Berücksichtigung von Obsoleszenz bietet die VDI 2882 [13].

5 Beispiel: Ein Akkuschauber für den Kreislaufansatz Recycling

Für das vorliegende Beispiel aus Bild 3 wird jetzt konkret ein handelsüblicher Akkuschauber angenommen. Von der strategischen Ebene ist der Kreislaufansatz für das Recycling vorgegeben. Für den Akkuschauber sind die aktuellen Ausprägungen in Bild 3 dargestellt. Der *Wert* und *Gehalt* liegen nicht im Lagebereich des geforderten Kreislaufansatzes, die *Obsoleszenz* hat bereits die nötigen Anforderungen erfüllt, damit ist keine direkte Änderung nötig, allerdings möglich, ohne von den Anforderungen des Ansatz abzuweichen.

Der Konstrukteur hat die Möglichkeit, den Rohstoffgehalt des Akkuschaubers durch die Wahl des Materials, ab dem Zeitpunkt der Bauteildefinition, zu beeinflussen. Durch Vereinheitlichung von genutzten Materialien kann die Vielfalt verringert werden. Wird dabei gleichzeitig eine preisgünstigere Alternative gewählt, können die Materialkosten gesenkt werden. Zusätzlich beeinflusst dies auch die werkstoffliche Obsoleszenz. Für eine kurze Nutzungsdauer, und ohne Absicht zur Reparatur, kann die Obsoleszenz für den Akkuschauber noch steigen und liegt trotz dessen weiterhin im Anforderungsbereich.

Der Wert des Produktes kann durch die Variation der Füge-technik beeinflusst werden. Möglich ist dies nach der Definition der einzelnen Bauteile. Für die vorgesehene Anpassung der geforderten Qualität und der Kosten kann auch auf weniger hoch entwickelte Füge-technik zurückgegriffen werden. Die wirtschaftliche Obsoleszenz wird ebenfalls durch die Fügeverfahren beeinflusst. Eine Anpassung der Qualität ist also gewünscht. Dies trifft allerdings nur für den hier angestrebten Kreislaufansatz des Recyclings zu.

Für diesen Ansatz hat der Konstrukteur weiterhin zusätzlichen Spielraum. Durch die Wahl einer integralen oder modularen Bauweise wird die Produktarchitektur beeinflusst. Die Entscheidung darüber ist bereits ab dem Arbeitsergebnis der Funktionsstruktur zu treffen und muss entsprechend früh berücksichtigt werden.

Das abschließende Ziel dieser einzelnen faktoriellen Beeinflussung ist eine Überführung des Produktes, sodass dies sowohl im Lagebereich der Sachgüter als auch im Bereich des

Recyclingansatzes liegt. Der Konstrukteur hat in diesem Beispiel keine direkte Handhabe, die funktionale oder psychologische Obsoleszenz zu beeinflussen. Dies liegt im Verantwortungsbereich der strategischen Ebene. Dennoch kann es vorkommen, dass dem Konstrukteur innerhalb des PEP auffällt, dass sich eine der beiden Obsoleszenzen durch Funktionszuwachs oder -streichung ändert.

Grundsätzlich gilt für alle Kreislaufansatz- und Güterklassenkombinationen, dass trotz aller Variation und Anpassung für den jeweiligen Ansatz, die Funktion Vorrang hat, ansonsten ist das Produkt nicht zu gebrauchen. Die Verantwortung obliegt nicht dem Konstrukteur zu entscheiden, ob es für die zu erfüllende Funktion oder Herstellung eines Produktes noch – oder schon – sinnvoll ist, diese in das Portfolio des Unternehmens aufzunehmen; diese Verantwortung liegt auf der strategischen Ebene.

6 Fazit

Durch dieses Vorgehen wird der Konstrukteur dabei unterstützt, die Produkte für einen vorgegebenen Kreislaufansatz zu entwickeln. Dabei sind Ursache im PEP und Wirkung auf die Kreislaufeignung bekannt. Zusätzliche, neue definierte Ansätze für die Kreislaufwirtschaft der strategischen Ebene können vom Konstrukteur auf der operativen Ebene nachvollziehbar und effizient realisiert werden. Weiterhin ist es möglich das Spinnennetzdiagramm um weitere Faktoren zu erweitern. Dazu muss im Anschluss festgestellt werden, welche konstruktiven Entscheidungen wiederum einen Einfluss auf die neuen und alten Faktoren haben. Durch die schrittweise firmenspezifische Anpassung der Systematik sind Konstruktionen möglich, welche neue Produkte immer genauer auf die Kreislaufwirtschaft anpassen.

Literatur

- [1] Kotler, P., Armstrong, G., Harris, L. C. u. Piercy, N. F.: Grundlagen des Marketing. Hallbergmoos: Pearson 2019
- [2] Langefeld, O. u. Mrotzek-Blöß, A.: Forschungsfeld Rohstoffsicherung und Ressourceneffizienz. Forschungsfeldkolloquium 2020. Clausthal-Zellerfeld: Papierflieger 2020
- [3] Europäisches Parlament: Richtlinie 2008/98/EG. Abfallrahmenrichtlinie. 2008

-
- [4] Prakash, S., Dehoust, G., Gsell, M., Schleicher, T. u. Stamminger, R.: Einfluss der Nutzungsdauer von Produkten auf ihre Umweltwirkung: Schaffung einer Informationsgrundlage und Entwicklung von Strategien gegen „Obsoleszenz“, Dessau-Roßlau 2016
 - [5] Behrendt, S. u. Göll, E.: Produkte länger nutzen. Wie das Problem der Obsoleszenz lösen? Roadmap. IZT-Text, 9-2018. Berlin: IZT 2018
 - [6] Bundesrepublik Deutschland: Kreislaufwirtschaftsgesetz. KrWG. 2012
 - [7] Feldhusen, J. u. Grote, K.-H. (Hrsg.): Pahl/Beitz Konstruktionslehre. Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg 2013
 - [8] VDI-Richtlinie 2223:2004-01. VDI 2223 - Methodisches Entwerfen technischer Produkte
 - [9] Moeller, E. (Hrsg.): Handbuch Konstruktionswerkstoffe. Auswahl, Eigenschaften, Anwendung. München: Hanser 2014
 - [10] DIN 8596:2003-09. DIN 8593 - Fertigungsverfahren Fügen
 - [11] VDI-Richtlinie 2232:2004-01. VDI 2232 - Methodische Auswahl fester Verbindungen Systematik, Konstruktionskataloge, Arbeitshilfen
 - [12] VDI VDE-Richtlinie 2251:2016-02. VDI / VDE 2251 - Schraubverbindungen Spannverbindungen Feinwerkelemente
 - [13] VDI-Richtlinie 2882:2018-05. VDI 2882 - Obsoleszenzmanagement aus Sicht von Nutzern und Betreibern

Entwicklung einer Gamification-Strategie zur Motivationssteigerung von Mitarbeitern in der Produktion während der digitalen Transformation

David Kessing, Huong Ly Hoang*, Christoph Benninghaus*, Manuel Löwer

Fachgebiet Produktsicherheit und Qualität – Bergische Universität Wuppertal
Gaußstraße 20, 42119 Wuppertal

Email: david.kessing@uni-wuppertal.de; Internet: <https://www.psq.uni-wuppertal.de/>

*Construction Company

Feldkircherstrasse 100, LIE-9494 Schaan

Email: christoph.benninghaus@hilti.com; Internet: <http://www.hilti.com/>

Inhalt: Als Begleiterscheinung der digitalen Transformation in der industriellen Fertigung kommt es zu Veränderungen in der Arbeitsaufteilung der beteiligten Mitarbeiter. Rollen verändern sich von handwerklich ausführenden hin zu überwachenden Tätigkeiten. Erste Reaktion auf diese Veränderungen ist zumeist Ablehnung und Skepsis bei den Mitarbeitern. Zur Umsetzung der digitalen Transformation ist somit die Motivation der Mitarbeiter und die Akzeptanz der durchzuführenden Maßnahmen ein Erfolgsfaktor. Gamification ist ein moderner Ansatz zur Motivationssteigerung in verschiedenen Anwendungen durch die Integration von aus Spielen extrahierten Mechaniken. Diese Untersuchung bietet eine Analyse eines praktischen Fertigungsumfelds im Wandel zu einer „Smart Factory“ hinsichtlich der Mitarbeitermotivation und entwickelt anschließend eine Strategie auf Basis etablierter Gamification-Frameworks zur Implementierung von Mechaniken mit dem Zweck der Akzeptanzsteigerung der digitalen Transformation.

Stichwörter: Gamification, Smart Factory, Industrie 4.0, Digitale Transformation, Motivation

Development of a gamification strategy to increase the motivation of production employees during the digital transformation

Abstract: As a side effect of the digital transformation in industrial manufacturing, there are changes in the distribution of work among the employees involved. Roles are changing from handcrafting to supervising activities. The primary reaction to these changes is usually rejection and skepticism among the employees. For the implementation of the digital transformation, the motivation of the employees and the acceptance of the implemented procedures is a success factor. Gamification is a modern approach to increase motivation in various applications by integrating mechanics extracted from games. This study offers an analysis of a production environment in transition to a "Smart Factory" in terms of employee motivation. Based on

established gamification, a strategy framework for the implementation of mechanics with the purpose of increasing the acceptance of digital transformation is developed.

Keywords: *Gamification, Smart Factory, Industry 4.0, Digital Transformation, Motivation*

1 Einleitung

Durch die fortschreitende Globalisierung trifft die industrielle Fertigung auf verschiedene Herausforderungen durch den sich akzentuierenden internationalen Wettbewerb. Die Produktion wird mithilfe der **digitalen Transformation zur Industrie 4.0 (Smart Factory)** agiler auf den Kundenauftragsprozess optimiert, um auf einem dynamischen Markt konkurrenzfähig zu bleiben. [1]

Den Mitarbeitern werden zukünftig neue Rollen zugeschrieben, bei denen sie vermehrt steuernde anstatt direkt produktiver Aufgaben übernehmen. Diese Änderungen erfordern ein Umdenken in der Arbeitsweise und die Bereitschaft der Mitarbeiter, die neuen Aufgaben anzunehmen. Intuitive Reaktionen der Mitarbeiter auf diese Veränderungen sind zumeist Ablehnung und Skepsis. Um den digitalen Wandel nachhaltig und effektiv zu implementieren, müssen diese Hürden abgebaut werden. Eine besondere Bedeutung kommt dabei der Motivationserhöhung der Akteure durch geeignete Maßnahmen bei der Umsetzung zu. [2]

Videospieldesigner gelten als Experten der Motivationsgestaltung [3], denn grundsätzlich ist kein Mensch gezwungen Spiele zu spielen. Trotzdem steigt die Beliebtheit von Videospielen in Deutschland jedes Jahr an. [4]

Das Konzept der **Gamification** versucht dieses inhärente Potenzial von Videospielemechaniken nutzbringend und gezielt einzusetzen. Dies soll durch den Einsatz von spieltypischen Elementen in einem spielfremden Kontext erreicht werden [5]. Durch die entsprechende systematische Gestaltung von Tätigkeiten werden potenzielle positive Motivationskapazitäten erschlossen. Nach Anderie [6] hat dies in der Folge Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit der Unternehmen: *„Gamification beschleunigt Entwicklungsprozesse der Digitalisierung für Kultur- und Wirtschaftsgüter und maximiert die zu managende Wertschöpfung.“*

Diese Untersuchung betrachtet die Fragestellung, wie die Beteiligung der Mitarbeiter bei der digitalen Transformation gefördert und das Engagement im produzierenden Umfeld beim Thema Digitalisierung systematisch erhöht werden kann.

Die vorliegende Strategieentwicklung wurde innerhalb des Produktionskontexts eines großen europäischen Unternehmens durchgeführt.

2 Stand der Technik

2.1 Digitale Transformation

Der Begriff „Smart Factory“ beschreibt einen Produktionskontext mit integrierten Industrie 4.0-Elementen und die „Digitale Transformation“ den Prozess zu eben dieser. Säulen von Industrie 4.0 können unter anderem additive Fertigung, Augmented Reality, Big Data Analytics, autonome Robotik, Simulation, Cybersicherheit, vertikale und horizontale Integration und Cloud Computing sein [7].

Eine „Smart Factory“ ist aufgrund der schnellen technologischen Entwicklung ein sich kontinuierlich weiterentwickelndes System. Somit beschreibt der Begriff „Smart Factory“ eine stetige Evolution zu einem flexiblen Lernsystem. Der größte Vorteil einer „Smart Factory“ liegt folglich in der Fähigkeit sich den verändernden Bedürfnissen eines Unternehmens und damit des Marktes anzupassen. [8]

Westerman et al. führen an, dass Technologie der entscheidende Faktor in der heutigen Wirtschaft ist. Die Digitalisierung hebt die Limitierungen der analogen Welt auf und bietet neue Möglichkeiten, die Gesellschaft und Unternehmen zu verändern. Unternehmen, die digitale Technologien nutzen, erwirtschaften durchschnittlich einen um 26 % höheren EBIT als ihre Wettbewerber. Diese sogenannten „Digital Masters“ sind Unternehmen, die „digitale Fähigkeiten durch Überdenken und Verbessern ihrer Geschäftsprozesse“ entwickeln und „starke Führungsfähigkeiten [aufbauen], um den Wandel vorzustellen und voranzutreiben“. Führungsfähigkeiten für einen erfolgreichen digitalen Transformationsprozess erfordern einen ‚Top-down‘-Ansatz: eine starke Führungsebene in Verbindung mit Methoden, die die Mitarbeiter motivieren, diese Änderungen umzusetzen. [9]

2.2 Gamification

Der Begriff Gamification wurde erstmalig 2002 in einer Schrift des Unternehmensberaters Nick Pelling genannt. [10]

Eine größere Aufmerksamkeit wurde dem Thema ab 2010 gewidmet und eine erste wissenschaftliche Konferenz zum Thema fand 2011 statt. [11]

Für den Neologismus „Gamification“ gibt es bis heute keine allgemein akzeptierte Definition und auch keine idiomatische Übersetzung in der deutschen Sprache. Die deutsche Übersetzung „Spielefizierung“ umfasst die unterschiedlichen Bedeutungen von „Play“ und „Game“. [12]

Die meist zitierte Definition ist die von Deterding et al. aus dem Jahr 2011: „Die Verwendung von Game-Design Elementen in Nicht-Spiel-Kontexten“. [5]

Variationen betonen bei der Definition statt der Spieldesignelemente die Nutzung von Spielmechaniken oder fügen in einer breiter gefassten Definition Weiteres hinzu, z.B. „mit dem Ziel der Verhaltensänderung und Motivationssteigerung“ oder die Einschränkung auf die Nutzung von Elementen aus Computerspielen, wie z.B. Huotari und Hamari mit "a process of enhancing a service with affordances for gameful experiences in order to support user's overall value creation"[13]

Jane McGonigal beschreibt in „Besser als die Wirklichkeit“ vier Kernelemente von Spielen: *Regeln* setzen für das Spielerlebnis einen Rahmen an Möglichkeiten, *Ziele*, welche es zu erreichen gilt, *Feedback*, das den Spielern hilft, zu erkennen, ob eine Handlung zielführend war und die *Freiwilligkeit*, dass niemand gezwungen wird an einem Spiel teilzunehmen. [14]

Die Spielentwicklung unterscheidet sich jedoch zu der Entwicklung von Gamification-Strategien durch die vorhandenen Rahmenbedingungen des „Nicht-Spiel-Kontexts“ und die gezielte Adressierung vorhandener Motivationslücken, welche durch vorherige Analyse identifiziert werden. Zur erfolgreichen Implementierung von Gamification innerhalb dieser Rahmenbedingungen existieren einige Frameworks, die sich mit der Sammlung und Kategorisierung von Gamification-Techniken und Motivationsmechaniken beschäftigen. Weit verbreitet sind beispielsweise die Frameworks „Octalysis“ von Chou, „Gamified UK“ von Marczewski oder „How to gamify“ von Morschheuser und Hamari. Letzteres bildet die Grundlage für die vorliegende Untersuchung, da sich der entwickelte Prozess zur Implementierung von Gamification auf eine Analyse und Evaluation zuvor entwickelter Prozesse stützt. Zusätzlich wird im Prozess bei der Auswahl von einsetzbaren Gamification-Mechaniken auf die Sammlungen von Marczewski und Chou zurückgegriffen. [3,15,16]

3 Strategieentwicklung

Zur effektiven Einbindung von Gamification-Maßnahmen in eine Unternehmensstrategie wird die Methode „How to gamify“ von Morschheuser, Hamari et al. angewendet, welche auf einem angepassten Design Thinking-Prozess beruht.

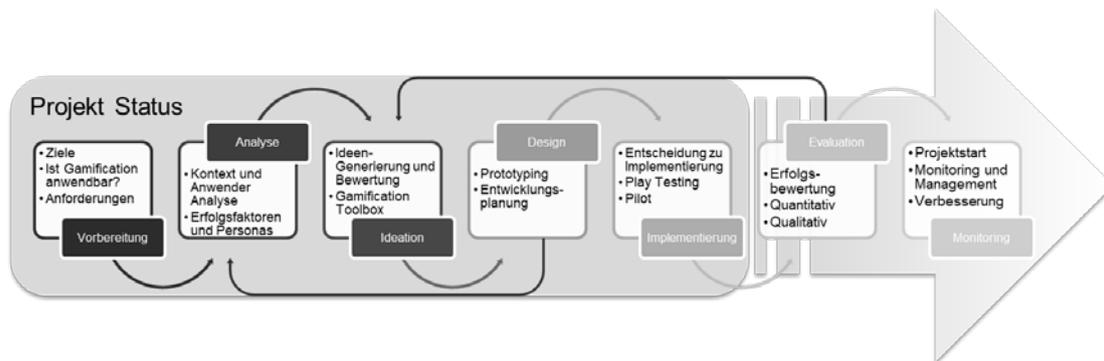


Bild 1: Gamification Design-Prozess nach Morschheuser, Hamari et al.[16]

Der Prozess umfasst sieben Phasen, von der Vorbereitung der Entwicklung, über die Umfeldanalyse, Ideengenerierung, Mechanik-Design, Technik-Implementierung, Erfolgsevaluation bis zum Monitoring, die entsprechend dem Design Thinking-Ansatz, bei Bedarf iterativ durchlaufen werden können. Die vorliegende Untersuchung umfasst die ersten fünf Phasen, da eine langfristige Erfolgsevaluation und Monitoring im Rahmen der praktischen Umsetzung innerhalb des Unternehmens noch ausstehen. [16]

3.1 Vorbereitung

In der Vorbereitungsphase wird auf Basis der Unternehmensziele die Entscheidung getroffen, ob Gamification anwendbar ist und wie die Anforderungen zu definieren sind. Der vorliegende Produktionsstandort des betrachteten Unternehmens startet momentan mit dem Wandel zu einer „Smart Factory“. Dafür wurde eine eigene Strategie mit Kernwerten entwickelt, welche die Unternehmenskultur nach der digitalen Transformation prägen soll. Zudem wurde intern ein „Smart Factory“-Framework entwickelt, um Technologien und Aktivitäten im Bereich der Smart Factory kommunizierbar und anschaulich zu machen. Die Kernelemente werden wie folgt definiert:

Kollaboration, Automatisierung, Konnektivität, Transparenz, Adaptierbarkeit und Vorhersagbarkeit.

Die Anwendung von Gamification eignet sich insbesondere im Hinblick auf die Förderung der Werte Kollaboration und (Akzeptanz von) Transparenz. Da sich die Umsetzung der „Smart Factory“ in einem sehr frühen Stadium befindet, ist die Integration von Gamification-Maßnahmen voraussichtlich als wenig problembehaftet anzusehen, da durch die langfristige Evaluationsmöglichkeit Anpassungen durchgeführt werden können.

Für die Integration von Gamification wurde seitens des Unternehmens ein Zielsystem mit vier Anforderungen vorgegeben:

- Steigerung der digitalen Kompetenz im globalen Produktionsnetzwerk **(Active Learning)**
- Engagement bei der Umsetzung von digitalen Projekten **(Active Caring)**
- Kollaboration mit der „Smart Factory“ stärken **(Active Sharing)**
- Einsatz von Industrie 4.0-Technologien erhöhen **(Active Doing)**

3.2 Analyse

Die Analyse-Phase umfasst sowohl eine Betrachtung des Umfelds, in dem die Gamification-Maßnahmen umgesetzt werden, als auch der beteiligten Mitarbeiter, die von den Maßnahmen betroffen sein werden. Das Umfeld der zukünftigen „Smart Factory“ besteht mehrheitlich aus autonom produzierenden Maschinen. Die Aufgaben der Mitarbeiter in der Produktion werden umverteilt und Rollen neu ausgerichtet. Im Zuge der digitalen Transformation wurden im Unternehmen die folgenden bestehenden Rollen definiert:



Bild 2: Darstellung der Rollen im Unternehmen

In dieser Untersuchung wird der Fokus auf die vier dunkel hervorgehobenen Rollen gelegt „Fertigung“, „Management“, „Teamleitung“, „IT-Abteilung“, da bei der Rolle „Einkauf“ keine besonderen Hindernisse in der digitalen Transformation erwartet werden und die „Entwicklung“ nur eine geringe direkte Schnittstelle zur Produktion besitzt und dementsprechend eine aktive Einbindung in die Gamification-Strategie nicht im Fokus liegt. Die Abteilung IT hat ebenfalls einen geringen Widerstand bei der digitalen Transformation, hier sind jedoch die Schnittstellen zur „Smart Factory“ als relevant zu betrachten.

Anschließend wurden Interviews mit den Mitarbeitern geführt, welche die entsprechenden Rollen zukünftig in der „Smart Factory“ einnehmen sollen. Zweck ist die Erfassung der Kompetenzen, Aufgaben und Verantwortungen, der Zusammensetzung des

Arbeitsumfelds, der Ziele, Wünsche sowie der Motivation am Arbeitsplatz in Form von qualitativen Schwerpunkten in Bezug auf die Rolle.

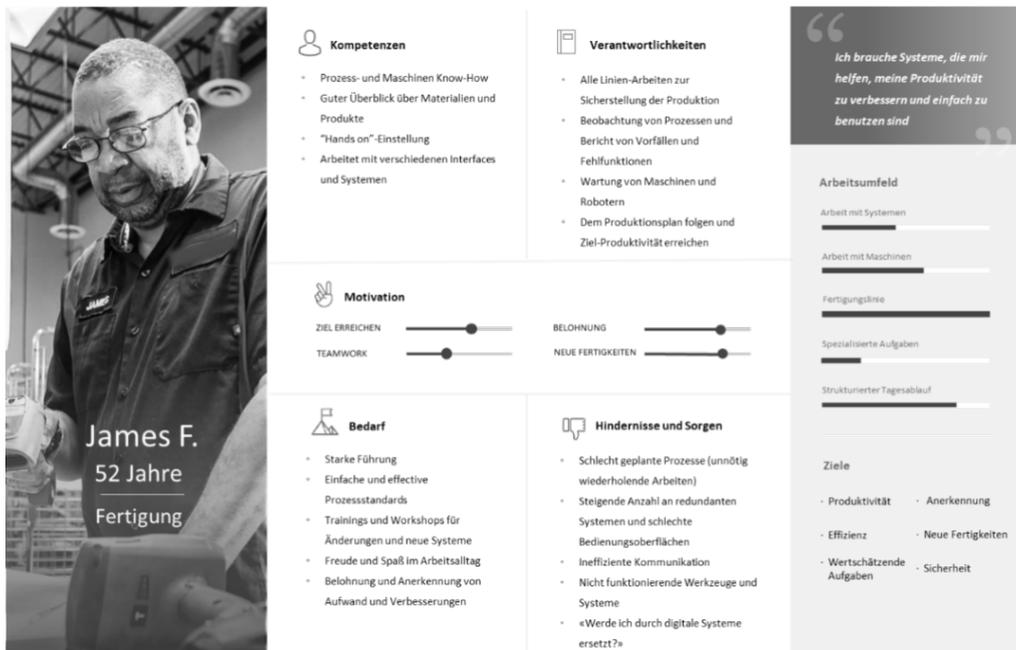


Bild 3: Persona zu der Rolle „Fertigung“

Zwischen den vom Unternehmen definierten Zielwerten und den analysierten Profilen als Status Quo lässt sich nun ein Delta festhalten, welches durch die sog. „**Desired Actions**“ (notwendige Handlungen) repräsentiert wird. Diese Handlungen sind Verhaltensweisen oder Aktionen, die durch geplante Gamification-Maßnahmen hervorgerufen werden sollen, um den Zielwert zu erreichen. Dabei können aus den Profilen auch notwendige Handlungen für andere Profile entstehen. Als Beispiel sei hier die Ausführung der oben dargestellten Persona „Fertigung“ genannt:

„*Wachsende Anzahl an redundanten Systemen und schlechte Bedienoberflächen*“.

Daraus folgen die notwendigen Handlungen:

- Für die **Persona „Fertigung“**: „*Feedback geben*“ und in der Folge auch „*Aktiv Prozesse mit Industrie 4.0 verbessern*“.
➤ **Zielwert**: Den Einsatz von Industrie 4.0-Technologien erhöhen (**Active Doing**)
- Für die **Persona „Teamleiter“**: „*Einheitliche Lösungen und Standards abstimmen*“
➤ **Zielwert**: Engagement bei der Umsetzung von digitalen Projekten (**Active Caring**)

Aus der Analyse der Personas lassen sich allgemein folgende Handlungen ableiten:



Bild 4: Abgeleitete notwendige Handlungen (Desired Actions), geordnet nach Unternehmenszielen

3.3 Ideation

In der Ideation-Phase werden Ideen gesammelt, mit welchen Gamification-Techniken die notwendigen Handlungen angeregt werden können. Die ursprüngliche Methode zur Ideation von Gamification-Maßnahmen findet sich in der Analyse von Videospiele. Die gefundenen Techniken wurden bereits vielfach in Frameworks festgehalten. Beispielhaft sei hier das Rahmenwerk von Marczewski genannt, welches 52 Techniken aufführt und diese acht „Spieler-Charakteren“ zuordnet. [15]

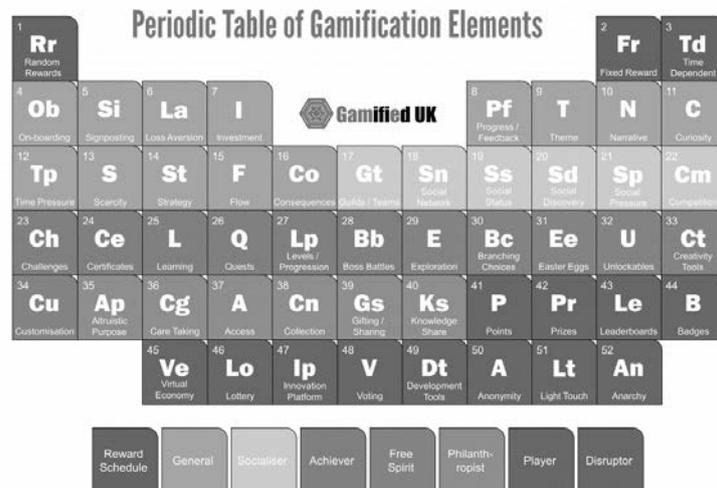


Bild 5: Periodic Table of Gamification Elements nach Marczewski [15]

Im Rahmen eines Workshops des Unternehmens wurden 33 Techniken diskutiert und festgehalten. Die gefundenen Techniken wurden anschließend nach Einflussstärke und Umsetzungsmöglichkeit bewertet, um eine Auswahl für die Implementierung zu treffen. Das Ergebnis des Workshops für die Umsetzung von Gamification-Techniken ist:

- **Active Learning:** Gesteigertes Interesse durch begrenzte Zeiträume und Verfügbarkeiten, sowie regelmäßige neue Inhalte (Glowing Choice): Technologiekalender für Teilbereiche des „Smart Factory“-Frameworks und Spotlight für spezielle Technologien zum Ausprobieren
- **Active Sharing:** Anregung von Wettbewerb durch Smart Factory KPI Dashboard für jedes Werk
- **Active Caring:** Themenfeldorientierte Fokusgruppen zur gezielten Unterstützung des sozialen Austauschs und Umsetzung von globalen Projekten (Group Quests)
- **Active Doing:** Anregung der aktiven Mitgestaltung der digitalen Transformation durch Darstellungsmöglichkeit der eigenen Initiativen (Trophy Shelf), der Implementierung der Kategorie „Digital Trendsetter“ im unternehmenseigenen Belohnungssystem und der Einführung von Progress Bars zum Tracking von Smart Factory Projekten

3.4 Design und Implementierung

Die Design-Phase beinhaltet die Entwicklungsplanung und Gestaltung der gefundenen Techniken. Dies wird durch die Erstellung und Evaluation eines „Prototypen“ umgesetzt. In der Implementierungsphase wird anschließend der iterierte Prototyp zur Pilot-Nutzung im Unternehmen freigeschaltet. Innerhalb dieser Untersuchung ist das Design und die Implementierung wird am Beispiel der Technik „Technologie-Spotlight“ aus dem Bereich Active Learning dargestellt. Das „Technologie-Spotlight“ zielt auf die notwendige Handlung „Technologie kennen lernen“, um die Persona-Eigenschaft „Trainings und Workshops für Änderungen und neue Systeme“ zu adressieren. Genutzt wird die bekannte Gamification-Technik „Glowing Choice“ aus Chous „Octalysis“-Framework. Allgemein vereinfacht diese die Auswahl bei einer großen Entscheidungsvielfalt durch das Hervorheben eines definierten Teils. „Glowing Choice“ ist häufig in Tutorials anzufinden, wenn Benutzer durch die Bedienung eines Spiels oder Programms geführt werden. [3]

Im Beispiel der „Smart Factory“ wird den Benutzern über das Intranet-System die Auswahl-Entscheidung zum Ausprobieren einer neuen Technologie abgenommen oder erleichtert, indem eine Technologie gezielt vorgestellt wird. In der folgenden Abbildung ist die Vorstellung einer „Augmented Reality“-Brille dargestellt, welche diverse Funktionen für die Produktionslinie bereitstellt.



Bild 6: Darstellung des „Technologie-Spotlight“ im Intranet

3.5 Evaluation und Monitoring

Für die Evaluation und das Monitoring der eingeführten Gamification-Maßnahmen sind Kennzahlen zu definieren, die den Erfolg im Hinblick auf die Unternehmensanforderungen messbar machen. Diese sind je nach genutzter Motivationsmechanik, Gamification-Technik und Kontext stark individuell und können nicht allgemein festgehalten werden. [3]

Im Anwendungsbeispiel „Technologie-Spotlight“ sind dies die Anfragen zum Ausprobieren der neuen Technologie oder die Zugriffszahlen im Intranet. Da diese im Unternehmen erst kürzlich in die Pilot-Phase übernommen wurden, sind noch keine statistisch relevanten Daten vorhanden. Jedoch sind mit Einführung des „Technologie-Spotlights“ überhaupt erst Anfragen zum Ausprobieren von Technologien eingegangen. Somit wurde durch Gamification in erster Instanz Aufmerksamkeit und Neugier für die neuen Technologien in der digitalen Transformation erzeugt.

4 Ergebnis und Zusammenfassung

Die digitale Transformation ist eine Herausforderung für Unternehmen und Mitarbeiter. Unsicherheiten im Bezug auf die Zukunft des Arbeitsplatzes können vereinzelt Misstrauen, Akzeptanz- und Motivationsprobleme verursachen. Diese lassen sich frühzeitig mit einer gezielten Motivationsstrategie adressieren. Die vorliegende Untersuchung zeigt die beispielhafte Umsetzung auf Basis eines Prozesses zur erfolgreichen Implementierung von

Gamification-Elementen. Die Kontext-Analyse mit den vorgegebenen Unternehmenszielen im Hinblick auf den Wechsel zu einer Smart Factory bildete den Ausgangspunkt. Durch die Erstellung von Personas der beteiligten Mitarbeiter ließen sich notwendige Handlungen ableiten und in Kategorien ordnen. Mit Hilfe von etablierten Gamification-Frameworks wurden zu den notwendigen Handlungen passende Techniken gefunden. Beispielhaft wurde die Umsetzung einer Gamification-Technik dargestellt. Eine statistische Evaluation des Erfolgs steht noch aus, eine positive Tendenz, in Form von gesteigertem Interesse an Smart Factory-Technologien, ist jedoch erkennbar.

Die direkte Übertragbarkeit der Ergebnisse auf Unternehmen, welche ebenfalls die digitale Transformation mit Gamification unterstützen möchten, ist in zukünftiger Forschung zu prüfen. Eine Übertragbarkeit der vorgestellten Methode zur strategischen Implementierung von Gamification auch in andere Zusammenhänge kann, mit Vorbehalt der statistischen Auswertung der Ergebnisse, empfohlen werden. Limitierungen der Forschung entstehen durch die Subjektivität des Unternehmenszusammenhangs und die Auswahl der Gamification-Frameworks zur Technik-Erfassung.

Literatur

- [1] Huber, W. (2018). *Industrie 4.0 kompakt*. Wiesbaden: Springer Vieweg.
- [2] Moore, P., Robinson, A. (2016). The quantified self: What counts in the neoliberal workplace. *New Media & Society*, 18(11), 2774–2792. <https://doi.org/10.1177/1461444815604328>
- [3] Chou, Y. (2015). *Actionable Gamification – Beyond Points, Batches and Leaderboards*, Octalysis Media, Milpitas, CA, USA. ISBN: 1511744049
- [4] Statista: Beitrag im Internet: Umsatz im Markt für Computer- und Videospiele (ohne Hardware) in Deutschland von 2009 bis 2019 <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/317808/umfrage/umsatz-im-markt-fuer-computer-und-videospiele-in-deutschland/>, zuletzt abgerufen am 16.04.2020
- [5] Deterding S., Dixon D., Khaled R., Nacke L. (2011). From game design elements to gamefulness: defining “gamification.” In *Proceedings of the 15th International Academic MindTrek Conference: Envisioning Future Media Environments (MindTrek '11)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 9–15. DOI: <https://doi.org/10.1145/2181037.2181040>
- [6] Anderie, L. (2018). *Gamification, Digitalisierung und Industrie 4.0*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH.
- [7] Rüßmann, M., Lorenz, M., Gerbert, P., Waldner, M., Justus, J., Engel, P., & Harnisch, M. (2015). *Industry 4.0: The Future of Productivity and Growth in Manufacturing*. Beitrag im Internet: https://www.bcg.com/publications/2015/engineered_products_project_business_industry_4_future_productivity_growth_manufacturing_industries.aspx#chapter1, zuletzt abgerufen am 16.04.2020

- [8] Deloitte (2017). The smart factory: Responsive, adaptive, connected manufacturing. https://dupress.deloitte.com/content/dam/dup-us-en/articles/4051_The-smart-factory/DUP_The-smart-factory.pdf, zuletzt abgerufen am 16.04.2020
- [9] Westerman, G., Bonnet, D., & McAfee, A. (2014). Leading digital – Turning technology into business transformation. Boston: Harvard Business Review Press.
- [10] Marczewski A. (2013). Gamification – A simple Introduction. Selbstverlag. ISBN:1471798666
- [11] Haberkorn, M. (2011). Gamification Summit 2011: Beitrag im Internet. <http://gamification.de/2011/04/24/gamification-summit-2011/>, zuletzt abgerufen am 16.04.2020
- [12] Fleisch, H. (2018). Gamification 4 Good – Gemeinwohl spielerisch stärken. Edition Stiftung&Sponsoring, Band 1. Berlin. Erich Schmidt Verlag GmbH & Co.
- [13] Huotari, K., Hamari, J., (2012). Defining gamification: a service marketing perspective. In Proceeding of the 16th International Academic MindTrek Conference (MindTrek '12). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 17–22. DOI: <https://doi.org/10.1145/2393132.2393137>
- [14] McGonigal, J., (2012). Besser als die Wirklichkeit. München: Wilhelm Heyne Verlag
- [15] Marczewski, A.: (2018) Even Ninja Monkeys Like To Play. Unicorn Edition. New Haw, Surrey, UK. Gamified UK Verlag
- [16] Morschheuser B., Werder, K., Hamari, J., Abe, J. (2017). How to gamify – A method for designing gamification. Published in Proceedings of the 50th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS 2017) (pp. 1298-1307). University of Hawai'i at Manoa. ISBN: 978-0-9981331-0-2. <http://dx.doi.org/10.24251/HICSS.2017.155>.

Konzeptionierung einer Methodik zur effizienten Entwicklung von Exoskeletten

Tobias Drees, Robin Pluhnau, Arun Nagarajah

Institut für Produkt Engineering, Universität Duisburg-Essen

Lotharstr. 1, 47057 Duisburg

Email: tobias.drees@uni-due.de; Internet: <https://www.uni-due.de/pep/>

Inhalt: In den letzten Jahren nahm die Entwicklung von Exoskeletten als mobile, am Körper getragene Assistenzsysteme für verschiedene Anwendungsszenarien in der Industrie, Rehabilitation und für militärische Zwecke stark zu. Vor allem in Richtung industrieller Anwendung verspricht der Einsatz eine verbesserte Ergonomie, eine Befähigung älterer Mitarbeiter und eine Prävention von Muskel-Skelett-Erkrankungen. Die Entwicklung erfolgt jedoch größtenteils ohne methodisches Vorgehen beim Konzipieren und Entwerfen, speziell beim Übergang zwischen diesen beiden Phasen. Dieser Artikel stellt einen methodischen Ansatz zur Entwicklung von Exoskeletten auf Basis von Morphologien unter Nutzung des Contact and Channel Approach (C&C²) vor. Ziel der Methode ist es, die Neu- und Anpassungsentwicklung kostengünstig in der Losgröße 1 zu ermöglichen.

Stichwörter: Exoskelett, Contact and Channel Approach, Methodenentwicklung.

Conception of a Methodology for the Efficient Development of Exoskeletons

Abstract: In recent years, the development of exoskeletons as mobile, body worn assistance systems for various application scenarios for industrial, rehabilitational and military purposes has increased significantly. Especially for industrial applications, the use of exoskeletons promises improved ergonomics, empowerment of older employees and prevention of musculoskeletal disorders. However, the development is largely carried out without a methodological approach to conceptual and embodiment design, especially in the transition between these two phases. This article presents a methodological approach to the development of exoskeletons based on morphologies using the Contact and Channel Approach (C&C²). The aim of the method is to enable new and adaptation designs to be carried out cost-effectively in batch size 1.

Keywords: Exoskeleton, Contact and Channel Approach, Method Development.

1 Einleitung

Wesentliche Herausforderungen der Arbeitsplatzgestaltung stellen die demografische Alterung der Gesellschaft sowie auftretende Erkrankungen am Arbeitsplatz als Folge (berufsbedingter) körperlicher Belastung dar. Entscheidungsträger in der Industrie müssen sich mit der Herausforderung auseinandersetzen, die Veränderungen der Belegschaftsstrukturen und ihre Auswirkungen auf die Arbeitsbedingungen zu bewältigen. Arbeitsplätze mit körperlich herausfordernden Aufgaben unter Einbeziehung der physischen Fähigkeiten des Mitarbeiters sind dabei besonders intensiv zu betrachten. [5] An diesen ist die Gefahr für Erkrankungen des Muskel-Skelett-Apparates besonders hoch. Sie sind eine der Hauptursachen für Ausfallzeiten und gesundheitsbedingtes Ausscheiden aus der Erwerbstätigkeit. Risikofaktoren für das Auftreten derartiger Erkrankungen sind unter anderem die manuelle Handhabung von schweren, großen oder unhandlichen Lasten, eine erhöhte Anzahl und Dauer manueller Handhabungstätigkeiten, sich häufig wiederholende Bewegungen und das Arbeiten in ungünstigen Körperhaltungen. Derartige Arbeiten wurden im Jahr 2016 von mehr als 23,5 % der Erwerbstätigen durchgeführt. [3, 16]

Folglich besteht ein großer Bedarf an der Entwicklung von Maßnahmen, um die genannten Herausforderungen zu bewältigen und die älter werdende Gesellschaft zu befähigen, ihre Berufe langfristig und ohne körperliche Schäden auszuführen. Roboter können in industriellen Fertigungsprozessen Aufgaben übernehmen, die große Kräfte erfordern, sie bieten jedoch im Kontrast zum Menschen unzureichende bis keine Manipulationsfähigkeit, Geschicklichkeit, Flexibilität, Problemlösungskapazität und Qualität. [19]

Der Einsatz von körpergetragenen Exoskeletten verspricht an dieser Stelle die ergonomischere Gestaltung von Arbeitsplätzen sowie die Reduktion der körperlichen Belastung der Arbeitnehmer/-innen. Die Entwicklung von Exoskeletten für den Einsatz im industriellen Umfeld ist erst seit wenigen Jahren ein Forschungsschwerpunkt. Eine disziplinübergreifende Produktentwicklung ist wegen des breiten Forschungsfeldes notwendig, da neben den klassischen Ingenieurwissenschaften sehr unterschiedliche Fachgebiete beteiligt sind, u.a. die Informatik, Medizin, Elektrotechnik, und Physiologie. Forschungsergebnisse aus einzelnen Projekten/Entwicklungen sind nur schwierig auf andere Anwendungsfälle zu übertragen. Darüber hinaus existieren in der Entwicklung von

Exoskeletten zurzeit keine Standards, Gesetze oder Richtlinien, die spezifisch auf den industriellen Einsatz ausgerichtet sind. [19] Entwicklungsergebnisse von Exoskeletten aus militärischen Anwendungsfällen sind nicht öffentlich zugänglich. Es werden zumeist Insellösungen für spezifische Anwendungsfälle erstellt, die schlecht übertragbar sind. Es besteht daher noch erheblicher Forschungsbedarf im Hinblick auf eine systematische Entwicklung von Exoskeletten, vor allem im Hinblick auf ein methodisches Vorgehen.

2 Stand der Technik

2.1 Definition Exoskelett

Der Begriff Exoskelett beschreibt, anlehnend an natürliche Exoskelette von Tieren, eine externe, am Körper getragene Stützstruktur. Diese unterstützt als persönliches, mobiles Assistenzsystem den Anwender bzw. Träger in verschiedenen Zwecken. Es umfasst alle Arten von tragbaren Systemen, die eine Art von physischer Interaktion mit der Person, die sie trägt, ermöglichen. [7] Exoskelette lassen sich hinsichtlich ihrer Bauweise und ihrer eingesetzten Komponenten in zwei Gruppen einteilen: passive und aktive Stützstrukturen. Passive Exoskelette verfügen über keinen aktiv gesteuerten Antrieb und unterstützen den Anwender mittels mechanischer Komponenten, wie z.B. Federn, Schienen und Gewichte. Dabei nimmt die Stützstruktur auftretende Belastungen auf und verteilt diese im Körper oder leitet sie in den Boden ab. Aktive Exoskelette verfügen neben mechanischen Elementen über zusätzliche aktive Antriebskomponenten, die zur Kraftreduzierung und Lastminderung beitragen. Der aktive Antrieb erfolgt z.B. durch ein System von Elektromotoren, Getrieben, Sensoren und Aktoren, über eine elektrische Steuerung oder mit Hilfe von Pneumatik bzw. Hydraulik oder einer Kombination der genannten Technologien. [5]

2.2 Anwendungsbereiche und Nutzen von Exoskeletten

Typische Einsatzorte für Exoskelette finden sich im medizinischen (z.B. Rehabilitation), militärischen (z.B. Tragen schwerer Ausrüstung) und industriellen (z.B. Handhabung von Gütern) Anwendungen. [2]

Im medizinischen Bereich helfen Exoskelette vor allem Patienten mit Lähmungen der Extremitäten, die z.B. durch Rückenmarksverletzungen verursacht wurden. Dabei sind die primären Ziele die verlorene Funktionalität und Mobilität des Körpers wiederherzustellen

oder die Genesungszeit zu reduzieren. Die Auswirkungen des Einsatzes in Rehabilitationsaktivitäten werden individuell in Echtzeit validiert, wobei der Rückschluss auf die Entwicklungsparameter und die Generierung von Standards in der Entwicklung nachrangig betrachtet wird oder häufig entfällt. [6, 11, 13]

Im militärischen Bereich sind Menschen durch das Tragen schwerer Ausrüstung über einen langen Zeitraum stark eingeschränkt. Exoskelette tragen primär dazu bei, diese schwere Last zu erleichtern, die Belastungsgrenze der Soldaten zu erhöhen und folglich ihre Leistung zu steigern. Für den Einsatz von Exoskeletten in militärischen Anwendungen liegen keine Ergebnisse zur Entwicklung, Modellierung und Simulationsforschung vor. [6]

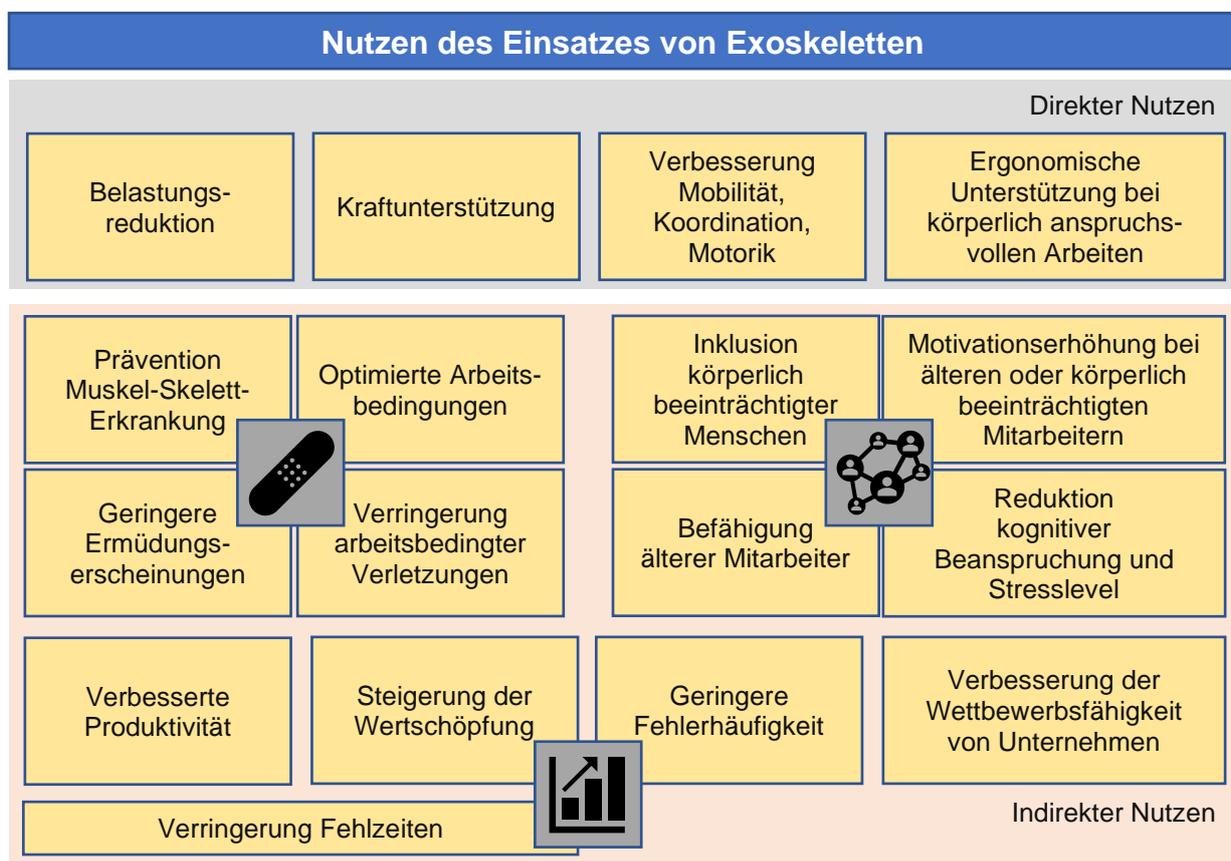


Bild 1: Nutzen des Einsatzes von Exoskeletten

Im industriellen Einsatz finden Exoskelette aufgrund ihrer Kombination von menschlicher Flexibilität und maschineller Leistungssteigerung in der Lücke zwischen rein manueller Tätigkeit und vollständig automatisierter Produktion Anwendung. Die Nutzung von Exoskeletten verfolgt dabei unterschiedliche Ziele, wie Bild 1 verdeutlicht. Ein direkter Nutzen entsteht, je nach Anwendungsfall, durch eine verbesserte Ergonomie, einer

Reduktion auftretender körperlicher Belastungen, eine Kraftunterstützung bei Handhabung von Lasten oder einer allgemeinen Verbesserung der Mobilität, Koordination oder Motorik. Daraus resultierend ergibt sich ein großer indirekter Nutzen sowohl auf gesundheitlicher als auch auf sozialer und wirtschaftlicher Ebene. Insbesondere die durch eine verbesserte Ergonomie am Arbeitsplatz entstehenden gesundheitlichen Vorteile durch optimierte Arbeitsbedingungen und die Prävention von Muskel-Skelett-Erkrankungen stellen einen großen Hebel dar, um Mitarbeiter in Ihrem Beruf zu befähigen und zu motivieren, wodurch ein wirtschaftlicher Vorteil für die Unternehmen entsteht. Eklund stellte bereits 1995 fest, dass ergonomische Verbesserungen die Qualität und die Produktivität der Bediener bei Montagearbeiten erhöhen. [5, 7, 8, 12, 18]

2.3 Methodischer Ansatz zur Beschreibung des Funktion-Gestalt-Zusammenhangs

Innerhalb des im folgenden Kapitel vorgeschlagenen methodischen Vorgehens wird der Ansatz des *Contact and Channel Approach* (C&C²) verwendet, der von Matthiesen und Albers eingeführt worden ist. Es beschreibt technische Systeme durch die Grundelemente *Wirkfläche* (WF) und *Leitstützstruktur* (LSS). Wirkflächen sind generalisierte Oberflächen von Körpern, Feldern und Fluiden. Eine technische Funktion ist er dann realisierbar, wenn zwei Wirkflächenpaare (WFP), die aus jeweils zwei Wirkflächen bestehen, mit einer Leitstützstruktur verbunden sind. [14]

Nach ihrer Definition stellen WFP und LSS die kleinsten, nicht weiter unterteilbaren Grundelemente aller technischen Systeme dar, deren Beschreibung sie erlauben. Mit Hilfe dieser Grundelemente ist es möglich alle technischen Systeme darzustellen. C&C² ermöglicht allgemein die Verknüpfung von Funktion und Geometrie. [1, 14]

3 Ermitteln von Anforderung an die Methodik

Die Entwicklung der ersten aktiven Exoskelette reichen bis in die 1960er Jahre zurück. Die *General Electric Company* entwarf den Prototypen *Hardiman*, der die Bewegungen seines Trägers nachahmt und mit Hilfe der äußeren Skelettstruktur die Kraft und Ausdauer des Trägers um einen Faktor von ca. 25 zu erhöhen. Dennoch blieben Erfolge in der Entwicklung von Exoskeletten für industrielle Anwendungen bis in die 2010er Jahre aus. Passive

Exoskelette kommen in Form von Orthesen schon seit langer Zeit im medizinischen Bereich zum Einsatz, doch auch hier fehlte die Übertragung in industrielle Anwendungsfälle. [10]

Erst seit wenigen Jahren erreichen werden Exoskelette in industriellen Anwendungsfällen z.B. an Montagelinien in der Automobilindustrie oder bei der Kommissionierung in der Logistik eingesetzt. Hajek identifiziert im Jahr 2019 weltweit 31 Unternehmen, die 53 Produkte und Prototypen für industrielle Anwendungsfälle entwickelten. [12] Beispiele dafür sind die geförderten Projekte *ORTAS* (bis 01/2017) und *Robo-Mate* (bis 11/2016). Aus den Ergebnissen von *ORTAS* sind die passiven Exoskelette *Paexo* entstanden, die aktuell in der Automobilmontage sowie im Schiffsbau zum Einsatz kommen. Die Technologien von *Robo-Mate* sind an das 2017 gegründete Unternehmen *GBS German Bionic Systems GmbH* lizenziert worden, die ihr aktives, rückenentlastendes Exoskelett *Cray X* in der Logistik und der industriellen Produktion vertreiben. [4, 9, 17]

Bisherige Entwicklungen von Exoskeletten legen häufig einen spezifischen Anwendungsfall fest, der zumeist bei einem am Forschungsprojekt beteiligten Unternehmen auftritt (vgl. Bild 2). Dieser ergibt sich aus einer identifizierten allgemeinen Problemstellung, die durch den erhofften Nutzen von Exoskeletten gelöst wird. Ausgehend von diesem Anwendungsfall werden Anforderungen ermittelt, ein Prototyp in CAD entwickelt und sich iterativ einer Lösung angenähert. Das iterative Vorgehen besteht aus dem Prototyp Testing, der Auswertung der Ergebnisse und der anschließenden Anpassung des Prototyps unter eventuell veränderten Anforderungen. Eine Methode zur digitalen Untersuchung von Prototypen am Arbeitsplatz und insbesondere zur Kopplung des CAD-Exoskelettes mit einem digitalen Humanoid beschreibt *Constantinescu*. [7] Der initiale Schritt zur Entwicklung des ersten Prototyps ist dagegen wissenschaftlich unzureichend untersucht. Die zu entwickelnde Methode soll den Übergang zwischen aufgestellten Anforderungen und dem Gestaltentwurf beschreiben können. Sie soll dabei helfen, das hohe Risiko für die Gestaltung zu reduzieren, welches immer dann vorliegt, wenn eine unzureichende Gestaltdokumentation von Vorgängerprodukten vorhanden ist. [6, 15]

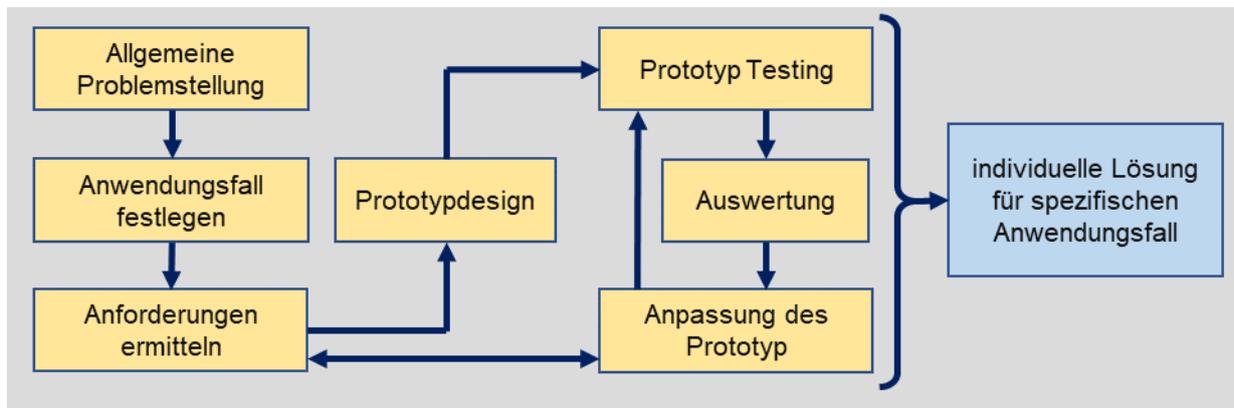


Bild 2: Bisheriges Vorgehen bei der Entwicklung von Exoskeletten

Auch wenn in verschiedenen Berufen die gleichen grundlegenden Arbeitsfunktionen erfüllt werden müssen, wie z.B. bei einer Überkopfmontage, so unterscheiden sich die Anforderungen hinsichtlich eines Einsatzes von Exoskeletten. Spezifische Arbeitsabläufe, Umgebungsbedingungen, körperliche Verfassung und Körperbau der Arbeiter sowie weitere Randbedingungen lassen eine einfache Übertragung der vollständig entwickelten Exoskelett-Lösung auf andere Einsatzorte nur bedingt zu. Eine spezifische Körperposition des Anwenders in seinem Arbeitsablauf reicht aus, um den Einsatz des Exoskeletts aus ergonomischen oder praktikablen Gründen abzulehnen. Das Argument einer flexiblen Einsatzmöglichkeit von Exoskeletten entfällt damit und rechtfertigt keine hohen Entwicklungskosten. Dennoch besteht der Bedarf, die Entwicklung von Exoskeletten personenindividuell und vor allem auch individuell für jeden spezifischen Anwendungsfall durchzuführen, sodass sich an dieser Stelle eine Entwicklung und Fertigung der Losgröße 1 ergibt. Der bei bisherigen Entwicklungen frühzeitig anvisierte Gesamtentwurf, bei der die Produktgestalt bis in das kleinste Detail ausgearbeitet ist und über iterative Prototypenschleifen weiterentwickelt wird, lässt dies, speziell unter Betrachtung der Entwicklungskosten, nicht zu. Die Methode soll daher eine Produktentwicklung der Losgröße 1 unterstützen.

Die Freiheitsgrade des menschlichen Skelettsystems beschränken die Bewegungsmöglichkeiten des menschlichen Körpers und damit den Lösungsraum für potenzielle Exoskelett-Lösungen. Neukonstruktionen sind daher bei bereits bestehender Lösung für ähnliche Anwendungsfälle nicht zwingend erforderlich. An dieser Stelle entsteht die Frage, an welchem Punkt in der Entwicklung eine gemeinsame Grundlage oder

Plattform zur individuellen Schaffung neuer Gestaltvarianten gegeben ist und welche Form diese Plattform hat. Um dies zu klären ist es erforderlich, dass die Methode unterschiedlich aufgegliederte Betrachtungsweisen des Funktion-Gestalt-Zusammenhang bzw. der Detailtiefe der technischen Umsetzung erlaubt. Dies macht es auch den an der Entwicklung beteiligten Gewerken leichter, die für sie wichtigen Informationen zu entnehmen. Tabelle 1 fasst die genannten Anforderungen an die Methodik zusammen

Tabelle 1: Anforderungen an eine Methodik zur Entwicklung von Exoskeletten

1	Verbesserung des Übergangs zwischen aufgestellten Anforderungen und Gestaltentwurf
2	Verringerung des hohen Risikos für die Gestaltung, welches aufgrund unzureichender Gestaltdokumentation von Vorgängerprodukten besteht
3	Unterstützung einer Produktentwicklung der Losgröße 1 zur Erzielung einer personenindividuellen und anwendungsfallspezifischen Lösung
4	Ermöglichen einer fraktalen Betrachtung des Funktion-Gestalt-Zusammenhangs

4 Methodisches Vorgehen zum Entwickeln von Exoskeletten

Bild 3 beschreibt das vorgeschlagene methodische Vorgehen zur Entwicklung von Exoskeletten. Dazu ist es zuerst notwendig, eine Bestandsanalyse bestehender Lösungen im Sinne eines Reverse-Engineerings durchzuführen. Insbesondere werden die Schritte 1 bis 5 der VDI 2221 rückwärts und parallel durchlaufen.

Die Analyse erfolgt auf verschiedenen Ebenen. Auf der Gestaltebene werden die Produkte zuerst in einzelne Module zerlegt und anschließend in immer kleinere Baugruppen und Einzelteile aufgeteilt. In jeder Zerlegungsstufe erfolgt die Analyse nach dem C&C². Das Modell ermöglicht die in geforderte fraktale und somit stark untergliederte Betrachtung der Gestalt unter Einbezug von WF, WFP und LSS. Dies bedeutet, dass die Betrachtungsweise der Gestalt auf unterschiedlichen Hierarchieebenen erfolgen kann. Zu verschiedenen Betrachtungsebenen gehören verschiedene relevante WF. Auf oberster Ebene entsteht eine Art "Black-Box-Darstellung", in dem nur die Ein- und Ausgänge des Gesamtsystems mit WF zur Umwelt modelliert und über eine LSS verbunden sind. Auf tiefster Ebene werden die einzelnen Bauteile betrachtet. Sogar Vorgänge im Bauteilinneren können dargestellt werden. Ergebnis der Gestaltanalyse ist die in WF und LSS zerlegte Gestalt. [1, 14]

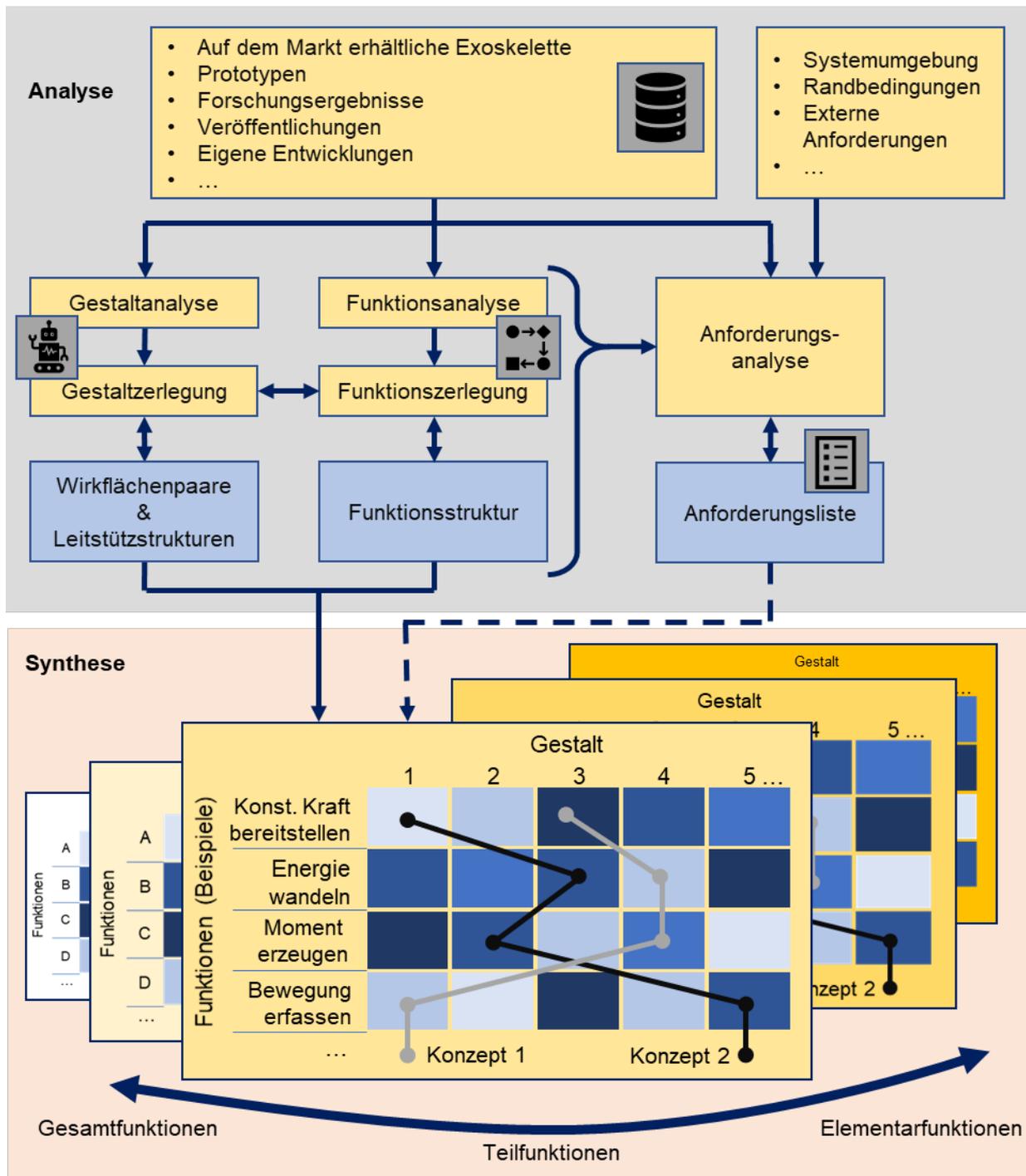


Bild 3: Vorgeschlagene Methodik zur Entwicklung von Exoskeletten

Die Funktionsanalyse findet parallel und in Verbindung mit der Gestaltanalyse statt. Der Begriff beschreibt allgemein das Analysieren der Funktionen von Objekten bezogen auf ihre Wirkungen, Zwecke und Konzepte. Die Objekte werden in ihre verschiedenen Komponenten, Elemente, Aspekte, usw. zerlegt und diese bezüglich ihrer unterschiedlichen Kennzeichen und Merkmalattribute abstrahiert, aufgeteilt, eingeordnet und bestimmt.

Ergebnis der Funktionsanalyse ist eine Funktionsstruktur des untersuchten Produktes. Die Funktionsstruktur lässt sich von der Gesamtfunktion bis in die Ebene der Elementarfunktionen ermitteln. Dadurch liefert sie ebenfalls die Möglichkeit der Betrachtung unterschiedlicher Hierarchieebenen. [14]

Der Gestalt-Funktion-Zusammenhang wird im Synthese-Schritt systematisch und grafisch in einem morphologischen Kasten dargestellt. Diese Hierarchieebene der Funktionsstruktur werden dabei den unterschiedlichen Betrachtungsebenen der Gestalt zugeordnet. Dieser Baukasten erlaubt die Kombination der identifizierten, auf ihre Wirkstrukturen reduzierten Lösungen mit den Funktionen, die sie umsetzen. Ebenso ist es möglich, durch neue Kombinationen bekannter Funktion-Lösungs-Zuordnungen neue Lösungskonzepte zu entwickeln. Durch die Zurückführung der technischen Funktion auf die Interaktionen im WFP und der LSS sowie dem fraktalen Charakter lässt sich die methodische Anforderung an unterschiedlich detaillierte Betrachtungsstufen erzielen.

Mit den Erkenntnissen der Funktions- und Gestaltanalyse sowie den allgemeinen produktbeschreibenden Daten, Forschungsberichten und Veröffentlichungen kann eine Anforderungsanalyse durchgeführt werden, deren Ergebnis die Anforderungsliste ist. Die Betrachtungsweise als Morphologie erlaubt es dabei, analog zum Gestalt-Funktion-Zusammenhang einen Funktion-Anforderung-Zusammenhang und damit die Entwicklung zu einem noch früheren Zeitpunkt des methodischen Konstruierens darzustellen. Ebenso ist ein Vorgehen in die entgegengesetzte Richtung möglich, und bei ausgearbeitetem Gesamtentwurf von Gestaltvarianten eine Entwurf-Gestalt Morphologie.

Die Methodik lässt somit zu, dass die Produktentwicklung neuer Exoskelette als Anpassungs- oder Variantenkonstruktion bekannter Lösungen an unterschiedlichsten Entwicklungspunkten starten kann. Sie ist zudem im Hinblick auf neu eintretende Marktteilnehmer, neu entwickelte Produkte oder veränderte Anforderungen und Funktionen erweiterbar. Den größten Nutzen bietet die fraktale Betrachtungsweise über Morphologien, die neben einer Betrachtung des Funktion-Gestalt-Zusammenhangs auch die Anforderungen und bereits existierende Gesamtlösungen beinhaltet. Je nach Anwendungsfall lassen sich durch unterschiedliche Startzeitpunkte im

Entwicklungsprozess, die über die verschiedenen Morphologien abgebildet werden, kostengünstig und schnell personenindividuelle und anwendungsindividuelle Produkte der Losgröße 1 entwickeln und produzieren.

5 Ausblick

Nachdem der theoretische, methodische Ansatz ausgearbeitet ist muss die Umsetzung mit konkreten Beispielen erfolgen. Dazu ist die tiefgehende Analyse von entwickelten Exoskelett-Lösungen erforderlich, sodass die geforderten Morphologien aufgebaut werden können. Es ist in einem späteren Schritt zudem geplant, die nach dem C&C² Ansatz ermittelten Gestaltzusammenhänge in CAD-Modellen darzustellen, sodass für Anpassungskonstruktionen lediglich die gestalterische Ausprägung der Wirkfläche neu ausgearbeitet werden muss. Darüber hinaus ist eine Betrachtung der Biomechanik des menschlichen Skelett-Systems zur Feststellung der Freiheitsgrade und zur Clusterung von möglichen Funktionen notwendig.

Literatur

- [1] Albers, A., Enkler, H.-G., and Otnad, J. 2011. *Managing complex simulation processes: the generalised contact and channel model*. International Journal of Product Development 13, 3, 204–221
- [2] Alqahtani, M. S., Al-Tamimi, A., Almeida, H., Cooper, G., and Bartolo, P. 2020. *A review on the use of additive manufacturing to produce lower limb orthoses*. Progress in Additive Manufacturing 5, 2, 85–94.
- [3] BAuA/BMAS. 2017. *Sicherheit und Gesundheit bei der Arbeit - Berichtsjahr 2016*. DOI=10.21934/BAUA:BERICHT20171211.
- [4] Bundesministerium für Bildung und Forschung. 2020. *BMW ZIM Projekt: ORTAS - Orthetisch-bionisches Assistenzsystem*. <https://www.technik-zum-menschen-bringen.de/projekte/ortas>. Accessed 26 May 2020.
- [5] Calzavara, M., Battini, D., Bogataj, D., Sgarbossa, F., and Zennaro, I. 2020. *Ageing workforce management in manufacturing systems: state of the art and future research agenda*. International Journal of Production Research 58, 3, 729–747.
- [6] Constantinescu, C., Muresan, P.-C., and Simon, G.-M. 2016. *JackEx: The New Digital Manufacturing Resource for Optimization of Exoskeleton-based Factory Environments*. Procedia CIRP 50, 508–511.
- [7] Constantinescu, C., Popescu, D., Todorovic, O., Virlan, O., and Tinca, V. 2018. *Methodology of Realising The Digital Twins of Exoskeleton-Centered Workplaces*. Applied Mathematics, Mechanics, and Engineering 61, III, 441–448.
- [8] Eklund, J. A.E. 1995. *Relationships between ergonomics and quality in assembly work*. Applied Ergonomics 26, 1, 15–20.

- [9] European Commission. 2020. *Intelligent exoskeleton based on human-robot interaction for manipulation of heavy goods in Europe's factories of the future*. <https://cordis.europa.eu/project/id/608979>. Accessed 26 May 2020.
- [10] General Electric Company. *Research and Development Prototype for Machine Augmentation of Human Strength and Endurance*. Hardiman I Project.
- [11] González-Vargas, J., Ibáñez, J., Contreras-Vidal, J. L., van der Kooij, H., and Pons, J. L. 2017. *Wearable Robotics: Challenges and Trends*. 16. Springer International Publishing, Cham.
- [12] Hajek, N. 2019. *Einsatz von Exoskeletten als Assistenzsystem in der Produktion. Eine Marktanalyse industrieller Exoskelette*. Diplomarbeit, Technische Universität Wien.
- [13] Li, N., Yan, L., Qiu, H., Wu, H., Wu, J., and Sen, M. 2015. *Review on Lower Extremity Exoskeleton Robot*. The Open Automation and Control Systems Journal 7, 441–453.
- [14] Matthiesen, S. 2002. *Ein Beitrag zur Basisdefinition des Elementmodells "Wirkflächenpaare & Leitstützstrukturen" zum Zusammenhang von Funktion und Gestalt technischer Systeme*. Universität Karlsruhe (TH).
- [15] Matthiesen, S., Grauberger, P., Hölz, K., Nelius, T., Bremer, F., Wettstein, A., Gessinger, A., Pflegler, B., Nowoseltschenko, K., and Voß, K. 2018. *Modellbildung mit dem C&C²-Ansatz in der Gestaltung - Techniken zur Analyse und Synthese*. DOI=10.5445/IR/1000080744.
- [16] O'Sullivan, L., Nugent, R., and van der Vorm, J. 2015. *Standards for the Safety of Exoskeletons Used by Industrial Workers Performing Manual Handling Activities: A Contribution from the Robo-Mate Project to their Future Development*. Procedia Manufacturing 3, 1418–1425.
- [17] Ottobock SE & Co. KGaA. 2020. *Homepage Paexo*. <https://paexo.com/>. Accessed 26 May 2020.
- [18] Schick, R. 2018. *Einsatz von Exoskeletten an gewerblichen Arbeitsplätzen*. Fachzeitschrift für Prävention, Rehabilitation und Entschädigung, 1-2, 8–11.
- [19] Spada, S., Ghibaud, L., Gilotta, S., Gastaldi, L., and Cavatorta, M. P. 2017. *Investigation into the Applicability of a Passive Upper-limb Exoskeleton in Automotive Industry*. Procedia Manufacturing 11, 1255–1262.

Anwendung wissensbasierter Konstruktionssysteme zur Lösungsbewertung von CAD-Konstruktionen

Lukas Valentin Hoppe, Paul Christoph Gembarski, Stefan Plappert, Roland Lachmayer

Institut für Produktentwicklung und Gerätebau, Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover

An der Universität 1, 30823 Garbsen

Email: {hoppe; gembarski; plappert; lachmayer}@ipeg.uni-hannover.de;

Internet: <https://www.ipeg.uni-hannover.de>

Inhalt: Der Einsatz von wissensbasierten Konstruktionen rückt durch eine stärker werdende Diskussion zum Thema künstliche Intelligenz weiter in den Fokus der Produktentwicklung. Das Einsatzgebiet der Systeme beinhaltet überwiegend die Synthese von Konstruktionsartefakten wie z.B. die Automatisierung von Routineaufgaben. In diesem Paper wird eine „umgekehrte“ Anwendung von wissensbasierten Konstruktionen aufgezeigt, um ein Analysesystem zur automatischen Auswertung von CAD-Konstruktionen zu entwickeln. Das System wird anschließend in Autodesk Inventor implementiert und anhand einer Wellenkonstruktion getestet.

Stichwörter: Wissensbasierte Konstruktion (KBE), Konstruktionslehre, Modellanalyse, Autodesk Inventor.

Application of knowledge-based engineering systems for solution evaluation of CAD models

Abstract: The use of knowledge-based engineering is moving further into the focus of product development due to a growing discussion on the topic of artificial intelligence. The field of application of the systems mainly includes the synthesis of design artifacts such as the automatization of routine tasks. In this paper an "inverse" application of knowledge-based design is shown to develop an analysis system for the automatic evaluation of CAD designs. The system is finally implemented in Autodesk Inventor and tested using a shaft design.

Keywords: Knowledge-based engineering (KBE), design education, model analysis, Autodesk Inventor.

1 Einleitung

Der Einsatz von wissensbasierten Konstruktionssystemen (Knowledge-based Engineering Systems, kurz: KBES) stellt an sich kein Novum dar [1], rückt aber in den letzten Jahren auch durch die stärker werdende Diskussion zum Thema künstliche Intelligenz weiter in den Fokus [2]. Dies zeigt sich unter anderem in der im Jahr 2017 veröffentlichten VDI-Richtlinie 5610-2 [3] zum gleichen Thema.

KBES werden in der Regel zur Automatisierung von Routineaufgaben oder als Entscheidungsunterstützungssystem für den Entwickler eingesetzt [4]. Das stellt die Synthese von Konstruktionsartefakten, beispielsweise in der Produktkonfiguration, in den Vordergrund [5]. Die Anwendung als Analysesystem zur Prüfung einer Konstruktion wird in der Literatur zwar erwähnt, jedoch handelt es sich hier häufig um prototypische Systeme, z.B. agenten-basierte Überprüfung von CAD-Konstruktionen hinsichtlich der Einhaltung von einfachen Gestaltungsrichtlinien, wie z.B. „Reduktion des Materialmixes und von Fügstellen“ im Rahmen des recyclinggerechtes Gestalten [6].

Dieser Beitrag zielt in eine ähnliche Richtung und berichtet über die Anwendung eines KBES zur Überprüfung der Normkonformität von CAD-Einzelteilmodellen. Das System unterstützt u.a. in der Konstruktionsausbildung als intelligentes Tutorensystem für die Konstruktionslehre der ersten Maschinenbausemester und gibt den Studierenden automatisiert zielgerichtetes, präzises und objektives Feedback zur Verbesserung ihrer Konstruktionen.

2 Stand der Technik

Um komplizierte Problemstellungen mit Hilfe von künstlicher Intelligenz zu lösen, können wissensbasierte Systeme (KBS) eingesetzt werden. Diese nutzen digital aufbereitetes Expertenwissen und simulieren die Vorgehensweise eines Experten um einen Lösungsprozess zu durchlaufen [7]. Der Aufbau wissensbasierter Systeme gliedert sich in die drei Hauptkomponenten: der Wissensbasis, der Inferenzmaschine und einer Schnittstelle zur Umgebung [4].

Die Wissensbasis dient dem System als Datenbank und beinhaltet alle benötigten Regeln und Informationen. Um die Wissensbasis mit der vorliegenden Problemstellung zu verknüpfen wird eine Inferenzmaschine genutzt, welche gezielt auf das Expertenwissen zugreift und somit den Lösungsprozess steuert und überwacht. Zur Interaktion mit dem KBS

dient eine Umgebungsschnittstelle, welche es erlaubt die Wissensbasis zu erweitern und Problemstellungen zu implementieren.

Als spezielle Form eines KBS werden wissensbasierte Konstruktionssysteme (KBES) betrachtet. Diese beinhalten zusätzlich zu den Hauptkomponenten des KBS eine Möglichkeit zur Integration in ein CAD-System [8]. Im CAD-System wird das Expertenwissen entweder mit Regeln programmiert oder in Tabellenform dargestellt. Dabei können Standardteilkataloge und Designregeln einfach implementiert werden. Ein weiterer Vorteil der KBES ist die einfache Erweiterbarkeit der Wissensbasis, so dass neue Daten schnell hinzugefügt oder geändert werden können [7].

Um ein wissensbasiertes CAD-Modell zu erstellen, bieten heutige CAD-Systeme unterschiedliche Möglichkeiten zur Wissensspeicherung, z.B. durch Parameterverknüpfung oder das Erstellen von Gleichungen und Konstruktionsregeln an [9]. Eine hierbei relevante Methode zur Wissensverwaltung bietet die Verknüpfung mit Tabellenkalkulationen. Diese erweitern nicht nur die im CAD-System integrierten Berechnungen um viele mathematische und statistische Operationen, sondern erlauben auch das umfassende und systematische Auswerten von Daten [10]. Einen anderen Ansatz zur Parameterverknüpfung bieten Skriptsprachen. Diese bieten z.T. auch Methoden zur Modifikation von Geometrie, zur Kontrolle des Unterdrückungsstatus oder zum Austausch von Bauteilen. Bei der Programmierung werden Konstrukte wie if-then-else, select-case-Entscheidungsbäume oder while-Schleifen verwendet [11].

3 Das „umgekehrte“ KBES

Ein KBES wird in der Produktentwicklung in der Regel zur Konstruktionsautomatisierung eingesetzt, in dem Standart- und Routineaufgaben des Konstrukteurs durch das System übernommen und somit die Arbeit bei der Produktentwicklung unterstützt wird. Ein weiterer Anwendungszweig für KBES ist die individuelle Produktkonfiguration. Mit Hilfe von KBES lassen sich dort auch ohne Konstruktionskenntnisse unterschiedliche Modellkonfigurationen erstellen und dreidimensional darstellen.

Bei der Benutzung implementierter KBES werden in einer grafischen Benutzerschnittstelle wie einem Formular oder einer Excel-Tabelle bestimmte Eingangsparameter vom Benutzer definiert. Dabei kann z.B. die Geometrie ausgelegt, eine Anzahl bestimmt oder eine gewünschte Lebensdauer ausgewählt werden. Anhand dieser Eingabe wird die

Konfiguration des Modells erstellt indem durch die Inferenzmaschine ein Abgleich von Wissensbasis und Regeln erfolgt. Sämtliche Parameter des Modells werden daraufhin neu berechnet und angepasst. Die Ausgabe des Systems beinhaltet ein korrekt konfiguriertes CAD-Modell, welches allen hinterlegten Konstruktionsregeln und Normen entspricht. Der Nutzen des KBES liegt hier also in der Synthese von Konstruktionsartefakten (siehe Abbildung 1).

Für die automatische Lösungsbewertung von CAD-Konstruktionen lässt sich das KBES „umgekehrt“ nutzen. Die Eingabe in das System ist hier, anstelle von Parametern, die fertige CAD-Konstruktion. Um eine Lösungsbewertung für das Modell abzugeben, muss zuerst eine Analyse der Konstruktion stattfinden. Dafür wird im ersten Schritt das Objekt durch eine Feature-Erkennung zerlegt, sodass die Geometrie des Bauteils in einen Parametersatz abstrahiert wird. Zur Untersuchung wird die Geometrie anschließend durch die Inferenzmaschine mit der Wissensbasis verglichen, die neue Konfiguration übernommen und auf Normkonformität sowie Einhaltung der Aufgabenrestriktionen geprüft. Bei auftretenden Diskrepanzen werden die Konstruktionsfehler mit Hilfe eines Erklärungsmoduls ausgewertet und als Fehlerparameter abgespeichert. Abschließend beinhaltet die Ausgabe des Systems die Auflistung aller Konstruktionsfehler, welche den gültigen Lösungsraum überschreiten und somit die Bewertung der Konstruktion [12]. Die „umgekehrte“ Nutzung des KBES dient also der Analyse von Konstruktionsartefakten.

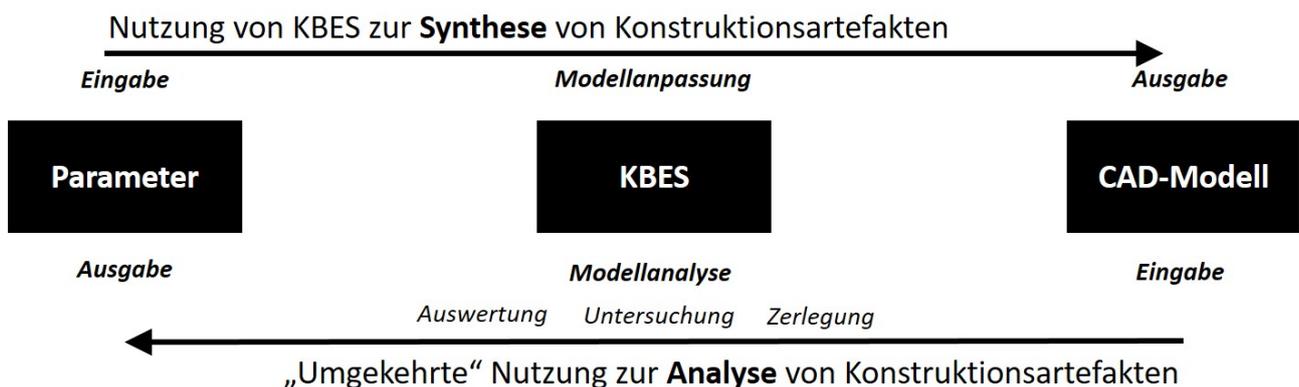


Abbildung 1: KBES Nutzung

3.1 Komponenten

Die Analysefähigkeit des Systems bei der „umgekehrten“ Nutzung bedingt also die Implementierung zusätzlicher Komponenten, sodass das System neben Wissensbasis und Inferenzmaschine um die Feature-Erkennung und das Erklärungsmodul erweitert werden muss. Die Module und ihre Funktionen werden im Folgenden genauer erläutert:

Die Wissensbasis dient dazu, im System Expertenwissen zu hinterlegen. Dazu werden Tabellen verwendet, in denen die Daten von Standardbauteilen und Normkatalogen zusammengefasst sind. Die Wissensbasis wird passend zur Konstruktionsaufgabe mit dem benötigten Wissen gefüllt, um die richtige Verwendung von Normen und Standardbauteilen zu überprüfen. Damit stellt die Wissensbasis den Bereich aller möglichen Lösungen, also den gültigen Lösungsraum der Konstruktionsaufgabe dar. Zusätzlich wird mit Hilfe von Parametern ein Fehlerkatalog hinterlegt, welcher die Restriktionen der Aufgabenstellung berücksichtigt und somit die Grenzen der möglichen Lösungen absteckt.

Die Feature-Erkennung stellt auch die Umgebungsschnittstelle des Systems dar. Sie kann CAD-Modelle einlesen und hinsichtlich ihrer Geometrie und der genutzten Gestaltungselemente analysieren. Hierbei prüft ein VBA (engl. Visual Basic for Applications) Makro, unabhängig von der Modellierungsmethode, die Flächen des CAD-Modells. Dafür wird die Konstruktion nach Grundkörpern wie z.B. Zylindern, Kegeln oder Tori durchsucht und deren Position und Anordnung analysiert. Dadurch können vom System Rückschlüsse auf die angewandten Elemente gezogen werden. Anschließend wird die detektierte Geometrie als Parametersatz gespeichert.

Die Inferenzmaschine dient dazu, die eingelesenen Bauteilgeometrie der Feature-Erkennung mit den gültigen Lösungen der Wissensbasis zu vergleichen. Hierzu dient ein Programm, welches einen Abgleich zwischen den Ist- und Soll-Werten durchführt. Die möglichen Fehler werden gespeichert und an das Erklärungsmodul weitergeleitet.

Das Erklärungsmodul stellt die direkte Verbindung zwischen der Feature-Erkennung und der Wissensbasis her, sodass eine Fehlerliste in Verbindung des Expertenwissens ausgegeben werden kann.

3.2 Systemablauf

Um das Zusammenspiel der Systemkomponenten aufzuzeigen, wird im Folgenden der Systemablauf an Hand eines Flussdiagramms genauer erläutert (siehe Abbildung 2).

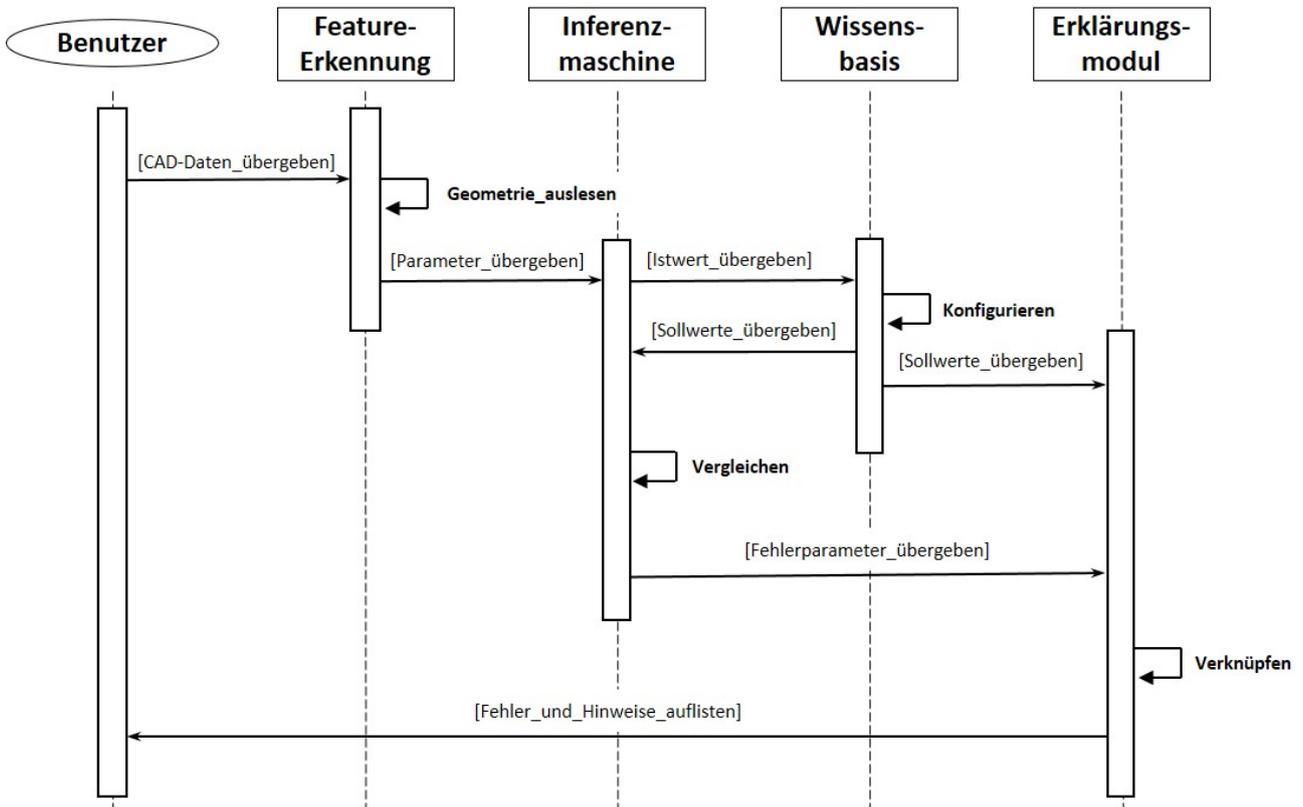


Abbildung 2: Systemablauf

Der Benutzer bearbeitet eine Konstruktionsaufgabe und übergibt anschließend seine Konstruktion mit Hilfe einer grafischen Benutzerschnittstelle an die Feature-Erkennung des Systems, welches die Geometrie des Modells ausliest und als Parametersatz ablegt. Dazu werden mit einem Makro die Flächen der geometrischen Grundkörper des Modells erkannt und ihre Abmessungen bestimmt. Somit wird der Volumenkörper des Modells auf die Parameterebene zerlegt. Zur Interpretation des erhaltenen Parametersatzes wird dieser gebündelt an die Inferenzmaschine übergeben, welche in das CAD-System integriert ist. Vergleichend zieht diese das Expertenwissen aus der Wissensbasis hinzu und vergleicht somit die Parameter der Konstruktion mit den gültigen Werten des Lösungsraums. Bei Übertretung der Systemgrenze werden die entsprechenden Fehlerparameter an das Erklärungsmodul übergeben. In diesem Modul wird wiederholt ein Abgleich mit der Wissensbasis geschaffen, um als letztendliche Ausgabe mit dem Fehler auch einen Hinweis

zur Lösungsfindung zu verknüpfen. Die Auflistung der Fehler und die entsprechenden Hinweise werden dem Benutzer dann durch das Erklärungsmodul zur Verfügung gestellt.

4 Lösungsbewertung am Beispiel einer Wellenkonstruktion

Um die Funktionalität des Systems zu überprüfen wurde ein KBES in Autodesk Inventor umgesetzt, welches die Beispielaufgabe einer Getriebewellenkonstruktion automatisch bewertet. Bevor das KBES entwickelt wird ist es sinnvoll die Aufgabenstellung gänzlich zu klären, um die einzelnen Module direkt darauf abzustimmen. Die Aufgabe beinhaltet die CAD-Konstruktion einer Welle, welche an zwei Stellen gelagert wird und die jeweiligen Lager mit Sicherungsringen gegen Verrutschen gesichert werden. Zwischen den Lagerstellen ist mit Hilfe einer Passfeder ein Zahnrad zu montieren. Am Wellenende soll das eingebrachte Moment erneut über eine Passfeder an ein beliebiges Maschinenelement übergeben werden. Um die Aufgabe möglichst offen zu gestalten ist bewusst auf die vorgeschriebene Dimensionierung der Bauteile verzichtet worden, lediglich ein Wertebereich beschränkt die Lösungsvarianten.

Beruhend auf der Aufgabenstellung wurde die Wissensbasis in das CAD-System implementiert. Dafür wurde eine Excel-Tabelle in Autodesk Inventor eingebettet und mit Lösungsrelevantem Wissen gefüllt. Dazu zählen die in der Aufgabenstellung geforderten Abmessungen von Normteilen wie Passfeder, Sicherungsring und Lagersitz; die Normmaße von Freistichen und die Restriktionen für Größt- und Kleinstmaße.

Die Feature-Erkennung greift mittels eines VBA-Makros auf die Programmierschnittstelle (engl. Application Programming Interface (API)) von Autodesk Inventor zu, sodass die Flächen des betrachteten Volumenmodells ausgelesen werden können. Aufgrund des objektorientierten Aufbaus der Inventor-API können zu jedem Flächenobjekt zusätzliche Informationen wie der Flächentyp, Koordinaten und Abmessungen der Fläche, sowie angrenzende Flächen ausgelesen werden. Mit Hilfe dieser Informationen kann die Getriebewelle in einzelne Absätze unterteilt werden und für jeden Absatz die verwendeten Gestaltungselemente, wie Einstiche für Sicherungsringe, Passfedernuten und Freistiche ermittelt, sowie deren Parameter ausgelesen und abgespeichert werden.

Die Inferenzmaschine wurde mit der mit der Inventor internen Programmiersprache iLogic aufgebaut. Diese ist durch mehrere Mathematische Verknüpfungen dazu in der Lage die Ist-Werte aus der Feature-Erkennung mit den Soll-Werten der Wissensbasis zu vergleichen.

Mögliche Abweichungen oder Überschreitungen der Parameter können so detektiert werden.

Um eine adäquate Ausgabe des Systems zu erhalten wurde ein VBA-Makro als Erklärungsmodul erstellt, welches die vom System gefundenen Fehler aufnimmt, mit den möglichen Lösungen verbindet und somit dem Benutzer einen Hinweis auf Fehlerort und Korrektur mitliefern kann. Die Ausgabe wird in einer Textdatei gespeichert und dem Systemnutzer zur Verfügung gestellt.

4.1 Funktionstest

Nach dem Aufbau des Systems wurde dieses durch das Durchführen mehrerer Korrekturdurchläufe getestet. Dafür stand eine Testgruppe von zehn fortgeschrittenen Maschinenbau Studenten zur Verfügung, welche die Aufgabenstellung der Getriebewellenkonstruktion bearbeiteten. Die erzeugten Modelle wurden anschließend an das System übergeben und ausgewertet (siehe Abbildung 3).

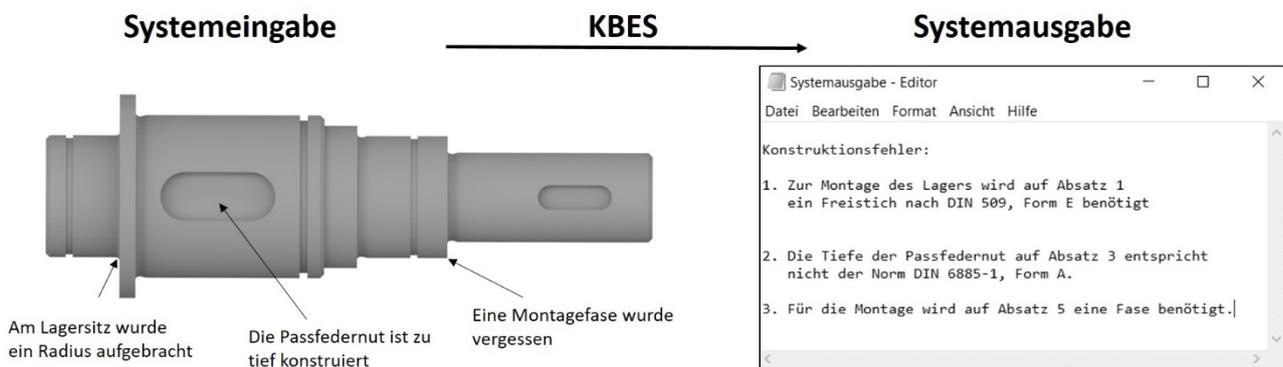


Abbildung 3: Ein- und Ausgabe des Systems

Die erhaltenen Fehlermeldungen wurden anschließend ausgewertet und auf Richtigkeit überprüft. Eine anschließende Befragung der Studierenden ergab, dass das System zuverlässig die Fehler in den konstruierten Normelementen ermitteln kann. Außerdem werden eventuelle Überschreitungen der Aufgabenrestriktionen erkannt und hilfreiche Hinweise zu den Fehlern gegeben.

Die Befragung zeigte allerdings auch auf wo die Grenzen des Systems liegen. Wenn die Lösungen zu sehr von der Aufgabenstellung abweichen, bzw. vom gültigen Lösungsraum entfernen, ist keine adäquate Ausgabe des Systems mehr möglich. Als Beispiel wurde in einer Lösungsvariante die Sicherung der Lager mit einer Wellenmutter realisiert. Da dies in

der Aufgabe nicht gewünscht ist und somit auch nicht in der Wissensbasis eingepflegt war, erkennt das System das Gewinde nicht und wies lediglich auf eine fehlende Sicherungsringnut hin.

5 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Paper wurde ein Systemaufbau beschrieben, welcher durch die Umkehrung des Syntheseprozesses eines KBES die Analyse von CAD-Konstruktionen ermöglicht. Der entwickelte Systemaufbau wurde in das CAD-System Autodesk Inventor implementiert und anschließend anhand einer Wellenkonstruktion getestet.

Die Implementierung des Analysesystems ist durch die Inventor eigenen Tools und die Einbindung von MS Excel in vollem Umfang möglich und durch die Entkoppelung der Wissensbasis nachträglich zu erweitern und anzupassen. Die Ergebnisse des Tests zeigen, dass das entwickelte System dazu in der Lage ist Konstruktionen zu Analysieren und hinsichtlich Normkonformität sowie Aufgabenrestriktionen zu bewerten.

In Zukunft soll bestimmt werden, in wieweit sich das System auch auf andere Konstruktionsaufgaben übertragen lässt. Außerdem ist eine Erweiterung der Wissensbasis geplant, um zusätzliche Normelemente detektieren zu können und den Konstruktionslösungen mehr Freiheiten zu bieten. Dabei gilt es insbesondere zu untersuchen, in wie weit ein formales Wissenssystem für die Expansion auf umfassendere Konstruktionsaufgaben geeignet ist und wo die Grenzen des Systems liegen.

Literatur

- [1] La Rocca, Gianfranco: *Knowledge based engineering: Between AI and CAD. Review of a language based technology to support engineering design*. Advanced Engineering Informatics, Vol. 26, No. 2, pp. 159-179, 2012. DOI: 10.1016/j.aei.2012.02.002.

- [2] Plappert, Stefan; Gemarski, Paul Christoph; Lachmayer, Roland: *The Use of Knowledge-Based Engineering Systems and Artificial Intelligence in Product Development: A Snapshot*. In: Świątek J., Borzemski L., Wilimowska Z. (eds) *Information Systems Architecture and Technology: Proceedings of 40th Anniversary International Conference on Information Systems Architecture and Technology – ISAT 2019, Advances in Intelligent Systems and Computing*, Vol. 1051. Cham: Springer, 2019. DOI: 10.1007/978-3-030-30604-5_6
- [3] VDI-Richtlinie 5610 Blatt 2:2017-05: *Wissensmanagement im Ingenieurwesen - Wissensbasierte Konstruktion (KBE)*. Berlin: Beuth Verlag, 2017.
- [4] Hopgood, Adrian A.: *Intelligent systems for engineers and scientists*. CRC press, 2012.
- [5] Schreiber, G.; Wielinga, B.; De Hoog, R.; Akkermans, H.; Van de Velde, W.: *CommonKADS: A comprehensive methodology for KBS development*. *IEEE expert*, Vol. 9, No. 6, pp. 28-37, 1994. DOI: 10.1109/64.363263
- [6] Dostatni, Ewa; Diakun, Jacek; Grajewski, Damian; Wichniarek, Radoslaw; Karwasz, Anna: *Multi-agent system to support decision-making process in design for recycling*. Vol. 20, No. 11, pp. 4347-4361, *Soft Computing*, 2016. DOI: 10.1007/s00500-016-2302-z
- [7] Milton, Nick R.: *Knowledge technologies*. Vol. 3., Polimetrica sas, 2008.
- [8] Verhagen, Wim J.C.; Bermell-Garcia, Pablo; Van Dijk, Reinier E.C.; Curran, Richard: *A critical review of Knowledge-Based Engineering: An identification of research challenges*. *Advanced Engineering Informatics*, Vol. 26, No. 1, pp. 5-15, 2012. DOI: 10.1016/j.aei.2011.06.004
- [9] Skarka, Wojciech: *Application of MOKA methodology in generative model creation using CATIA*. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Vol. 20, no. 5, pp. 677-690, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2006.11.019>
- [10] Hirz, Mario; Dietrich, Wilhelm; Gfrerrer, Anton; Lang, Johann: *Integrated computer-aided design in automotive development*. Berlin, Heidelberg, Germany: Springer, 2013. DOI: 10.1007/978-3-642-11940-8
- [11] Gembarski, Paul Christoph; Lachmayer, Roland: *Solution space development: conceptual reflections and development of the parameter space matrix as planning tool for geometry-based solution spaces*. *International Journal of Industrial Engineering and Management (IJIEM)*, Vol. 9, No 4, pp. 177-186, 2018. DOI: 10.24867/IJIEM-2018-4-177
- [12] Plappert, Stefan; Hoppe, Lukas; Gembarski, Paul Christoph; Lachmayer, Roland: *APPLICATION OF KNOWLEDGE-BASED ENGINEERING FOR TEACHING DESIGN KNOWLEDGE TO DESIGN STUDENTS*. In *Proceedings of the Design Society: DESIGN Conference*, Vol. 1, pp. 1795-1804, Cambridge University Press, 2020. DOI: 10.1017/dsd.2020.300

Vergleich der Ansätze von Product Lifecycle Management und Digitalen Zwilling

Dmytro Adamenko, Steffen Kunnen, Arun Nagarajah

Institut für Produkt Engineering, Universität Duisburg-Essen

Lotharstr. 1, 47057 Duisburg

Email: dmytro.adamenko@uni-due.de; Internet: <https://www.uni-due.de/pep/>

Inhalt: Mit der raschen Entwicklung moderner Informations- und Kommunikationstechnologien und -infrastrukturen findet der Ansatz von dem Digitalen Zwilling immer mehr Bedeutung in der Industrie und Forschung. Eine der möglichen Anwendungen dieser Technologien und des Digitalen Zwillings ist die virtuelle Abbildung des Zustands eines physikalischen Objektes oder Systems durch die Erfassung und Auswertung von realen Betriebs- und Messdaten. In der Industrie hat sich allerdings seit mehreren Jahren der Ansatz des Product Lifecycle Management (PLM) etabliert. Im Rahmen der PLM-Strategie werden die Produktdaten während des gesamten Lebenszyklus, von der Ideenentwicklung bis Entsorgung abgebildet und verwaltet. Somit können per Definition auch die beliebigen Zustände eines Produktes abgebildet werden.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, die Merkmale des Digitalen Zwillings und des PLM zu definieren sowie Ähnlichkeiten und Unterschiede zwischen den beiden Ansätzen zu finden.

Stichwörter: Digitaler Zwilling, Product Lifecycle Management.

Comparison of the Approaches of Product Lifecycle Management and Digital Twin

Abstract: With the rapid development of modern information and communication technologies and infrastructures, the digital twin approach is becoming increasingly important in industry and research. One of the possible applications of these technologies and of the Digital Gemini is the virtual representation of the state of a physical object or system through the acquisition and evaluation of real operating and measurement data. In industry, however, the Product Lifecycle Management (PLM) approach has been established for several years. Within the framework of the PLM strategy, product data is mapped and managed throughout the entire life cycle, from idea development to disposal. This means that, by definition, any states of a product can be mapped.

The goal of the present work is to define the characteristics of the digital twin and PLM and to find similarities and differences between the two approaches.

Keywords: Digital Twin, Product Lifecycle Management.

1 Einleitung

Die Digitalisierung der Industrie wird unter dem Begriff Industry 4.0 vorangetrieben und zeichnet sich durch zwei zentrale Merkmale wie intelligente Komponenten und Vernetzung aus. Die digitale Existenz von Produkten erzeugt über den Produktlebenszyklus große Datenmengen, insbesondere beim Einsatz von Sensortechnologien. Diese Daten haben sowohl für den Nutzer oder Betreiber des Produktes als auch für den Entwickler und Hersteller einen großen Wert [1].

Unternehmen sind ständig bemüht, die Leistungsfähigkeit ihrer Produkte oder ihrer eigenen Prozesse weiter zu optimieren. Der Ansatz des Produktdatenmanagements und die Strategie des Produktlebenszyklusmanagements haben sich in den letzten Jahrzehnten als zentrale Lösungen für die Verwaltung von Daten komplexer Produkte und Anlagen etabliert. Mit dem technischen Fortschritt und der stetigen Weiterentwicklung der Informations-, Kommunikations- und Automatisierungstechnologien entwickelt sich die Möglichkeit, verschiedene Komponenten in Echtzeit miteinander zu vernetzen und einen Einblick in aktuelle Prozesse oder den aktuellen Status des Produktes zu erhalten. Die vernetzten Komponenten und Maschinen erzeugen eine Vielzahl von Daten, die zur Analyse verwendet werden können [2], [3].

Das Flaggschiff dieser gezielten Datennutzung ist der digitale Zwilling, ein Konzept, das die Vernetzung von Komponenten und die durch die Daten verfügbaren Einblicke in die aktuellen Produktstruktur und Zustand nutzt. Dieser Ansatz gewinnt immer mehr Interesse und Bedeutung in der Industrie, hat sich aber noch nicht vollständig durchgesetzt. Aus diesen Gründen werden die digitalen Zwillinge im Folgenden näher betrachtet. Das Konzept und die Aufbaumethoden eines digitalen Zwillings werden im Detail vorgestellt [3], [4].

2 Product Lifecycle Management

Die Strategie des Product Lifecycle Management wird als produktbezogenes und unternehmensübergreifendes Informationsmanagement definiert, das die Planung, Steuerung und Organisation der Prozesse umfasst, die für die Generierung und ganzheitliche Verwaltung aller Daten, Dokumente und Ressourcen während des gesamten Produktlebenszyklus erforderlich sind. Dadurch werden die Produktmodelle mit ihren für den gesamten Lebenszyklus relevanten Informationen digital abgebildet. Für Aufbau des ganzheitlichen Produktmodells werden Partialmodelle für unterschiedliche technische

Anwendungsgebiete (Geometrie-, Simulations- und Datenmodelle usw.) und für die einzelnen Phasen des Produktlebenszyklus definiert. [5].

Einsatz der PLM Strategie sichert einen durchgängigen Informationsfluss, so dass aktuelle Produktinformationen und auch die früheren Entwicklungs- und Betriebszustände jederzeit und für alle an der Produktentstehung, -herstellung und -nutzung Beteiligten verfügbar sind. Durch transparente Prozesse führt PLM letztlich zu einer Verbesserung der Produktqualität sowie zu Kosten- und Zeitvorteilen über den gesamten Produktlebenszyklus. PLM sollte als unternehmensübergreifender Ansatz betrachtet werden, der auch die heute global verteilten Prozesse entlang des gesamten Produktlebenszyklus berücksichtigt [6].

Schwerpunkte von PLM sind die gleichzeitige, unternehmensweite Bereitstellung von Produktdaten und der schnelle, geordnete Zugriff auf diese sowie die Realisierung durchgängiger, standardisierter Unternehmensprozesse. PLM stellt leistungsfähige Klassifizierungssysteme zur Identifizierung und Suche von Produktdaten zur Verfügung, die die eindeutige Zuordnung und Identifizierung von Bauteilen und Baugruppen erleichtern und die Eindeutigkeit jedes verwendeten Bauteils unterstützen. Darüber hinaus wurden die spezifischen Ansätze zur Abbildung und Auswertung des Zustandes der Produkte entwickelt. So wurde eine Produktlebenszyklus-Datenerfassungstechnologie vorgestellt, die Sensoren und Mikroprozessoren zur dynamischen Erfassung von Produktbetriebsdaten einsetzt, um ein Produktbetriebsdatenmodell aufzubauen. Dabei werden die logischen Beziehungen von Produktdaten untersucht, mit dem Ziel, eine einheitliche logische Datenquelle für die verteilten Produktdaten aufzubauen. [7], [8], [11], [23]

Die Umsetzung der PLM-Strategie erfordert verschiedene Lösungsmodule, wobei das Produktdatenmanagement eine Schlüsselrolle innerhalb der PLM Strategie spielt. Das Produktdatenmanagement gilt als wesentlicher Enabler für PLM und als die technologische Basis, die PLM ermöglicht [9]. Ohne ein PDM-System als zentrale Softwarekomponente kann eine PLM-Strategie im Unternehmen nicht umgesetzt werden. Produkt- und Prozessmanagement zusammen ermöglichen die vollständige Rekonfiguration jedes Design- und Fertigungsstandes über den gesamten Produktlebenszyklus [6], [7].

Mit der Weiterentwicklung der Technologien entwickelt sich PLM nun zu einer ganzheitlichen Disziplin über den gesamten Produktlebenszyklus und im gesamten Unternehmen - vom Anforderungsmanagement bis zur Verarbeitung von IoT-Daten. Im klassischen PLM-Ansatz ist der dokumentenzentrierte Ansatz immer noch weit verbreitet. Die moderne Anwendung des PLM-Konzepts sieht jedoch die gemeinsame Nutzung und

den Austausch von Daten vor, so dass die Informationen aus den Dokumenten extrahiert und als Metadaten in einer Datenbank gespeichert werden. Entscheidend ist es, sicherzustellen, dass die gespeicherten Daten während des gesamten Lebenszyklus die single source of truth für das Produkt bleiben [10].

3 Definition und Aufbau des Digitalen Zwillings

Es gibt viele verschiedene Beschreibungen und Definitionen für den Digitalen Zwilling, die sich je nach Zweck und Umfang unterscheiden. Die von Martinez et. al. durchgeführten vergleichenden Analysen zeigen deutliche Unterschiede in der Interpretation des Konzepts des digitalen Zwillings und seiner Verwendung als Geschäftsmodell. In diesem Kapitel wird ein kleiner Überblick über bestehende Konzepte und Definitionen sowie über die gängigsten Aufbaumethoden gegeben [22].

Das Konzept des digitalen Zwillings (DT) wurde 2003 von Michael Grieves als ein Modell definiert, das aus drei Hauptkomponenten besteht: dem physischen Produkt in der realen Welt, dem virtuellen Produkt in der digitalen Welt und der Verbindung zwischen den realen und virtuellen Objekten mittels Daten und Informationen [13].

In neueren Publikationen wird der digitale Zwilling nicht mehr mit den drei bereits erwähnten Dimensionen beschrieben, sondern mit fünf Dimensionen [14]. Dieses Modell baut auf dem von Grieves eingeführten dreidimensionalen Modell auf und fügt die Daten des digitalen Zwillings und die Services als jeweilige Dimensionen hinzu. Abbildung 1 zeigt dieses Modell im Detail. PE steht für die physische Einheit, VE für die virtuelle Einheit, SS für die Services, DD bezieht sich auf die Daten des DT und CN für die Anschlüsse [14]. Die Gesamtheit dieser Komponente stellt einen digitalen Zwilling dar [15].

Für den weiteren Verlauf dieser Arbeit wird der digitale Zwilling (DT) definiert als ein digitales Bild eines physischen Objekts aus der realen Welt. Dieses exakte Abbild enthält alle Eigenschaften, Formationen und Zustände des realen Objekts [3].

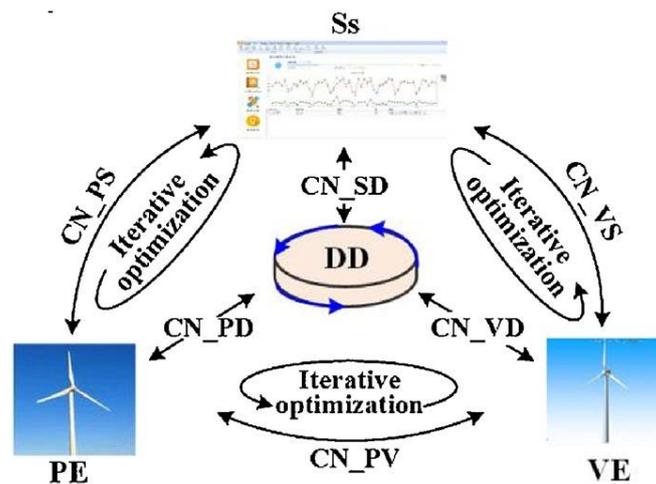


Bild 1: Fünf Dimensionen eines digitalen Zwillings [14].

Eine weitere Sicht auf den Digitalen Zwilling bietet das Positionspaper der WiGeP an. Danach wird der Digitale Zwilling aus einem Digitalen Master und Digitalem Schatten zusammengesetzt. Der Digitale Master besteht aus der Geometrie sowie den verhaltensbeschreibenden Modellen des Produktes bzw. des Systems. Als Digitaler Schatten wird das Abbild der Betriebs-, Prozess- und Zustandsdaten des Produktes verstanden. Der Digitale Zwilling nach WiGeP dient zur Erfassung und Speicherung von Fertigungs-, Montage-, Mess-, Betriebs oder Instandhaltungsdaten und somit die unterschiedlichen Phasen des Produktlebenszyklus abbildet. Der Fokus liegt dabei auf der Abbildung des realen Zustands und Verwendung von realen Messdaten für die Simulation von einzelnen Zuständen und des Verhaltens des Produkts [25].

Die weiteren Ansätze zum Aufbau von einem digitalen Zwilling können im Wesentlichen in zwei verschiedene Gruppen unterteilt werden. Die erste Möglichkeit ist die Erstellung eines Systemmodells des physischen Objekts, das mit realen Produktdaten angereichert werden soll. Die andere Möglichkeit besteht darin, eine Datenstruktur zu erstellen, die die Sensordaten und andere Informationen organisiert und verknüpft. Unabhängig von der Aufbaumethode ist ein digitaler Zwilling immer anwendungsspezifisch und einzigartig und wird für eine bestimmte Aufgabe erstellt. Die ganzheitliche Beschreibung des Assets durch Modelle muss aufgabenbedingt erfolgen, sodass der Aufwand für die Abbildung des Produktes nicht den Nutzen der Anwendung des Digitalen Zwillings übersteigt [20], [24].

Bei einem datenbasierten digitalen Zwilling steht die Strukturierung des Datenflusses durch die KI und Machine Learning Algorithmen im Vordergrund. Dabei werden die einzelnen Instanzen des physikalischen Objektes z.B. nach den erkannten Datenmustern sortiert, um

einen Einblick in den aktuellen Zustand und die Leistungsfähigkeit des Produkts zu erhalten. Zur Strukturierung kann z.B. eine IoT-Plattform verwendet werden, die dem Benutzer verschiedene Anwendungen zur Strukturierung von Daten zur Verfügung stellt. Durch diese Anwendungen können die strukturierten Daten mit den vom Benutzer definierten Werkzeugen gespeichert und analysiert werden. Beim Aufbau eines solchen Zwillings werden die aus der Operation generierten Daten verwendet (bottom-up). Datengetriebene Modelle bieten aufgrund ihres Black-Box-Typs weniger Einblick in das Innere des Systems [3], [20], [21].

Der Aufbau des systembasierten digitalen Zwillings stellt das physische Objekt und vordefinierte Logik und Beziehungen zwischen den einzelnen Produkt- und Systemkomponenten in den Vordergrund. Eine komplexe Baugruppenstruktur mit Partialmodellen wird aufgebaut. Jede Änderung des Systemmodells oder eines einzelnen Partialmodells wird dokumentiert. Der digitale Zwilling sollte von mehreren Benutzern verwendet werden können. Als Plattform für den Aufbau des systembasierten Digitalen Zwillings kann ein PDM-System dienen.

Top-Down oder systembasierter Aufbaukonzept bietet bessere Einblicke in das zu entwickelnde System und erfordert die maximal mögliche (und maximal sinnvolle) Parametrisierung des Systems. Diese Aufbaumethode ist mit erheblichem Zeitaufwand und damit hohen Entwicklungskosten verbunden, da die Schnittstellen zwischen allen virtuellen und realen Komponenten klar strukturiert und definiert sein müssen. Im Anschluss werden die erfassten Daten mit den Partialmodellen verknüpft. Der so aufgebaute digitale Zwilling kann z.B. für Simulationen von theoretischen Szenarien verwendet werden, um mögliche Ausfälle der physikalischen Instanz vorherzusagen und zu verhindern. Der Vorteil eines systembasierten digitalen Zwillings liegt in der Möglichkeit, die erzeugten Datenstrukturen und Teilmodelle für Simulationsvorhersagen zu nutzen, was einen tieferen Einblick in die Leistungsfähigkeit des Objekts ermöglicht [3], [20].

4 Gegenüberstellung von PLM und Digitalem Zwilling

Wie aus der Literaturübersicht hervorgeht, ist die Kernidee sowohl des PLM- als auch des Konzepts des digitalen Zwillings ein ganzheitliches Produktmodell, das aus mehreren miteinander verknüpften Modellen besteht, um unterschiedliche Sichtweisen auf das reale Produkt zu ermöglichen. Eine Speicherung von Daten, die das Produkt zu jeder Zeit

beschreiben, ist ebenfalls einer der wichtigen Aspekte beider Ansätze. Dabei werden die unterschiedlichen Phasen des Produktlebenszyklus abgebildet.

Um die Unterschiede zwischen den beiden Ansätzen zu verdeutlichen, wurden die relevanten Kriterien für Vergleich definiert. Die Ergebnisse des Vergleichs von beiden Ansätzen sind in Tabelle 1 ihre Charakteristika nach ausgewählten Kriterien dargestellt.

Die Datenstruktur ist von besonderer Bedeutung bei der Erfassung des Zustandes des Produktes zu einem bestimmten Zeitpunkt. Durch die Schlankheit, systematische und übersichtliche Organisation und Bereitstellung der Daten in vordefinierten Formaten, kann auf die notwendigen Informationen direkt zugegriffen werden. Der typische Ansatz bei der PLM Strategie ist die Speicherung von Daten entsprechend der Produktstruktur im PDM-System. Mit dieser Struktur werden die Daten verknüpft, die den Produktlebenszyklus beschreiben, wie z. B. Wartungsprotokolle usw. Im Falle eines systembasierten Digitalen Zwillings werden die Zustandsdaten ebenfalls an die Produktstruktur verknüpft.

Durch das Kriterium Datenaustausch werden die Möglichkeiten der Datenabfrage und -Bereitstellung für die Ansätze definiert. Im Falle des PLM Ansatzes, erfolgt der Datenaustausch durch die Abfragen innerhalb eines PDM-Systems. Dabei können die Daten sowohl in Form von Modellen als auch von nicht maschineninterpretierbaren Dokumenten vorliegen. Bei dem Digitalen Zwilling liegen die Daten in Modellform vor und können sowohl auf Anfrage bereitgestellt als auch für weitere Anwendungen und Modelle genutzt werden. Besonders hervorzuheben ist die Möglichkeit der Automatisierung des Datenaustauschs, um die immer größere Menge an Daten auszutauschen und die Anzahl an Benutzerfehlern reduzieren zu können.

Die Erfassung des Zustandes des Produktes soll möglichst in Echtzeit erfolgen. Deswegen wurde ein Kriterium zur Echtzeitfähigkeit von beiden Ansätzen hinzugefügt. Im Rahmen der dokumentenzentrierten Struktur ist die Nutzung von Echtzeit- und historischen Daten zur Prognose des Verhaltens des Produktes bzw. Systems erschwert. Bei der vorliegenden

Tabelle 1: Vergleich der Ansätze von PLM und dem digitalen Zwilling

Eigenschaft	PLM	Digitaler Zwilling
Datenstruktur	<ul style="list-style-type: none"> • Datenspeicherung im PDM-System • Primär dokumentenzentriert • Modellzentrierte Ansätze werden entwickelt • Verlinkung mehrerer Partialmodelle 	<ul style="list-style-type: none"> • System- oder datenbasiert • Beim systembasierten Ansatz Verknüpfung mehrerer Partialmodelle • Beim systembasierten Ansatz ein PDM-System kann als Plattform für die Modelle und Datenspeicherung dienen
Datenaustausch	<ul style="list-style-type: none"> • Vorwiegend dokumentenbasiert • Gemeinsamer Zugriff auf die Dokumente 	<ul style="list-style-type: none"> • Microservices • Mittels einer IoT-Plattform
Datennutzung in der Echtzeit zur Verhaltensprognose	<ul style="list-style-type: none"> • Speicherung • Simulation innerhalb der verknüpften Modelle • Kaum möglich bei dokumentenzentrierter Struktur 	<ul style="list-style-type: none"> • Maschinelles Lernen innerhalb der IoT-Plattform • Cross-Impact-Analyse bei systembasiertem Aufbau • Integration von KI-Algorithmen für große Datenmengen
Abdeckung des gesamten Produktlebenszyklus und Möglichkeit der Rückverfolgung einzelner Produkte	<ul style="list-style-type: none"> • Abdeckung des gesamten Lebenszyklus • Großer Aufwand bei dokumentenzentrierter Struktur 	<ul style="list-style-type: none"> • Abdeckung der Herstellungs-, Betriebs- und Wartungsprozesse durch die Integration von dem Digitalen Schatten sowie Aufbau eines datenbasierten Digitalen Zwillings • Integration in die Entwicklungsphase durch den Einsatz von dem Digitalen Master möglich • Große Transparenz • Unikal für jedes Produkt in der Produktion / im Betrieb
Produktsteuerung	<ul style="list-style-type: none"> • Definierte Workflows mit definierten Rollen und Aktivitäten • Definierte Benachrichtigungs- und Validierungs-Workflows 	<ul style="list-style-type: none"> • Definierte Workflows, Rollen z.B. innerhalb eines systembasierten digitalen Zwillings über PDM-System • Definierte Rollen, Benachrichtigungen und Arbeitsabläufe innerhalb der IoT-Plattform für datenbasierte digitale Zwillinge
Möglichkeit der verteilten Zusammenarbeit	<ul style="list-style-type: none"> • Uneingeschränkte Zusammenarbeit innerhalb eines einzigen Unternehmens • Zusammenarbeit zwischen den Unternehmen hauptsächlich aufgrund von Zugriffsrechten eingeschränkt 	<ul style="list-style-type: none"> • Digitaler Zwilling als Kommunikation zwischen Entwicklern, Betreibern und Instandhaltern
Rückführung von Erkenntnissen aus dem Betrieb in die Entwicklung weiterer Produkte dieser Art	<ul style="list-style-type: none"> • Bei dokumentenbasierter Struktur durch Dokumente aus der Produktions-, Betriebs-, Wartungs- und Recyclingphase möglich 	<ul style="list-style-type: none"> • Verwendung bekannter Schnittstellentechniken, Datenübertragungs- sowie Vernetzungs- und Kommunikationsfunktionalitäten für neue Produkte und Digitale Zwillinge • Nutzung der Erkenntnisse (angepasste Modelle) des Digitalen Zwillings als Feedback-to-Design

modellbasierten Struktur innerhalb der PLM Strategie oder im Digitalen Zwilling, können die Simulations- und Verhaltensmodelle mit Daten versorgt werden und die Prognose zum weiteren Betrieb des Produktes liefern.

Die Abbildung des gesamten Lebenszyklus eines Produktes, von der Idee bis zum Recycling erlaubt die einzelnen Merkmale des Produkts und dessen Leistung bereits mit den aufgestellten Initialanforderungen zu verknüpfen. Der PLM Ansatz bietet die volle Abdeckung des Produktlebenszyklus auch über Unternehmensgrenzen hinweg. Ein Digitaler Zwilling dagegen hat einen eigenen Lebenszyklus, der allerdings mit dem Lebenszyklus des physikalischen Produktes verknüpft wird. Bereits bei der Planung und Entwicklung eines Produkts oder eines Prozesses kann mit Hilfe von Simulationen mit dem digitalen Zwilling vorhergesagt werden, ob die gewünschten Eigenschaften und Funktionen erfüllt werden. Eine feste Verknüpfung mit dem physikalischen Objekt erfolgt mit frühen Schritten der Beschaffung und Fertigung.

Im Laufe des Produktlebenszyklus müssen komplexe Datenstrukturen und Geschäftsprozesse auch über Unternehmensgrenzen hinweg koordiniert und gesteuert werden. Dazu gehören die Definition von Nummernsystemen, Statusnetzwerken oder auch entsprechenden Workflows, die die Automatisierung der Geschäftsprozesse unterstützen. Der Aufbau solcher Workflows gehört zu den Basisfunktionen von PDM-Systemen. Auch innerhalb von IoT-Plattformen steht die Möglichkeit der Workflowdefinition zur Verfügung. Die Festlegung der zugehörigen Rollen für die Bearbeitung und Nutzung von gewonnenen Betriebsdaten ist wichtig für die Sicherheit der Daten und deren Weiterverwendung in den Simulations- und Verhaltensmodellen.

Die Erfassung und Nutzung der Erkenntnisse aus dem Betrieb eines Produktes ist ein wichtiges Kriterium für die Industrieunternehmen. Bei der Nutzung der modellbasierten Struktur innerhalb der PLM Strategie und des digitalen Zwillings können die Modellanpassungen vorgenommen und durch die realen Betriebsdaten validiert werden. Diese Modelle können für die Optimierung des aktuellen Produktes und die Entwicklung neuer Produktgenerationen genutzt werden und einen aktiven Wissensrückfluss sicherstellen.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Wie der Tabelle 1 zu entnehmen ist, haben beide Ansätze gemeinsame Eigenschaften und Merkmale und können als Ergänzung zueinander betrachtet werden, wobei die guten

Fähigkeiten innerhalb von PLM auf ein virtuelles Produktmodell und ein physisches Produkt angewandt werden können. Beide Konzepte beschreiben ein vollständiges virtuelles Produktmodell aus verschiedenen Blickwinkeln durch Integration verschiedener Partialmodelle. Sowohl das PLM- als auch das Konzept vom digitalen Zwilling können Prozess-Frameworks umfassen, so dass die verschiedenen Zustände oder Lebenszyklen der Produkte innerhalb fester Arbeitsabläufe mit Integration definierter Abteilungen oder Anbieter bearbeitet werden können. Das Hauptziel des Konzepts des digitalen Zwillings ist die Datenverarbeitung und der Datenaustausch in Echtzeit zwischen dem virtuellen Produktmodell und seinem physischen Zwilling, während das PLM-Konzept die Datenverarbeitung und den Datenaustausch im Allgemeinen definiert.

Die Entwicklung des PLM-Ansatzes hat zu einer Migration von der dokumentenzentrierten Informationsspeicherung zur Datenzentrierung geführt, und dies ist ein großer Schritt hin zur Kombination mit dem Konzept des digitalen Zwillings, da die Möglichkeit besteht, Datenverarbeitungsalgorithmen durch die gespeicherten Daten in Echtzeit zu nutzen. Der Einsatz des Digital-Twin-Ansatzes eignet sich derzeit nicht für alle Phasen des Produktlebenszyklus (z.B. Vertrieb), kann aber in Kombination mit PLM einen Mehrwert generieren.

Der größte Nutzen lässt sich durch eine geschickte Kombination beider Ansätze erzielen. Die Struktur des digitalen Zwillings kann innerhalb des PDM-Systems aufgebaut werden. Das Systemmodell kann weiterhin als "Skelett" des digitalen Zwillings mit den definierten logischen Verknüpfungen zwischen den im PDM-System gespeicherten Teilmodellen verwendet werden. Auch Sensor- und Simulationsdaten können kontinuierlich gespeichert und verknüpft werden. Durch die Verwendung des PDM-Systems wird auch jede Einstellung des Gesamtsystems und jedes einzelne Teilmodell dokumentiert. Der digitale Zwilling sollte von mehreren Benutzern verwendet werden können. Mit Hilfe des PDM-Systems können die Rechte und Rollen der einzelnen Benutzer festgelegt werden, so dass der notwendige Know-how-Schutz gewährleistet werden kann.

Für die Verarbeitung der Daten in Echtzeit und genutzt wird die Integration des PDM-Systems mit der IoT-Plattform oder zusätzlich definierten Überwachungsmethoden und Workflows benötigt. Viele der Datenplattformen bieten auch Schnittstellen zu PDM-Systemen an, wodurch die Zuordnung von Daten und Simulationsergebnissen zu einem konkreten Anlagenzustand erleichtert wird. Auf der Grundlage der vorhandenen Daten und

Simulationsergebnisse lassen sich Empfehlungen aussprechen, die die Vorteile beider Ansätze in einem einzigen Rahmen vereinen.

Literatur

- [1] Porter, M. E., Heppelmann, J. E.: How smart products change the competition. *Harvard-Business-Manager*, vol. 36(12), pp. 34-60. Hamburg (2014).
- [2] Schützer, K., de Andrade Bertazzi, J., Sallati, C., Anderl, R., Zancul, E.: Contribution to the development of a Digital Twin based on product lifecycle to support the manufacturing process. In: 29th CIRP Design 2019, *Procedia CIRP* 84, pp. 82-87 (2019).
- [3] Vogt, O.: Auswahl einer geeigneten Plattform zur Abbildung eines digitalen Zwillings. Masterarbeit. Duisburg (2019).
- [4] Mrzyk, P.: Aufbau eines Demonstrators von einem Digitalen Zwilling. Bachelorarbeit. Duisburg (2020).
- [5] Eigner, M., Gerhardt, F., Gilz, T., Mogo Nem, F.: *Information technology for engineers*. Springer, Berlin Heidelberg (2012).
- [6] Eigner, M., Stelzer, R.: *Product Lifecycle Management: A guide for Product Development and Life Cycle Management*. 2nd edn. Springer, Berlin Heidelberg (2009).
- [7] Schilke, M.: Einsatz von Produktdatenmanagement-Systemen im Sondermaschinenbau für die Automobilindustrie. Doktorarbeit. Saarbrücken (2010).
- [8] Abramovici, M.; Schulte, S.: Benefits of PLM: expert study, eDM-Report 1, pp. 16-23. Dressler, Heidelberg (2005).
- [9] Stark, J.: *Product Lifecycle Management (Volume 1): 21st century Paradigm for product Realization*. 4th edn. Springer, Cham (2020).
- [10] Zammit, J. P., Gao, J., Evans, R.: The Challenges of Adopting PLM Tools Involving Diversified Technologies in the Automotive Supply Chain. In: Ríos J., Bernard A., Bouras A., Foufou S. (eds) *Product Lifecycle Management and the Industry of the Future, PLM 2017, IFIP Advances in Information and Communication Technology*, vol 517, pp. 59-68. Springer, Cham (2017).
- [11] Simon, M., Bee, G., Moore, P.: Modeling of the life cycle of products with data acquisition features. In: *Computers in Industry* 45, pp. 111-122 (2001).
- [12] Stark, R., Pförtner A.: Integrating ontology into PLM-tools to improve sustainable product development. In: *CIRP Annals – Manufacturing Technology* 64, pp. 157-160 (2015).
- [13] Grieves, M.: *Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication*. Whitepaper (2014).
- [14] Tao, F., Zhang, M.: Digital twin driven prognostics and health management for complex equipment. In: *CIRP Annals – Manufacturing Technology* 67 (1), pp. 169-172 (2018).
- [15] Tao, F., Zhang, M., Nee, A. Y. C.: *Digital Twin Driven Smart Manufacturing*. 1st edn. Academic Press (2019).
- [16] Schleich, B., Anwer, N., Mathieu, L., Wartzack, S.: Shaping the digital twin for design and production engineering. In: *CIRP Annals – manufacturing Technology* 66 (1), pp. 141-144 (2017).

-
- [17] Kitain, L.: The New Age of Manufacturing: Digital Twin Technology. Seebo Homepage, <https://www.seebo.com/digital-twin-technology>, last accessed 2020/03/15.
- [18] Halpern, M.: Busting the Myth of Digital Twins and Planning Them Realistically. Gartner (2017).
- [19] Cognizant: Study: Is Your Organization Ready to Embrace a Digital Twin? Cognizant (2018).
- [20] Adamenko, D., Kunnen, S., Pluhnau, R., Loibl, A., Nagarajah, A.: Review and comparison of the methods of constructing the Digital Twin. In: 30th CIRP Design 2020, Procedia CIRP (2020).
- [21] Adamenko, D., Kunnen, S., Nagarajah, A.: Comparative Analysis of Platforms for Designing a Digital Twin. In: Ivanov, V., Trojanowska, J., Pavlenko, I., Zajac, J., Perakovic, D. (eds) Advances in Design, Simulation and Manufacturing III – Proceedings of the 3rd International Conference on Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange, DSMIE-2020, Volume 1: Manufacturing and Materials Engineering. Springer, Cham (2020).
- [22] Martinez V., Ouyang A., Neely A., Burstall C., Bisessar D.: Service business model innovation: the digital twin. Cambridge Service Alliance (2018).
- [23] Zhang, W., Fan, Y.: Design for Product Lifecycle Management. In: Information Technology For Balanced Manufacturing Systems. BASYS 2006. IFIP International Federation for Information Processing, vol 220. Springer, Boston, MA (2006).
- [24] Tchana, Y., Ducellier, G., Remy, S.: Designing a unique Digital Twin for linear infrastructures lifecycle management. In: 29th CIRP Design 2019, Procedia CIRP 84, pp. 545-549 (2019).
- [25] Stark, R., Anderl, R., Thoben, K.-D., Wartzack, S. et al.: WiGeP-Positionspapier: „Digitaler Zwilling“. In: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 115, pp. 47-50. Carl Hanser Verlag, München (2020).

Charakterisierung der Entwicklungsaufgabe zur methodischen Potentialfindung in der standortverteilten Produktentwicklung

Katharina Duehr, Bernhard Nix, Albert Albers

IPEK – Institut für Produktentwicklung, Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Kaiserstr. 10, Geb. 10.23, 76131 Karlsruhe

E-Mail: katharina.duehr@kit.edu; Internet: <http://www.ipek.kit.edu>

Inhalt: *Globalisierung, Digitalisierung, Individualisierung und immer kürzer werdende Produktlebenszyklen stellen Unternehmen zunehmend vor große Herausforderungen, vor allem im Bereich der Produktentwicklung. Um diesen Herausforderungen gerecht zu werden ist eine möglichst effiziente Nutzung der zur Verfügung stehenden Ressourcen notwendig. Für global aufgestellte Unternehmen bedeutet dies auch den Einsatz von standortverteilter Produktentwicklung. Um das volle Potential etablierter Prozesse und Methoden der standortgebundenen Entwicklung auch in der neuen Entwicklungssituation nutzen zu können, müssen diese auf die vorherrschende Entwicklungssituation angepasst werden. Hierfür muss zunächst die neue Entwicklungssituation mit ihren speziellen Anforderungen beschrieben werden. Der vorgestellte Ansatz beschäftigt sich speziell mit der Entwicklungsaufgabe, als Teil der Entwicklungssituation, und identifiziert Faktoren anhand derer die Entwicklungsaufgabe im Hinblick auf ihre Eignung zur standortverteilten Durchführung charakterisiert werden kann.*

Stichwörter: *standortverteilte Produktentwicklung, Entwicklungsaufgabe, Entwicklungssituation, Methodeneinsatz*

Characterization of the development task for methodical identification of potentials in distributed product development

Abstract: *Globalisation, digitalisation, individualisation and ever shorter product life cycles are increasingly presenting companies with major challenges, especially in the area of product development. To meet these challenges, the most efficient use of available resources is necessary. For globally positioned companies, this also means the use of distributed product development. In order to unfold the full potential of established processes and methods of location-bound development also in the new development situation, they have to be adapted. For this purpose, the new development situation with its special requirements must first be described. The presented approach deals specifically with the development task as part of the development situation and identifies factors by means of which the development task can be characterized with regard to its suitability for distributed execution.*

Keywords: *distributed product development, development task, development situation, method application*

1 Einleitung

Die standortverteilte Produktentwicklung, und damit die Zusammenarbeit in standortverteilten Teams, ist ein vielversprechender Ansatz um Themen wie Globalisierung, Individualisierung und immer kürzer werdenden Produktlebenszyklen zu begegnen. Dementsprechend sehen auch viele Unternehmen kurz- bis mittelfristig die erfolgreiche Umsetzung dieses Ansatzes als einen Schlüsselfaktor zum Erfolg [1].

Es existiert bereits eine Vielzahl an Methoden zur Unterstützung des Produktentwicklungsprozesses deren Vorteile auch empirisch nachgewiesen sind [2]. Für den Fall der standortverteilten Produktentwicklung lassen sich diese Methoden jedoch nur begrenzt nutzen, da sie häufig nur für den Einsatz an einem Standort konzipiert sind [3]. Methoden müssen demnach an die Entwicklungssituation bei der standortverteilten Produktentwicklung angepasst werden, um ihr volles Potential zu entfalten [4]. Eine Möglichkeit die Entwicklungssituation mit Hilfe relevanter Einflussfaktoren zu beschreiben wurde bereits von Albers et al. [5] aufgezeigt. Die beschriebenen Faktoren beziehen sich jedoch auf die Bereiche Mensch, Technik und Organisation. Es fehlt allerdings an Wissen über Faktoren, die speziell die Entwicklungsaufgabe und ihre Auswirkungen auf die Entwicklungssituation bei der standortverteilten Produktentwicklung beschreiben. Eine optimale Anpassung der Methoden ist damit nicht möglich.

2 Stand der Forschung

2.1 iPeM – integriertes Produktentstehungsmodell

Es gibt eine Vielzahl unterschiedlicher Prozessmodelle zur Beschreibung und Unterstützung des Produktentwicklungsprozesses wobei alle Modelle unterschiedliche Aspekte in den Fokus stellen [6]. Die Interaktion zwischen Entwicklungsaktivitäten, Anforderungen, Ergebnissen und Methoden wird dabei jedoch selten beachtet [7]. Aus diesem Grund wurde am IPEK – Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) im Rahmen der Karlsruher Schule für Produktentwicklung (KaSPro) das integrierte Produktentstehungsmodell (iPeM) entwickelt. Das integrierte Produktentstehungsmodell (iPeM) ist ein generisches Meta-Modell, das diese relevanten Elemente enthält, mit dem situationsgerechte Modelle des Produktentwicklungsprozesses abgeleitet werden können

[7]. Basierend auf der Systemtheorie nach Ropohl [8] beschreibt es die Produktentwicklung als kontinuierliche Interaktion von Zielsystem, Handlungssystem und Objektsystem, dem ZHO-Triple. Ziel ist die Überführung des Zielsystems durch das Handlungssystem ins Objektsystem [9]. Das Handlungssystem ist ein sozio-technisches System aus strukturierten Aktivitäten, Methoden und Prozessen. Weiterhin enthält es alle notwendigen Ressourcen zur Realisierung einer Produktentstehung, z.B. Personal und Budget. Das Zielsystem umfasst alle geplanten Eigenschaften eines Produktes, sowie die dafür notwendigen Restriktionen, deren Abhängigkeiten und Randbedingungen. Diese sind unter anderem aus der Entwicklungsaufgabe abzuleiten. Das Objektsystem enthält alle Teillösungen, die während des Entstehungsprozesses anfallen und ist vollständig sobald der geplante Zielzustand erreicht ist. [7] Das iPeM ist Grundlage für die Entwicklung einer Methode zur Potentialfindung in der standortverteilten Produktentwicklung, also auch für die Charakterisierung der Entwicklungsaufgabe.

2.2 Standortverteilte Produktentwicklung

Im Zuge der Globalisierung setzen immer mehr Unternehmen auf die standortverteilte Produktentwicklung und damit auch auf die Zusammenarbeit in standortverteilten Teams [9]. Diese Art der Kollaboration wirkt sich vor allem in den Bereichen Kosten, Zeit und Qualität positiv aus [10]. Kosteneinsparungen können durch eine Senkung der Reisekosten erzielt werden und verteiltes Wissen wird zentralisiert. Zusammen mit einer intelligenten Nutzung der verschiedenen Zeitzonen führt dies zu einer verkürzten Entwicklungszeit [13]. Gleichzeitig stellt sie Unternehmen aber auch vor neue Herausforderungen. Diese entstehen zum einen auf Grund der physischen Distanz der Teammitglieder und damit verbundenen kommunikativen Schwierigkeiten [12], sind zum anderen aber auch organisationaler Art. Datensicherheit, wechselseitige Abhängigkeiten oder auch ungeeignete organisatorische Ansätze können hier beispielhaft genannt werden [13]. Dillenbourg [14] erklärt dazu: "collaboration is in itself neither efficient nor inefficient." und argumentiert, dass es Aufgabe der Forschung sei, die Umstände zu bestimmen unter denen Kollaboration effizient möglich ist. Demnach müssen die individuellen Randbedingungen des Unternehmens und der Entwicklungsaufgabe, also des Zielsystems, bestimmt werden, um anschließend das Handlungssystem entsprechend anzupassen. Nur so können die in

der standortverteilten Produktentwicklung eingesetzten Methoden ihr volles Potential entfalten [4].

3 Forschungsbedarf und Methodik

Für die standortgebundene Produktentwicklung existieren bereits Modelle, wie beispielsweise das iPeM, welches Produktentwicklern eine Vielfalt an Methoden bereitstellt, um den Produktentwicklungsprozess, und damit auch die einzelnen Entwicklungsaktivitäten und -methoden, zu unterstützen [7]. Der Übergang von der standortgebundenen zur standortverteilten Produktentwicklung stellt Unternehmen und Entwickler jedoch vor neue Herausforderungen. Das Ziel muss dabei ein möglichst effektiver und effizienter Produktentwicklungsprozess sein. Zum einen müssen die technischen Voraussetzungen für die standortverteilte Zusammenarbeit geschaffen werden, zum anderen müssen aber auch die bekannten und bisher verwendeten Prozesse und Methoden des Handlungssystems an die Entwicklungsaufgabe als Bestandteil des Zielsystems, angepasst werden. Ziel ist daher die Identifikation relevanter Faktoren, mit denen sich die Entwicklungsaufgabe, als Teil des Zielsystems, bei der standortverteilten Produktentwicklung beschreiben lässt, um letztendlich Verbesserungspotentiale im Handlungssystem zu identifizieren und zu realisieren. Ein Transfer der Faktoren auf die standortgebundene Produktentwicklung steht hierbei im Fokus. Dazu sollen in einem ersten Schritt die folgenden Forschungsfragen beantwortet werden:

- Welche Faktoren zur Beschreibung des Zielsystems für standortverteilte Entwicklungsprojekte lassen sich aus der Entwicklungsaufgabe ableiten?
- Welche Auswirkungen haben mögliche Ausprägungsrichtungen der Faktoren auf die Entwicklungssituation und damit auf die Eignung einer Entwicklungsaufgabe zur standortverteilten Durchführung?

Zur Beantwortung wurden im Rahmen einer Literaturrecherche bestehende Ansätze zur Beschreibung von Entwicklungsaufgaben, zur Entwicklungssituation in der standortverteilten Produktentwicklung sowie zum Arbeiten in standortverteilten und virtuellen Teams analysiert und zusammengetragen. Die Literaturrecherche umfasste dabei Lehrbücher, Fachbücher, Fachartikel und vorliegende Studien. Darauf aufbauend wurden

die identifizierten Faktoren in einem Expertenworkshop beschrieben, gegliedert und kategorisiert. Die Schritte wurden mit Fokus auf die Besonderheiten der standortverteilten Produktentwicklung und im Abgleich mit der KaSPro und dem iPeM durchgeführt. In einem nächsten Schritt wurden Hypothesen zu den Ausprägungen und den Auswirkungen der identifizierten Faktoren auf die Entwicklungssituation aufgestellt. Die Faktoren sowie die aufgestellten Hypothesen wurden im Anschluss in einer Expertenrunde mittels eines Fragebogens validiert. Die Expertengruppe bestand aus Forschern auf dem Gebiet der Produktgenerationsentwicklung und Entwicklungsmethodik. Die Anzahl der befragten Experten betrug $n=16$.

Zunächst wurde der Einfluss der einzelnen Faktoren zur Charakterisierung der Entwicklungsaufgabe bewertet. Die Frage lautete: „Wie ist der Einfluss den [*der jeweilige Faktor*] auf die Eignung zur standortverteilten Durchführung einer Entwicklungsaufgabe hat?“ Die Antwortmöglichkeiten umfassten eine Skala von fünf Schritten von „sehr großer Einfluss“ bis „kein Einfluss“. Zudem gab es die Möglichkeit „keine Antwort möglich“ anzugeben. Die Fragen zu den Ausprägungen wurden in Anlehnung an das Kano-Modell aufgestellt. Es wurde je eine Frage zu einer positiven und eine zu einer negativen Ausprägung des Faktors gestellt: 1. „Eine [*hohe Ausprägung des Faktors*] hat einen positiven Einfluss auf die Eignung der Entwicklungsaufgabe zur standortverteilten Durchführung.“ 2. Eine [*niedrige Ausprägung des Faktors*] hat einen negativen Einfluss auf die Eignung der Entwicklungsaufgabe zur standortverteilten Durchführung.“ Die Antwortmöglichkeiten reichten in vier Schritten von „stimme voll zu“ bis „stimme nicht zu“ sowie der Möglichkeit „keine Antwort möglich“. Als letzten Teil des Fragebogens wurde die Frage nach weiteren wichtigen Faktoren gestellt, die bisher keine Erwähnung fanden.

4 Faktoren zur Charakterisierung der Entwicklungsaufgabe

Im Rahmen der Literaturrecherche wurden zahlreiche Möglichkeiten zur Charakterisierung einer Entwicklungsaufgabe identifiziert. Die dort genannten Faktoren sind jedoch meist nicht spezifisch genug, um daraus eine Charakterisierung der Entwicklungsaufgabe zu ermöglichen, die zur Ableitung von Potentialen in der standortverteilten Produktentwicklung verwendet werden können. Lindemann und Kern [10] liefern einen Ansatz zur Charakterisierung der Entwicklungsaufgabe in der standortverteilten Produktentwicklung

und beschreiben diese mit den Merkmalen Neuartigkeit, Komplexität und Dynamik. Diese Merkmale eignen sich für eine Kategorisierung der Faktoren. Die einzelnen Faktoren, mit denen eine Charakterisierung der Entwicklungsaufgabe im Hinblick auf die Potentialfindung bei der standortverteilten Produktentwicklung erfolgt wurden mit Erkenntnissen aus der Literaturrecherche und der KaSPro weiter präzisiert.

4.1 Übersicht der Faktoren zur Charakterisierung der Entwicklungsaufgabe

Abbildung 1 zeigt in einer Übersicht die acht identifizierten Faktoren, mit denen sich eine Entwicklungsaufgabe im Kontext der standortverteilten Produktentwicklung charakterisieren lässt. Sie wurden in Anlehnung an Lindemann und Kern [10] kategorisiert. Die einzelnen Faktoren werden im Anschluss näher erläutert.

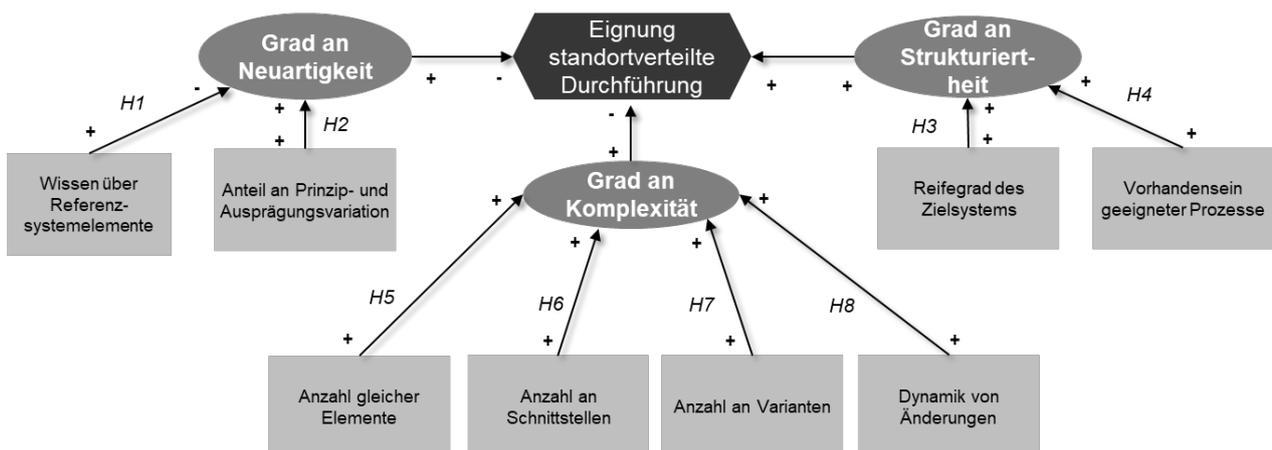


Abbildung 1: Die Abbildung zeigt Faktoren zur Charakterisierung der Entwicklungsaufgabe im Kontext der standortverteilten Produktentwicklung sowie Hypothesen zu deren Auswirkungen.

Neuartigkeit

Der Grad an Neuartigkeit einer Entwicklungsaufgabe kann durch zwei Faktoren beschrieben werden. Zum einen durch das "Wissen über Referenzsystemelemente" und zum anderen über den "Anteil an Prinzip- und Ausprägungsvariation" (Anteil PV & AV). Der Faktor "Wissen über Referenzsystemelemente" basiert auf dem Ansatz der Produktgenerationsentwicklung nach Albers [15] und beschreibt mit Hilfe des daraus entwickelten Risikoportfolios [16] das Risiko einer Entwicklungsaufgabe in Abhängigkeit der verwendeten Referenzsystemelemente. Auch der Faktor "Anteil an Prinzip- und

Ausprägungsvariation“ hat seinen Ursprung in dem von Albers [15] entwickelten Ansatz. Dabei lässt sich der Neuentwicklungsanteil einer Entwicklungsaufgabe mathematisch erfassen und damit auch die Auswirkungen auf den Entwicklungsprozess einschätzen. Es werden die folgenden Hypothesen aufgestellt:

H1: Ein hohes Wissen über Referenzelemente hat einen positiven Einfluss auf die Eignung der Entwicklungsaufgabe zur standortverteilten Durchführung.

H2: Ein hoher Anteil an Prinzip- und Ausprägungsvariation hat einen negativen Einfluss auf die Eignung der Entwicklungsaufgabe zur standortverteilten Durchführung.

Strukturiertheitsgrad

Der Grad an Strukturiertheit einer Entwicklungsaufgabe wird durch die Faktoren “Reifegrad des Zielsystems“ sowie dem “Vorhandensein geeigneter Prozesse“ beschrieben. Der “Reifegrad des Zielsystems“ beruht auf dem ZHO-Tripel des iPeM [7] und wurde von Richter [17] weiterentwickelt und mathematisch modelliert. Das “Vorhandensein geeigneter Prozesse“ bezieht sich auf bereits bekannte und etablierte Prozesse der Produktentwicklung im Unternehmen. Sind solche Prozesse dem Entwicklungsteam bekannt und können in standardisierter Form angewendet werden senkt dies das Risiko im Entwicklungsprozess [18]. Es werden die folgenden Hypothesen aufgestellt:

H3: Ein hoher Reifegrad des Zielsystems hat einen positiven Einfluss auf die Eignung der Entwicklungsaufgabe zur standortverteilten Durchführung.

H4: Das Vorhandensein geeigneter Prozesse hat einen positiven Einfluss auf die Eignung der Entwicklungsaufgabe zur standortverteilten Durchführung.

Komplexität

Der Grad an Komplexität wird in Anlehnung an Geraldini [19] durch vier Faktoren beschrieben. Die “Anzahl gleicher Elemente“ beschreibt das Vorkommen gleicher Teile und Komponenten, die mehrfach in der Entwicklungsaufgabe zum Einsatz kommen. Die “Anzahl an Schnittstellen“ bezieht sich auf die Schnittstellen zwischen den verschiedenen Designräumen. Die “Anzahl an Varianten“ beschreibt wie viele unterschiedliche Komponenten oder Baugruppen für die Erfüllung der Entwicklungsaufgabe nötig sind. Der letzte Faktor ist die “Dynamik von Änderungen“. Es beschreibt die Anzahl und Frequenz von

Änderungen der Spezifikationen [10], des Entwicklerteams oder auch der Entwicklungssituation. Es werden folgende Hypothesen aufgestellt:

H5: Eine hohe Anzahl gleicher Elemente hat einen positiven Einfluss auf die Eignung der Entwicklungsaufgabe zur standortverteilten Durchführung.

H6: Eine hohe Anzahl an Schnittstellen hat einen negativen Einfluss auf die Eignung der Entwicklungsaufgabe zur standortverteilten Durchführung.

H7: Eine hohe Anzahl an Varianten hat einen negativen Einfluss auf die Eignung der Entwicklungsaufgabe zur standortverteilten Durchführung.

H8: Eine hohe Dynamik von Änderungen hat einen negativen Einfluss auf die Eignung der Entwicklungsaufgabe zur standortverteilten Durchführung.

5 Validierung

Die beschriebenen Faktoren zur Charakterisierung einer Entwicklungsaufgabe, die standortverteilt durchgeführt werden soll, wurden in einem ersten Schritt durch eine Expertenrunde mit Hilfe eines Fragebogens validiert. Der erste Teil des Fragebogens überprüft den Einfluss der einzelnen Faktoren auf die Eignung der Entwicklungsaufgabe zur standortverteilten Durchführung, die Ergebnisse sind in Abbildung 2 dargestellt. Die Experten schätzen den Einfluss der Faktoren auf die Eignung der Entwicklungsaufgabe standortverteilt durchgeführt zu werden überwiegend als groß bis sehr groß ein. Die Faktoren sind demnach relevant und geeignet, um die Entwicklungsaufgabe zu charakterisieren. Den größten Einfluss haben dabei die Faktoren "Anzahl von Schnittstellen", "Vorhandensein geeigneter Prozesse" und die "Dynamik von Änderungen". Den geringsten Einfluss weisen die Faktoren "Anzahl gleicher Elemente" und "Anzahl an Varianten" auf, deren Einfluss überwiegend mit mittel bis groß bewertet wurde. Auffällig ist beim Faktor "Anzahl gleicher Elemente" die hohe Anzahl der Antwort „keine Antwort möglich“. Die Gründe hierfür müssen untersucht und bei weiteren Validierungen beachtet werden.

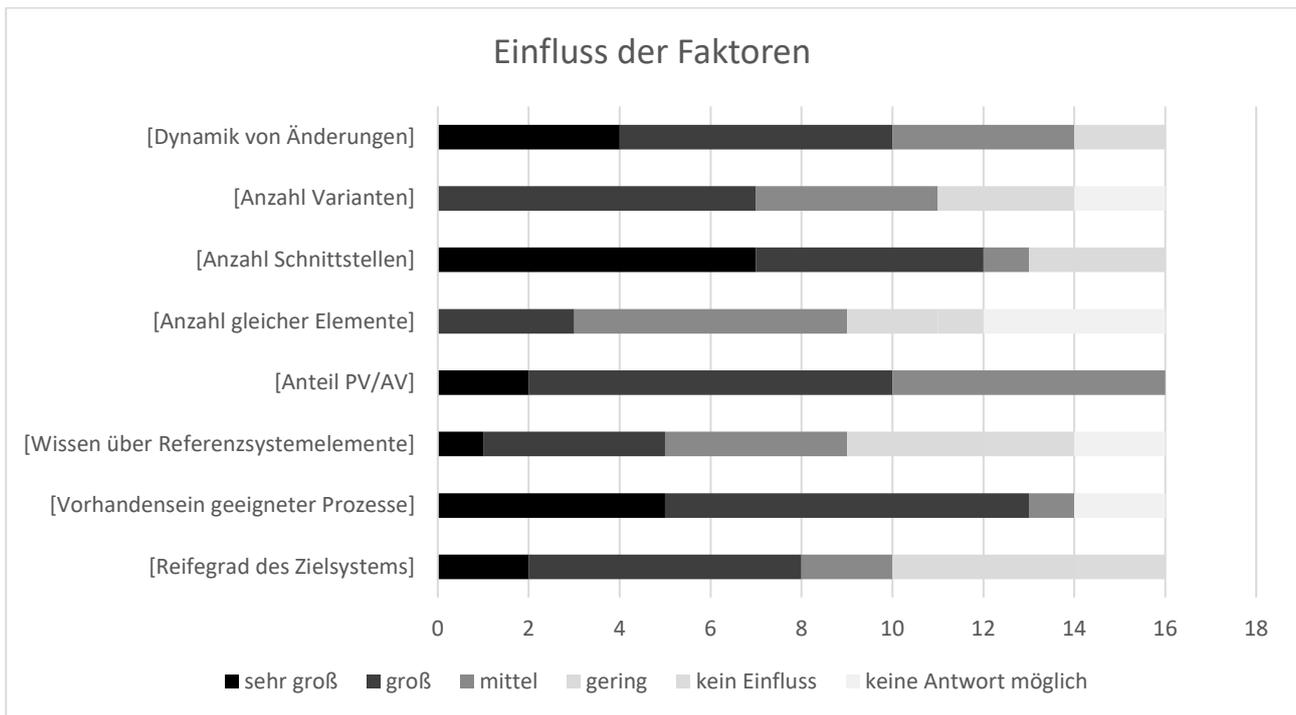


Abbildung 2: Ergebnis der Frage nach dem Einfluss der einzelnen Faktoren zur Charakterisierung der Entwicklungsaufgabe in Bezug auf ihre Eignung zur standortverteilten Durchführung.

Anschließend wurden die aufgestellten Hypothesen und damit die Auswirkungen der möglichen Faktorausprägungen auf die Eignung der Entwicklungsaufgabe zur standortverteilten Durchführung in Anlehnung an das Kano-Modell validiert. Die Ergebnisse sind in Abbildung 3 dargestellt. Die höchste Zustimmung erhielten die Hypothesen zu den Auswirkungen der Faktoren "Vorhandensein geeigneter Prozesse", "Anzahl an Schnittstellen" und "Reifegrad des Zielsystems". Die geringste Zustimmung kann bei den Hypothesen zu "Anzahl gleicher Elemente" und "Wissen über Referenzelemente" festgestellt werden. Diese Ergebnisse decken sich mit den Ergebnissen des ersten Teils des Fragebogens. Die insgesamt niedrige Zahl von Antworten "stimme voll zu" zeigt jedoch, dass die möglichen Ausprägungen der Faktoren und deren Einfluss auf die Eignung zur standortverteilten Durchführung der Entwicklungsaufgabe noch weiter im Detail untersucht werden müssen.

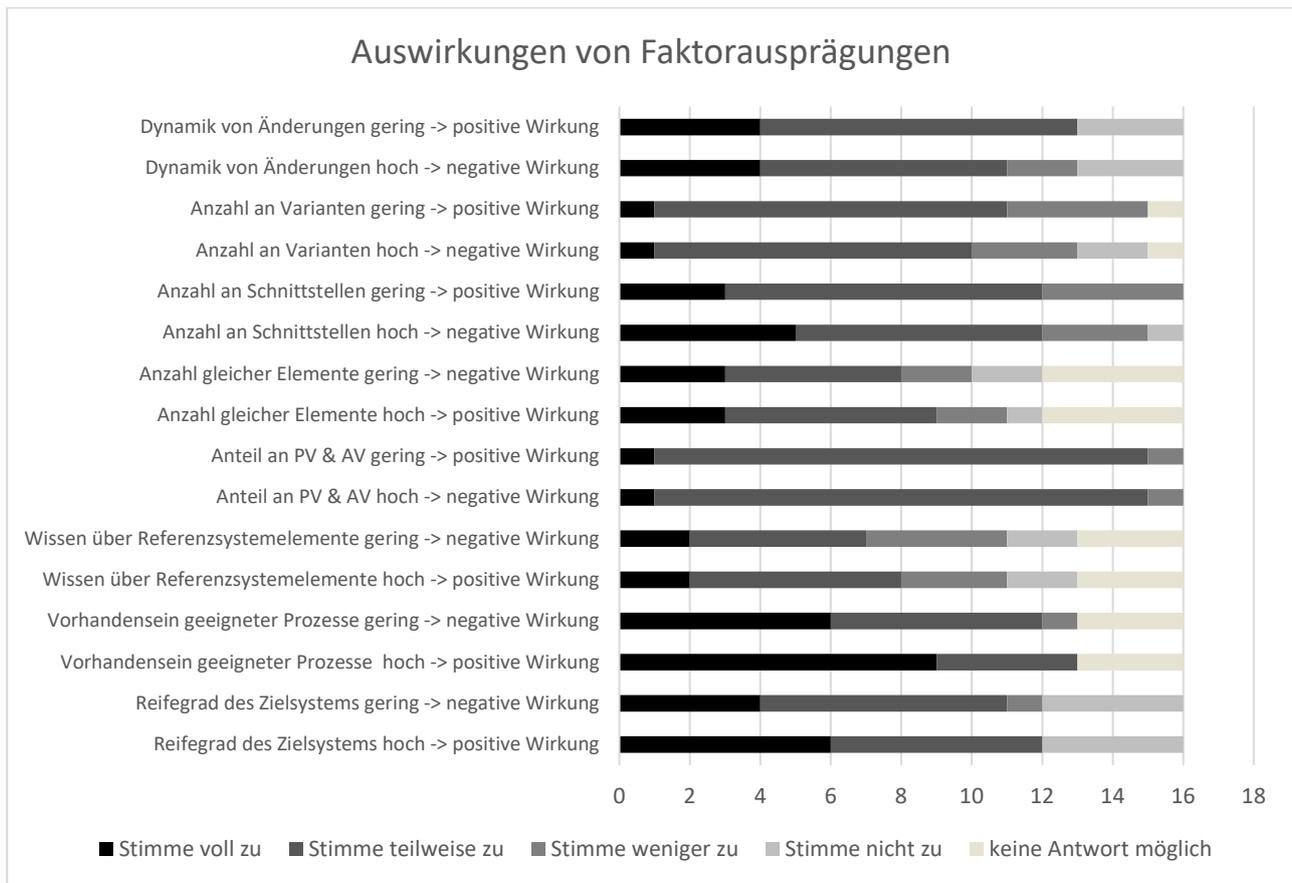


Abbildung 3: Ergebnis der Fragen nach den Auswirkungen möglicher Ausprägungen der einzelnen Faktoren der Entwicklungsaufgabe in Bezug auf ihre Eignung zur standortverteilten Durchführung.

Abschließend wurde gefragt, ob die Experten den Bedarf für weitere Faktoren sehen, um die Entwicklungsaufgabe im Rahmen der standortverteilten Produktentwicklung zu charakterisieren. Es wurden beispielsweise Rollenverständnis (Aufgaben, Kompetenzen, Verantwortlichkeiten), agierende Menschen/Ingenieure (Anzahl, Kenntnis voneinander, ...), Erfahrung/Reifegrad des Validierungssystems oder auch (v. a. persönl.) Kommunikation und Dokumentation genannt. Die genannten Faktoren wurden aufgenommen und werden aber in der weiteren Entwicklung der übergeordneten Methode zur Erschließung von Potentialen in der standortverteilten Produktentwicklung an anderer Stelle aufgegriffen.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Die standortverteilte Produktentwicklung stellt Unternehmen vor große Herausforderung, vor allem in Bezug auf die veränderte Entwicklungssituation im Vergleich zur

standortgebundenen Produktentwicklung. Hier wurde die Entwicklungsaufgabe, als Teil der Entwicklungssituation, fokussiert und untersucht welche Faktoren sich für eine Charakterisierung der standortverteilten Produktentwicklung identifizieren lassen um die Eignung einer Entwicklungsaufgabe zur standortverteilten Durchführung zu bestimmen. Es konnten acht Faktoren identifiziert werden, deren Einflüsse auf die Eignung zur standortverteilten Durchführung der Entwicklungsaufgabe anschließend durch Hypothesen validiert wurden.

Das übergreifende Ziel ist letztendlich die Erstellung einer Methodik zur Identifikation und Erschließung von Verbesserungspotentialen in der standortverteilten Produktentwicklung. Dazu müssen als nächstes weitere Faktoren zur ganzheitlichen Beschreibung der Entwicklungssituation der standortverteilten Produktentwicklung identifiziert werden. Durch die Analyse der Faktoren soll anschließend ermöglicht werden, dass Handlungssystem situationsgerecht anzupassen, um bisher nicht genutzte Potentiale erschließen zu können. Die identifizierten Faktoren eignen sich auch zur Charakterisierung einer standortgebundenen Entwicklungsaufgabe. Dies ermöglicht zudem in weiteren Forschungsarbeiten einen Vergleich zwischen standortgebundenen und standortverteilten Entwicklungsprozessen und somit eine Validierung der Methodik.

Literatur

- [1] Ebert, C.: Trends for Thriving Twenties: Industry Survey and Action Stimulus. URL https://assets.vector.com/cms/content/consulting/publications/IndustryTrends_Whitepaper_2020.pdf
- [2] Graner, Marc; Behr, Magdalena Mißler: The use of methods in new product development - a review of empirical literature. In: International Journal of Product Development 16 (2012), Nr. 2, S. 158. DOI: 10.1504/IJPD.2012.049063.
- [3] Walter, Benjamin; Rapp, Simon; Albers, Albert: Selecting appropriate tools for synchronous communication and collaboration in locally distributed product development. In: DS 85-2: Proceedings of NordDesign 2016, Volume 2, Trondheim, Norway, 10th - 12th August 2016 (2016), S. 258–267.
- [4] Duehr, Katharina; Kopp, David; Walter, Benjamin; Spadinger, Markus; Albers, Albert: Einflussfaktoren in der standortverteilten Produktentwicklung: Eine literaturbasierte Momentaufnahme. In: Proceedings of Entwerfen - Entwickeln - Erleben. Produktentwicklung und Design 2019 (2019), S. 309–326
- [5] Albers, Albert ; Weissenberger-Eibl, Marion A. ; Duehr, Katharina ; Zech, Katharina ; Seus, Fanny: Literature-based identification of success-relevant influencing factors of distributed product development. In: Procedia CIRP 91 (2020), S. 415–420. DOI: 10.1016/j.procir.2019.11.007

- [6] Tomiyama, T.; Gu, P.; Jin, Y.; Lutters, D.; Kind, Ch.; Kimura, F.: Design methodologies: Industrial and educational applications. In: CIRP Annals 58 (2009), Nr. 2, S. 543–565. DOI: 10.1016/j.cirp.2009.09.003.
- [7] Albers, Albert; Reiss, Nicolas; Bursac, Nikola; Richter, Thilo: iPeM – Integrated Product Engineering Model in Context of Product Generation Engineering. In: Procedia CIRP 50 (2016), S. 100–105. DOI: 10.1016/j.procir.2016.04.168.
- [8] Ropohl, Günter: Allgemeine Technologie: eine Systemtheorie der Technik. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing, 2009. DOI: 10.26530/OAPEN_422388
- [9] Albers, Albert; Braun, Andreas: A generalised framework to compass and to support complex product engineering processes. In: International Journal of Product Development 15 (2011), 1/2/3, S. 6. DOI: 10.1504/IJPD.2011.043659.
- [10] Lindemann, Udo: Handbuch Produktentwicklung. München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2016
- [11] Lipnack, Jessica; Stamps, Jeffrey: Virtual teams: People working across boundaries with technology. 2nd ed. New York: Wiley, 2000
- [12] Ahuja, Jaya: Modelling the Success Factors of Virtual Team. In: Indian Journal of Science and Technology 9 (2017), Nr. 48. DOI: 10.17485/ijst/2016/v9i48/105874.
- [13] Gaul, Hans-Dieter: Verteilte Produktentwicklung: Perspektiven und Modell zur Optimierung. 1. Aufl. München: Verl. Dr. Hut, 2001 (Produktentwicklung)
- [14] Dillenbourg, P.; Baker, M.; Blaye, A.; O'Malley, C.: The evolution of research on collaborative learning. In: Spada, E.; Reiman, P. (Hrsg.): Learning in Humans and Machine: Towards an interdisciplinary learning science. Oxford: Elsevier, 1996, S. 189–211
- [15] Albers, Albert; Bursac, Nikola; Wintergerst, Eike: Produktgenerationsentwicklung: Bedeutung und Herausforderungen aus einer entwicklungsmethodischen Perspektive. In: Beiträge zum Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung 2015 (2015)
- [16] Albers, Albert; Rapp, Simon; Birk, Clemens; Bursac, Nikola: Die Frühe Phase der PGE - Produktgenerationsentwicklung. In: Beiträge zum Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung 2017 (2017)
- [17] Richter, Thilo; Troester, Peter; Felber, André; Albers, Albert; Behdinan, Kamran: Description model for measuring the product maturity in the early phase of product development. In: IEEE (2020) (angenommen)
- [18] Mithas, Sunil; Whitaker, Jonathan: Is the World Flat or Spiky? Information Intensity, Skills, and Global Service Disaggregation. In: Information Systems Research 18 (2007), Nr. 3, S. 237–259. DOI: 10.1287/isre.1070.0131.
- [19] Geraldi, Joana; Maylor, Harvey; Williams, Terry: Now, let's make it really complex (complicated). In: International Journal of Operations & Production Management 31 (2011), Nr. 9, S. 966–990. DOI: 10.1108/01443571111165848.

Entwicklung und Aufbau eines Virtual Reality Regalsystem zur Verwaltung von Produktdaten

**Steffen Kunnen, Dmytro Adamenko, Robin Pluhnau, Sebastian Sonntag,
Arun Nagarajah**

Institut für Produkt Engineering, Universität Duisburg-Essen

Lotharstr. 1, 47057 Duisburg

Email: steffen.kunnen@uni-due.de; Internet: <https://www.uni-due.de/pep/>

Inhalt: Die steigende Produktkomplexität und der hohe multidisziplinäre Aufwand zur Entwicklung eines Produktes benötigen ein effizientes Datenmanagement. Im Kontext der Digitalisierung und dem damit verbundenen Einsatz von neuen Technologien während der Produktentwicklung steigt ebenfalls der Datendurchsatz innerhalb eines Unternehmens deutlich an. Ohne ein ausgeprägtes Datenmanagement gehen viele wichtige Daten verloren oder können nur schwer für die entsprechenden Prozesse bereitgestellt werden. In diesem Beitrag soll ein Ansatz zur Überprüfung der Datenqualität durch die Visualisierung einer Produktdatenstruktur in einem Virtual Reality Regalsystem vorgestellt werden. Die bidirektionale Kopplung eines PDM-Systems mit einer VR-Umgebung ermöglicht dabei die Bereitstellung und Anpassung der zu überprüfenden Produktdaten.

Stichwörter: Produktdatenstruktur, Datenqualität, Virtual Reality

Development and design of a virtual reality shelf system to manage product data

Abstract: The increasing product complexity and the high multidisciplinary effort to develop a product require an efficient data management. In the context of digitalization and the associated use of new technologies during product development, the data volume within a company also increases significantly. Without a well-developed data management system, a lot of important data is lost or can only be made available for the corresponding processes with difficulty. In this paper, an approach for checking data quality by visualizing a product data structure in a virtual reality shelf system will be presented. The bidirectional connection of a PDM system with a VR environment enables the provision and adaptation of the examined product data.

Keywords: Product data structure, Data quality, Virtual Reality

1 Einleitung

Dynamische Kundenanforderungen und eine schnelle Lösungsbereitstellung erfordern in der Produktentwicklung neuartige Methoden und Prozessschritte. Die steigende interdisziplinäre Zusammenarbeit innerhalb des Entwicklungsprozesses resultiert in einer hohen Prozesskomplexität. Gleichzeitig ist der Zeit- und Kostendruck auf die Entwicklung deutlich gestiegen. Um weiterhin wettbewerbsfähig zu bleiben, müssen die Unternehmen die Entwicklungsprozesse effizienter gestalten, damit schneller auf die Anforderungen der Kunden reagiert und die Produkte auf den Markt gebracht werden können. Um dies zu bewältigen, ist der Einsatz moderner Technologien und eine Digitalisierung der Unternehmensprozesse unvermeidbar. Laut der PWC Studie „Digital Product Development 2025“ wird durch Digitalisierung die Effizienz um 19% gesteigert, die time-to-market um 17% reduziert und die Produktionskosten um 13% gesenkt. Dies verdeutlicht das enorme Potential der Digitalisierung im Kontext der Produktentwicklung.[10]

Alle anfallenden Daten müssen für die unterschiedlichen Engineering-Tätigkeiten entlang des gesamten Lebenszyklus eines Produktes bereitgestellt werden. Eine Tätigkeit während der Produktentwicklung ist ein Design Review (DR), bei dem der Entwicklungsstand des Produktes gegen die gestellten Anforderungen geprüft wird. Für diese Prüfungen sind neben den Nutzdaten auch diverse Metadaten und Attribute notwendig. Zu den Nutzdaten gehören neben den 3D-Modellen auch technische Spezifikationen, Simulations- und Analyseergebnisse wie bspw. eine FMEA. Die Metadaten setzen sich unter anderem aus dem Ersteller, dem Datum der Erstellung sowie dem Fälligkeitsdatum zusammen. Zu den gängigsten Attributen zählen das Bauteilgewicht, die Abmaße und das Material. [2]

Die erfolgreiche Prüfung der Bauteile während einem Design Review hängt somit stark von der vorliegenden Datenqualität ab. Bereits 1996 definierten Wang und Strong die Datenqualität als eine Bewertung bezüglich der Fragestellung, wie gut ein bestimmter Datensatz dafür geeignet ist, einen kontextbezogenen Zweck zu erfüllen. Das maßgebende Wort dabei ist kontextbezogen, was bedeutet, dass ein spezieller Datensatz sowohl eine gute als auch eine schlechte Datenqualität haben kann, abhängig von dem jeweiligen Anwendungsszenario. [12, 13] Zu den wichtigsten Qualitätsindikatoren gehören die Vollständigkeit, und die Verfügbarkeit der Daten [8]. Vor dem Design Review müssen somit die vorhanden Nutz-, Metadaten und Attribute bezogen auf die genannten Qualitätsindikatoren überprüft werden. PDM-Systeme bieten die Möglichkeit, alle Metadaten

eines Bauteils oder einer Baugruppe tabellarisch abzubilden. Der Betrachter kann anschließend die Vollständigkeit überprüfen und nicht vorhandene Metadaten ergänzen. Des Weiteren können auch die Attribute tabellarisch exportiert und überprüft werden. Die Vollständigkeit und Verfügbarkeit der Nutzdaten wird in der Produktdatenstruktur kontrolliert. Sind 3D-Modelle verfügbar und für die Entscheidungsfindung notwendig, können die 3D-Modelle über Funktionalitäten und Tools, wie einen 3D-Viewer oder den CAD-Export betrachtet werden. Es wird deutlich, dass keine ganzheitliche Betrachtung der Daten möglich ist, sodass die Prüfung der Datenqualität ein aufwendiges und zeitintensives Verfahren ist. Eine kombinierte und visuelle Darstellung der Datensätze aus Meta-, Nutzdaten und Attributen kann deutliche Vorteile im Vergleich zu den herkömmlichen Verfahren bringen. Durch die Visualisierung der kombinierten Daten kann der Betrachter alle Daten in einem System betrachten und somit die Zeit zur Analyse der Datenqualität, durch Reduzierung der notwendigen Analyseschritte, deutlich verringern.

Im Vergleich zwischen einer Virtual Reality (VR) Darstellung und dem klassischen Desktop Interface von Horvat et al. wird deutlich, dass die VR erhebliches Potential bei der Betrachtung von komplexen Modellen bietet [7]. Eine Darstellung der Daten in einer VR-Applikation könnte demnach erhebliches Potential zur Überprüfung der Datenqualität einer komplexen Produktstruktur bieten.

1.1 Zielstellung

Eine Überprüfung der Datenqualität soll zukünftig durch die Visualisierung der Produktdatenstruktur ermöglicht werden. Dafür soll im Front-End eine VR-Umgebung entwickelt werden, die im Back-End bidirektional mit einem PDM-System gekoppelt ist.

Die gesamte Lösung muss dabei folgende Anforderungen erfüllen:

- Die Lösung muss eine analytische Überprüfung der Datenqualität ermöglichen. Die Daten der Produktdatenstruktur müssen in Echtzeit abgerufen und fehlende bzw. unvollständige Datensätze ergänzt werden
- Das Regalsystem soll weitestgehend automatisch aufgebaut und gefüllt werden.
- Das 3D-Modell wird visuell dargestellt und die Meta-, Nutzdaten und Attribute können über Funktionalitäten in der VR-Umgebung aufgerufen werden. Das 3D-Modell muss, abhängig von den Abmaßen, skaliert dargestellt werden.

- Zur Prüfung der Datenqualität sollen Elemente mit unvollständigen oder nicht verfügbaren Datensätzen visuell hervorgehoben werden.
- Zur Navigation innerhalb der Produktstruktur sollen Filter-, Sortier- und Suchfunktionalitäten im Regalsystem implementiert werden.
- Um die zukünftige Anwendung zu ermöglichen, müssen die 3D-Modelle aus dem Regalsystem entnommen und auf einer spezifischen Fläche zur Betrachtung platziert werden können.

1.2 Bestehende Ansätze zur Kopplung von PDM und VR

Bisherige Ansätze zur Kopplung von PDM-Systemen und der virtuellen Realität legen den Fokus auf die parallele Verwaltung sowie der unmittelbaren Bereitstellung der Nutzdaten wie den 3D-Modellen und der für die Darstellung in der virtuellen Realität notwendigen Attribute. Eine Überprüfung der Datenqualität in der VR-Umgebung wird in den bisherigen Ansätzen nicht betrachtet. Im Folgenden sollen die bestehenden Lösungen bezogen auf die Möglichkeit der Datenbereitstellung und Datenrückführung untersucht werden. Da nur eine Betrachtung von Teilaspekten möglich ist, liegt der Fokus auf den folgenden Anforderungen:

1. Importfähigkeit der Metadaten von PDM nach VR
2. Importfähigkeit der Nutzdaten von PDM nach VR
3. Importfähigkeit der Attribute von PDM nach VR
4. Exportfähigkeit der Metadaten von VR nach PDM
5. Exportfähigkeit der Nutzdaten von VR nach PDM
6. Exportfähigkeit der Attribute von VR nach PDM
7. Echtzeit-Übertragung der Daten an die Produktdatenstruktur

In der nachfolgenden Tabelle 1 wurden existierende Lösungsansätze in Bezug auf die genannten Anforderungen analysiert:

Tabelle 1: Vergleich bestehender Ansätze PDM-VR Kopplung

Anforderungen	Memphis [6]	Bosch vPLM [5]	Atos and PiXYZ [3]	Stelzer et al. [11]	Petermann [9]
Metadaten PDM → VR	●	●	●	●	●
Nutzdaten PDM → VR	●	●	●	●	●
Attribute PDM → VR	◐	●	●	●	●
Metadaten VR → PDM	◐	○	○	◐	○
Nutzdaten VR → PDM	●	◐	○	●	●
Attribute VR → PDM	○	○	○	◐	○
Echtzeit-Kopplung Produktdatenstruktur	○	○	○	○	○

- Anforderung nicht erfüllt
- ◐ Anforderung zum Teil erfüllt
- Anforderung erfüllt

Das MEMPHIS-System stellt eine Datenaustausch Middleware dar, die eine Kopplung von CAD-Daten und einer VR-Umgebung ermöglicht. Den Kern bildet dabei eine Server Client Architektur, die den Zugriff auf die jeweiligen Systeme ermöglicht. Der Fokus der Lösung liegt primär auf der Bereitstellung von CAD-Daten und deren Möglichkeit zur Visualisierung in der VR. Eine bidirektionale Kopplung der Produktstruktur mit einer VR-Umgebung zur Bereitstellung und Rückführung von Daten wird nicht betrachtet. [6]

Die BSH Bosch und Siemens Hausgeräte GmbH verfolgen die Etablierung eines virtual Product Lifecycle Management Prozesses (vPLM). Hierbei steht die Bereitstellung der zur Visualisierung notwendigen Daten innerhalb der VR im Vordergrund. Nach Betrachtung und Aufbau der VR-Szene wird allerdings nur diese Szene zurück gespeichert. Eine Analyse der

Datenqualität und der Export angepasster Attribute oder Metadaten ist nicht möglich. Ebenfalls erfolgt keine Kopplung mit der Produktdatenstruktur im PDM-System. [5]

Die Kopplung des Product Lifecycle Management Systems Teamcenter mit der Grafikengine Unity wurde durch eine Kooperation der Firmen Atos und PiXYZ mit Unity realisiert. Die CAD-Modelle werden durch Teamcenter als JT-Datei bereitgestellt, sodass die Metadaten und Struktur des Modells ausgelesen werden können. Anschließend erfolgt eine Konvertierung in das FBX-Format zur Darstellung in der VR-Umgebung. Der Export der Daten aus der VR-Umgebung heraus wird in der Anwendung nicht betrachtet. [3]

Neben zahlreichen Unternehmen beschäftigen sich auch Forschungseinrichtungen und Universitäten mit diesem Themengebiet. Bereits 2012 stellten Stelzer et al. eine VR-PLM-Strategie vor, die VR als eine Schnittstelle zu den vorhandenen PLM-Lösungen sieht. Der Fokus liegt dabei auf der Bereitstellung aller notwendigen Daten entlang des gesamten Produktlebenszyklus, um alle benötigten Daten für ein VR-basiertes Design-Review zur Verfügung zu haben. Eine Prüfung der Daten auf die Qualität erfolgt jedoch vorab in den Kapitel 1 genannten Schritten und nicht in der VR-Umgebung. Des Weiteren können die Ergebnisse des DR nicht in Echtzeit aus der VR-Umgebung heraus an die Produktdatenstruktur exportiert werden.[11]

Petermann der TU-Dresden verdeutlicht in seiner Dissertation das VR-PLM Integrationskonzept. Dieses verbindet ebenfalls die drei Einheiten des PDM-Systems, der CAD-Umgebung und der VR zur Durchführung von VR-basierten Design Reviews. Ähnlich wie bei Stelzer et. al liegt der Fokus auf der Bereitstellung der Daten für VR-basierte Design Reviews, jedoch ohne eine Möglichkeit der Anpassung von Metadaten oder dem Erkenntnistransfer zurück in die PDM-Umgebung, wenn Datensätze unvollständig sind. [9]

Es wird deutlich, dass der Fokus aller Lösungsansätze zur Kopplung von VR mit einem PDM-System eindeutig auf der Datenbereitstellung liegt. Lediglich Stelzer betrachtet einen Export der Daten aus der VR-Umgebung heraus, wobei diese Kopplung über einen Session Manager erfolgt, der die Änderungen in der Nachbereitung der Tätigkeit durchführen muss. Eine Echtzeit-Übertragung von Meta-, Nutzdaten und Attributen an die Produktdatenstruktur ist bei keinem Lösungsansatz gegeben.

2 Konzept zur bidirektionalen Kopplung von PDM und VR

In Bild 1 ist das Konzept zur bidirektionalen Kopplung der VR-Umgebung mit dem PDM-System, zur Überprüfung der Datenqualität einer Produktdatenstruktur, aufgezeigt.

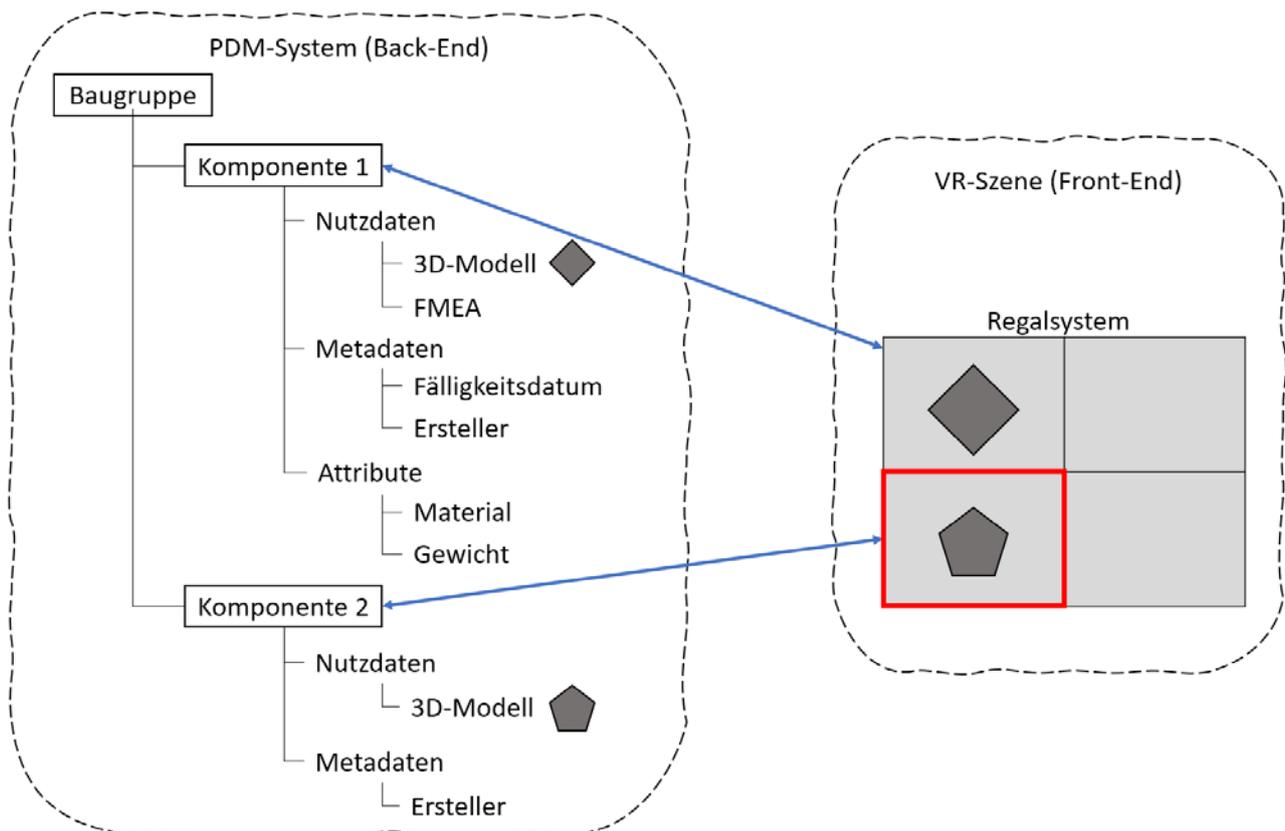


Bild 1: Bidirektionale Kopplung von Produktstruktur und VR-Szene

Das Konzept besteht aus drei Elementen, dem PDM-System im Back-End, der VR-Szene im Front-End und der Schnittstelle zur Verbindung der Systeme. Im PDM-System ist eine Produktdatenstruktur aufgebaut. Über die jeweiligen Komponenten hat der Anwender Zugriff auf alle zugehörigen Daten. Über eine Web-API ist das PDM-System mit der VR-Szene verbunden. Der Abruf erfolgt im aktuellen Entwicklungsstand über die Artikelnummer, bzw. die ID, der Baugruppe. Alle zugehörigen Unterelemente werden automatisch ausgelesen und die Daten abgerufen. Bevor eine Überprüfung der Datenqualität erfolgen kann, muss festgelegt werden, welche Datensätze vorhanden sein müssen. Die Struktur in Bild 1 zeigt für Komponente 1 ein Beispiel, bei dem alle Daten vorhanden und verfügbar sind und somit für einen vollständigen Datensatz stehen. Die Daten werden nach dem Import kombiniert und im VR-Regalsystem automatisch in ein Fach einsortiert, wobei eine

Visualisierung durch das zugehörige 3D-Modell erfolgt. Komponente 2 zeigt einen unvollständigen Datensatz, bei dem lediglich das 3D-Modell und der Ersteller im PDM-System hinterlegt sind. Diese Komponente soll automatisch in einem gesonderten Regalfach dargestellt und visuell hervorgehoben werden. Der Anwender sieht sofort, dass es sich um einen unvollständigen Datensatz handelt und kann nun die Nutz-, Metadaten und Attribute abrufen und prüfen.

3 Aufbau VR-Regalsystem

Im Rahmen von Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten am Institut wurde der erste Prototyp für ein VR-Regalsystem aufgebaut. Zur Validierung der Funktionalitäten des Regalsystems wurde ein Druckübersetzer mit den zugehörigen 3D-Modellen durch die EKATO Group bereitgestellt. [8]



Bild 2: Fach im Regalsystem mit Darstellung der Daten

Anhand der Bilder 2 und 3 werden die grundlegenden Funktionen und Darstellungsformen des Konzeptes deutlich. In Bild 2 ist eine Komponente des Druckübersetzers innerhalb des Regalsystems dargestellt. Eine Interaktion mit den Elementen ermöglicht die Anzeige aller zugehörigen Metadaten und Attribute aus dem PDM-System wie dem Gewicht von 5,5 kg oder dem Fälligkeitsdatum. Aufgrund der Übersichtlichkeit und den räumlichen Gegebenheiten der VR-Szene wurde der automatische Aufbau in den Dimensionen

begrenzt, sodass lediglich zwei Ebenen übereinander und 10 Fächer nebeneinander angezeigt werden.

Nach vollständigem Aufbau und der Befüllung des Regalsystem sind eine zweidimensionale Filterung und Sortierung der Modelle möglich. Entsprechende Auswahlfelder ermöglichen unter anderem eine Sortierung nach dem Gewicht, dem aktuellen Status und dem Fälligkeitsdatum. Die zweidimensionale Sortierung ermöglicht es dem Anwender die Komponenten nach bspw. absteigendem Fälligkeitsdatum und dem Status anzuzeigen. Innerhalb des Regalsystems werden somit, chronologisch sortiert, die Komponenten angezeigt, deren Fälligkeitsdatum kurz bevorsteht oder schon überschritten wurde, gleichzeitig aber noch im PDM-System einen entsprechenden Status zur Entscheidungsfindung haben.

Sobald ein Wert, der in Bild 2 dargestellten Daten, nicht eingetragen ist, wird die entsprechende Komponente, wie in Bild 3 dargestellt, in einem farblich hervorgehobenen Fach unterhalb der vollständig Datensätze eingeordnet. Durch Auswahl des entsprechenden Regalfachs können die Daten angezeigt, und die fehlenden Werte ermittelt werden. Über die bidirektionale Web-API können diese Daten, soweit diese bekannt sind und vorliegen, über die VR-Szene im PDM-System angepasst werden.

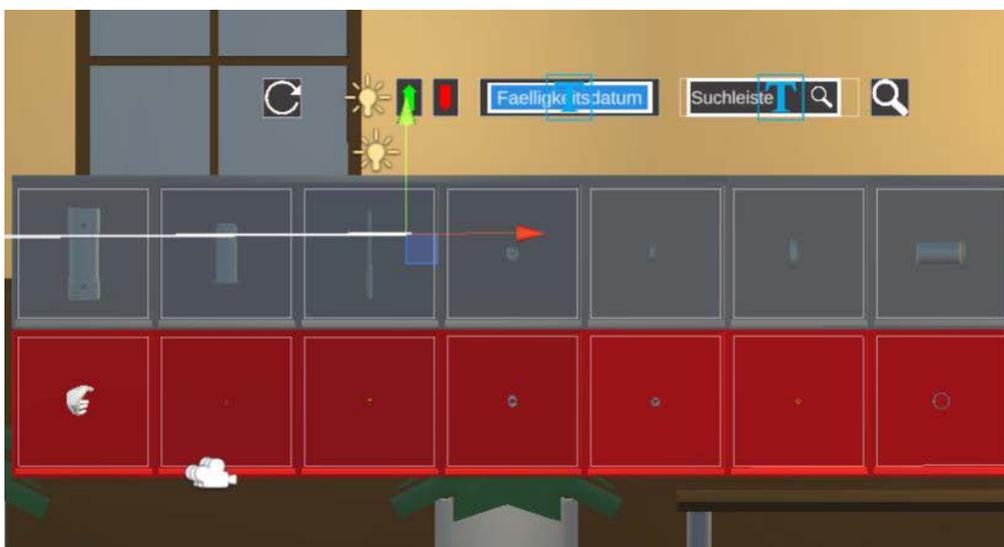


Bild 3: Visuelle Darstellung unvollständiger Datensätze (rechts)

Ein Suchfeld über dem Regalsystem ermöglicht eine gezielte Abfrage zu einer spezifischen Komponente von großen und komplexen Produktdatenstrukturen, auch wenn diese zum Zeitpunkt der Suche nicht im Regalsystem dargestellt werden. In dem ersten Prototyp muss der Name oder die Artikelnummer jedoch vollständig bekannt sein, da die Komponente

sonst nicht identifiziert werden kann. Die Echtzeit Anbindung über eine Web-API bietet aber das Potential eine Verbindung zu den bereits entwickelten Suchmechanismen des PDM-Systems herzustellen, sodass der Anwender eine Unterstützung durch bspw. Ausfüllhilfen erhält.

Jede Komponente kann aus dem Regalsystem entnommen und für weitere Tätigkeiten bereitgestellt werden. Dafür wurde in die VR-Szene ein Tisch implementiert, auf dem das 3D-Modell der Komponente in einem vordefinierten Bereich platziert werden kann. Das 3D-Modell kann anschließend von allen Seiten betrachtet und die zugehörigen Nutzdaten aufgerufen werden.

3.1 Anwendungsszenarien für das VR-Regalsystem

Eine konkrete Anwendung des VR-Regalsystems ist im Rahmen eines Design-Reviews geplant. Das Design Review wird dabei in drei Prozessschritte unterteilt, die DR-Vorbereitung, die DR-Durchführung und die DR-Nachbereitung.

Während der DR-Vorbereitung kann eine analytische Überprüfung der Datenqualität, einige Tage vor dem eigentlichen Termin des Design Reviews, durchgeführt und die Vollständigkeit sowie die Verfügbarkeit der Daten sichergestellt werden. Dies begünstigt einen reibungsfreien Verlauf, ohne dass eine Entscheidungsfindung verschoben werden muss, da ein bestimmter Datensatz nicht ausreichend ist.

Während der DR-Durchführung können Komponenten mit einem zeitnahen Fälligkeitsdatum und dem Status einer notwendigen Freigabeentscheidung chronologisch sortiert angezeigt werden. Die Elemente können nach der Reihe aus dem Regal entnommen und auf einer entsprechenden Fläche, wie bspw. einem Tisch, platziert werden. Anschließend kann in der VR-Umgebung mit den notwendigen Funktionalitäten das Design Review für die spezifische Komponente durchgeführt werden. Der kombinierte Datensatz kann anschließend durch das Einsortieren des 3D-Modells durch den Verantwortlichen in ein entsprechendes Fach mit bspw. dem Namen „Review durchgeführt“ zurück in das PDM-System exportiert werden. Die entsprechenden Metadaten, wie der Status und das Fälligkeitsdatum, werden automatisch geändert. Die gesamten Ergebnisse des Design Reviews werden somit in der Produktdatenstruktur dem jeweiligen Element zugeordnet.

In der DR-Nachbereitung können die Ergebnisse wie erteilte Freigaben, Änderungsvorschläge und Anpassungen durch automatische Generierung eines Sitzungsberichtes dokumentiert werden. Der Sitzungsbericht wird an das entsprechende

PDM-Element angehängt und ist somit, für weitere Engineering-Tätigkeiten oder das nächste DR verfügbar.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieser Veröffentlichung wurden ein Ansatz zur Überprüfung der Datenqualität einer Produktdatenstruktur in der Virtual Reality sowie eine erste prototypische Umsetzung vorgestellt. Die Produktdatenstruktur wird in der Form eines Regalsystems in der Virtual Reality visualisiert und dem Anwender zur Verfügung gestellt. Das Regalsystem ermöglicht die Verwaltung und Überprüfung der Produktdaten einer Komponente und zusätzlich die Entnahme des Modells zur Anwendung in weiteren Engineering-Tätigkeiten wie bspw. einem Design Review.

Die Anwendung des Regalsystems während der in Kapitel 3.1 genannten Phasen eines Design Reviews soll in weiteren Forschungsaktivitäten betrachtet werden. Im Mittelpunkt der Aktivitäten steht dabei die Optimierung des Datenmanagement bei VR-basierten Design Reviews zur Verbesserung der Datenbereitstellung und anschließender Dokumentation der Ergebnisse.

5 Literatur

- [1] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. 2018. Monitoring-Report Wirtschaft DIGITAL 2018.
- [2] DIN EN 61160:2006-06, Entwicklungsbewertung (IEC_61160:2005); Deutsche Fassung EN_61160:2005
- [3] Edward Martin. 2019. *Uniting real-time 3D and Product Lifecycle Management (PLM) for the first time*. <https://blogs.unity3d.com/2019/07/16/uniting-real-time-3d-and-product-lifecycle-management-plm-for-the-first-time/>. Accessed 27 May 2020.
- [4] 2020.000Z. *Hydraulikkomponenten von EKATO abgestimmt auf Ihren Anwendungsfall*. <https://www.ekato.de/de/produkte/ruehrwerkskomponenten/gleitringdichtungen/hydraulikkomponenten/>.
- [5] Ingolf Rehfeld and Jan Wunderlich. 2017. Virtual Reality und Product Lifecycle Management – Entwicklung eines durchgängigen Prozesses für die BSH Bosch und Siemens Hausgeräte GmbH.
- [6] Kim, S. and Weissmann, D. 2006. Middleware-based Integration of Multiple CAD and PDM Systems into Virtual Reality Environment. *Computer-Aided Design and Applications* 3, 5, 547–556.
- [7] Nikola Horvat, Stanko Škec, Tomislav Martinec, Fanika Lukačević and Marija Majda Perišić (2019), “Comparing Virtual Reality and Desktop Interface for Reviewing 3D CAD Models”, Proceedings of the Design Society: International Conference on Engineering Design, Vol. 1 No. 1, pp. 1923–1932.
- [8] Otto B., Österle H. (2016) Methoden und Werkzeuge des Datenqualitätsmanagements. In: Corporate Data Quality. Springer Gabler, Berlin, Heidelberg

-
- [9] Petermann Dirk. Virtual Reality - Technologie für eine zentrale Schnittstelle im Produktentwicklungsprozess. (Dissertation – TU Dresden), 2018.
- [10] PricewaterhouseCoopers. 2019. Digital Product Development 2025. Agile, Collaborative, AI Driven and Customer Centric.
- [11] Stelzer, R.; Steger, W.; Peterman, D. 2012 - *Virtual Reality als zentrale Komponente einer PLM-Strategie – Herausforderungen und Umsetzungskonzepte*. in Entwerfen Entwickeln Erleben 2012 - Methoden und Werkzeuge in der Produktentwicklung-10. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik KT2012, 154-176,
- [12] Wang, Richard Y.; Strong, Diane M.: Beyond Accuracy: What Data Quality Means to Data Consumers. In: Journal of Management Information Systems 12 (1996), Nr. 4, S. 5–33
- [13] ISO: ISO 8000-110:2009: Data quality, Part 8, Information and data quality: concepts and measuring. Genf: ISO, 2015

Herausforderungen des agilen und sequentiellen Zielsystem- und Anforderungsmanagements

**Valentin Zimmermann, Jonas Heimicke, Rebecca Bohn, Lucas Schuhmacher,
Sebastian Trost, Albert Albers**

IPEK – Institut für Produktentwicklung, Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Kaiserstr. 10, 76131 Karlsruhe

Email: valentin.zimmermann@partner.kit.edu; Internet: <http://www.ipek.kit.edu/>

***Inhalt:** Im Zielsystemmanagement werden Entscheidungen getroffen, die die Entwicklung und das Produkt als solches grundlegend beeinflussen. Diese unterliegen jedoch Unsicherheiten, die immer weiter zunehmen. Agile Ansätze halten verstärkt Einzug in die Mechatroniksystementwicklung und das zugehörige Zielsystemmanagement. Im Zuge dieser Veröffentlichung werden Herausforderungen, die im sequentiellen und agilen Zielsystemmanagement auftreten identifiziert und hinsichtlich ihrer Relevanz für die industrielle Praxis bewertet. Darauf aufbauend wird ein Vorgehen zur Unterstützung des Zielsystemmanagements durch den Abgleich der gefundenen Herausforderungen mit den Grundprinzipien des Agile Systems Design abgeleitet.*

***Stichwörter:** Zielsystemmanagement, Agil, Unsicherheit, ASD – Agile Systems Design*

Challenges of agile and sequential management of systems of objectives and requirements

***Abstract:** In the management of the system of objectives, decisions which fundamentally influence the development and the product itself are made. However, these decisions are subject to uncertainties which are increasing continuously. Agile approaches are finding their way into mechatronic system development and the corresponding management of system of objectives. In the course of this publication, challenges that occur in sequential and agile management of the system of objectives are identified and evaluated with respect to their relevance for industrial practice. Based on this, a procedure to support the management of the system of objectives is derived by comparing the challenges found with the basic principles of Agile Systems Design.*

***Keywords:** Management of System of Objectives, Agile, Uncertainty, ASD – Agile Systems Design*

1 Einleitung

Aufgrund von Megatrends, wie der Digitalisierung, wandelt sich der Fokus der Mechatroniksystementwicklung von der Entwicklung autarker physischer Produkte hin zur Entwicklung komplexer hybrider Leistungsbündel mit einem Software- und Serviceanteil [1]. Damit geht ein Anstieg der Komplexität und hiermit verbundenen Unsicherheiten bzgl. der

Produkte einher. Da in der Produktentwicklung Kosten, Qualität und Eigenschaften des Produktes bereits zu 60-80 % festgelegt werden [2], obwohl diese erst später realisiert werden, müssen bereits zu einem frühen Zeitpunkt Entscheidungen getroffen werden, die jedoch vielen Unsicherheiten – wie z.B. Annahmen hinsichtlich der Kaufbereitschaft – unterliegen. Somit gilt es, insbesondere die Produktdefinition mit Hilfe von Methoden des Anforderungsmanagements zu unterstützen und einen frühen und kontinuierlichen Erkenntnisgewinn [3], wie in den agilen Ansätzen, zu fördern [4]. Eine Implementierung dieser Ansätze wäre aufgrund der zuvor aufgezeigten Gründe auch für das Zielsystemmanagement der Mechatroniksystementwicklung von Bedeutung. Allerdings ist eine einfache anpassungsfreie Anwendung dieser Ansätze, insbesondere aufgrund der Physikalität der Produkte, nicht ohne weiteres möglich [5]. Vielmehr bedarf es Lösungen, welche die Nachfrage nach Agilität und die Bedingungen der Entwicklung physischer Produkte berücksichtigen.

2 Stand der Forschung

2.1 Zielsystem- und Anforderungsmanagement zum Umgang mit Unsicherheiten

Im Zuge des Zielsystem- und Anforderungsmanagements wird zwischen sequentiellen- und agilen Vorgehensweisen unterschieden, wobei bei ersteren entsprechend der DIN 69901-2 [6] in die sequentiell ablaufenden Phasen *Initialisierung*, *Definition*, *Planung*, *Steuerung* und *Abschluss* geteilt wird. Dabei stellt der Auftragsgeber zunächst sämtliche Anforderungen quantifiziert und prüfbar, inklusive sämtlicher Randbedingungen, strukturiert in einem Lastenheft dar [7]. Darauf aufbauend wird durch den Auftragnehmer ein Pflichtenheft erstellt, das die Realisierung aller im Lastenheft dokumentierter Anforderungen beschreibt. Agile Ansätze basieren auf der Ansicht, dass sich die anfängliche Informationslage während des Entwicklungsprozesses ändert und daher ein detaillierter Ablaufplan nicht notwendig ist. Agilität beruht auf der Fähigkeit, auf Unsicherheiten, hervorgerufen durch unvorhersehbare Umwelten, schnell reagieren zu können [8]. In der wohl bekanntesten agilen Projektmanagementmethode Scrum [9] wird das Produkt auf Basis einer Vision innerhalb iterativer Sprints entwickelt. Ziele und Anforderungen werden in sogenannten User-Stories formuliert, im Backlog gesammelt, zu Beginn eines Sprints priorisiert und auf Basis gewonnener Erkenntnisse konkretisiert. In der Literatur werden diverse Ansätze des Anforderungsmanagements diskutiert. POHL [10] unterteilt dieses in die drei Kernaktivitäten

Gewinnung, *Dokumentation* und *Übereinstimmung*, welche sich in gegenseitiger Wechselwirkung befinden und damit einen iterativen Prozess darstellen. Darüber hinaus werden die Querschnittsfunktionen *Validierung* und *Management* definiert. Auch EBERT [11] unterteilt das Anforderungsmanagement in Aktivitäten und unterscheidet dabei zwischen *Ermittlung*, *Analyse*, *Abstimmung*, *Dokumentation*, *Prüfung* und *Verwaltung*. HOOD ET AL. [12] definieren zwei sich gegenseitig bedingende Prozesse zum Definieren von Anforderungen, wobei zunächst der Umfang des Entwicklungsprojektes beschrieben wird und darauf aufbauend Anforderungen definiert werden. Dieses iterative Vorgehen, anhand dessen Unsicherheit sukzessive reduziert werden soll, findet sich auch im erweiterten ZHO-System-Tripel wieder [13]. Das *Zielsystem* umfasst dabei alle Ziele, Randbedingungen sowie Abhängigkeiten. Das *Handlungssystem*, ein sozio-technisches System, das sämtliche beteiligte Ressourcen beinhaltet, fungiert als Bindeglied zwischen Ziel- und Objektsystem und überführt das zunächst vage initiale Zielsystem durch Analyse- und Synthesetätigkeiten in das *Objektsystem*, das auch das finale Produkt beinhaltet.

Um ableiten zu können, welche Aktivitäten durchgeführt werden sollen, schlagen ALBERS ET AL. eine Bewertung der Zielsystemelemente hinsichtlich der Dimensionen *Reifegrad*, *Auswirkung*, *Härtegrad* und *Änderbarkeit* vor [14]. Der Reifegrad eines Zielsystemelements entspricht dabei der vorliegenden Unsicherheit. Die Bewertung wird durch eine Analyse hinsichtlich Wissens- und Definitionslücken operationalisiert und baut damit auf dem Unsicherheitsverständnis von HASTINGS und MCMANUS auf [15]. Definitionslücken charakterisieren sich dahingegen, dass Entscheidungen hinsichtlich des Produktes noch getroffen werden müssen, während Wissenslücken unzureichendes Wissen beschreiben. Nach DE WECK [16] umfasst Unsicherheit sowohl die Wahrscheinlichkeit, dass getroffene Annahmen während des Entwicklungsprozesses falsifiziert werden, als auch, dass vollkommen unbekannte Sachverhalte auftreten, welche die Entwicklung des Produktes oder dessen Erfolg am Markt beeinflussen. Während Technologieunsicherheit Wissens- und Definitionslücken, die hinsichtlich der technischen Umsetzung des Produktes bestehen, beschreibt, belaufen sich Marktunsicherheiten hingegen auf Lücken hinsichtlich Kundenbedürfnissen [17], Anwendungen [3] oder der Beschaffenheit der Zielmärkte [18].

2.2 ASD – Agile Systems Design

Um in dem beschriebenen, instabilen Entwicklungsumfeld reaktionsfähig [8] zu bleiben und die Kundenintegration zu stärken, nutzen Unternehmen in der

Mechatroniksystementwicklung zunehmend agile Ansätze und erhoffen sich somit eine Steigerung der Flexibilität ihrer etablierten, eher plangetriebenen Ansätze [19]. Da agile Ansätze jedoch auf erfolgreichen Mechanismen der Softwareentwicklung basieren, führt ihre Integration in die Prozesse der Mechatroniksystementwicklung zu einer Reihe von Herausforderungen. So hemmt beispielsweise die Physikalität von Produkten die nachhaltige Implementierung agiler Ansätze [5]. Um einen für den jeweiligen Einsatzkontext angemessenen Grad an Agilität zu ermöglichen, stellt der ASD – Agile Systems Design Ansatz nach ALBERS ET AL. neun Grundprinzipien für die agile Entwicklung mechatronischer Systeme zur Verfügung [20]:

- 1) Der Mensch steht im Zentrum der Produktentstehung
- 2) Jeder Produktentstehungsprozess ist einzigartig und individuell
- 3) Agile, situations- und bedarfsgerechte Kombination strukturierender und flexibler Elemente
- 4) Jedes Prozesselement lässt sich im ZHO-Modell verorten und jede Aktivität basiert auf den Grundoperatoren Analyse und Synthese
- 5) Alle Aktivitäten der Produktentwicklung sind als Problemlöseprozess zu verstehen
- 6) Jedes Produkt wird auf Basis von Referenzen entwickelt
- 7) Produktprofile, Invention und Marktzugang bilden die notwendigen Bestandteile des Innovationsprozesses
- 8) Frühe und kontinuierliche Validierung dient dem kontinuierlichen Abgleich zwischen Problem und dessen Lösung
- 9) Für eine situations- und bedarfsgerechte Unterstützung in jedem Entwicklungsvorhaben müssen Denkweisen, Methoden und Prozesse skalierbar, fraktal und adaptierbar sein

Bild 1: Grundprinzipien des Agiles Systems Design Ansatzes [20]

Um diese in Abhängigkeit des gewünschten Einsatzkontexts zu operationalisieren, haben ALBERS ET AL. eine Methodik entwickelt, die basierend auf dem angestrebten Einsatzkontext Prozessentwickler und Entwicklerteams dabei unterstützt, die für das jeweilige Vorhaben relevanten Einflussfaktoren auf die agilen Fähigkeiten einer Organisationseinheit zu identifizieren und daraus eine Gewichtung der ASD-Prinzipien zu errechnen [21]. Die Umsetzung der relevantesten Prinzipien führt zu einer positiven Beeinflussung der Einflussfaktoren [22]. Dabei bildet die Ableitung eines Methodenprofils die Grundlage der Methodik. Zu diesem Zweck wird zunächst ausgewählt, ob eine Implementierung agiler Vorgehensweisen auf einer oder mehrerer der Kontextgruppen *Individuum*, *Projekt*,

Management oder *Unternehmen* erfolgen soll. Entsprechend der Auswahl werden diesen Kontextgruppen zugeordnete Untergruppen gegeneinander gewichtet. Daraufhin werden dem Methodenanwender diejenigen Einflussfaktoren auf die agilen Fähigkeiten präsentiert, die den jeweils am höchsten gewichteten Untergruppen zugeordnet wurden. Diese werden händisch entsprechend der im Anwendungskontext aufgetretenen Herausforderungen ausgewählt und bilden einen elementaren Bestandteil des Methodenprofils. Diese Faktoren gilt es durch den gezielten Einsatz geeigneter methodischer Elemente positiv zu beeinflussen. [21; 22]

3 Forschungsdesign

Bereits zu einem frühen Zeitpunkt in der Produktentwicklung werden die Qualität, die Kosten und die Leistung künftiger Produkte zu einem großen Anteil definiert. Hier steht vor allem das Zielsystemmanagement im Fokus. Allerdings liegen in der Produktentwicklung insbesondere zu einem frühen Zeitpunkt enorme Unsicherheiten vor. So sind auch Ziele und Anforderungen mit Marktunsicherheiten behaftet, die den Erfolg des Produktes am Markt entscheidend beeinflussen. Um eine methodische Unterstützung zu entwickeln, die sowohl auf agilen Ansätzen zum Umgang mit Unsicherheiten sowie auf Elementen plangetriebener Entwicklung zur Befriedigung der Anforderungen aus Sicht der Mechatroniksystementwicklung an Entwicklungsprozesse basiert, wird im Folgenden ein Methodenprofil abgeleitet. Dies geschieht durch die Beantwortung der nachfolgenden Forschungsfragen:

- 1) Welche Herausforderungen des Zielsystemmanagements treten, im Vergleich zu den in der Literatur identifizierten, in der industriellen Praxis der Produktentwicklung auf?
- 2) Welches Methodenprofil zur Unterstützung des Zielsystemmanagements lässt sich durch Abgleich der Herausforderungen mit den ASD-Prinzipien ableiten?

Dazu wurde zunächst eine Literaturanalyse auf Basis der Suchbegriffe Produktentwicklung, Anforderungs- oder Zielsystemmanagement und entsprechenden Synonymen durchgeführt. Die gefundene Literatur wurde hinsichtlich des Vorgehens (agil oder sequentiell), welches die untersuchten Unternehmen gewählt haben, eingeteilt. Darauf aufbauend wurden 17 Vertretern aus Industrie und Forschung im Rahmen einer Befragung die Herausforderungen gezeigt und dabei die Relevanz dieser im Kontext der industriellen

Praxis evaluiert. Außerdem konnten bis dato nicht erfasste Herausforderungen ergänzt werden. Die 17 Probanden waren von 12 Unternehmen und einer Hochschule, wobei es sich um 2 Professoren, jeweils einem Geschäftsführer und Geschäftsbereichsleiter, 6 Projektleiter, 4 Abteilungsleiter und 3 Experten des Anforderungsmanagements handelte. Die Unternehmen mit 50 bis mehr als 10000 Mitarbeiter verteilen sich auf die Branchen Ingenieursdienstleistungen, Antriebstechnik, Maschinen- und Anlagenbau, Elektronikgeräte, Fahrzeugbau und Software.

4 Ergebnisse

4.1 Herausforderungen des Zielsystem- und Anforderungsmanagements

Im Rahmen der durchgeführten Literaturanalyse wurden Herausforderungen erfasst, welche im Zuge des Zielsystem- oder Anforderungsmanagement in der Entwicklung von rein physischen, rein digitalen oder mechatronischen Produkten auftreten. Dabei wurde eine Unterscheidung zwischen dem Vorgehen – agil oder sequentiell –, welches die in den Quellen analysierten Unternehmen gewählt haben, vorgenommen.

Dabei wurden Herausforderungen identifiziert, die unabhängig vom Vorgehen auftreten und eher Herausforderungen des Zielsystem- und Anforderungsmanagements prinzipiell zu sein scheinen. Dazu zählt unter anderem das fehlende Know-How der beteiligten Stakeholder hinsichtlich des Anforderungsmanagements. Damit eng verbunden ist die Herausforderung, qualitativ hochwertige Anforderungen zu formulieren, die ebenfalls unabhängig des Vorgehens auftritt. Weiter wurden in der Literatur die Herausforderung, Kompromisse bei der Definition von Anforderungen einzugehen, um die Bedürfnisse sämtlicher Stakeholder abzubilden und das Priorisieren der Anforderungen bei der Umsetzung, sowohl im Kontext eines agilen-, als auch eines sequentiellen Vorgehens, identifiziert.

	agil		sequentiell	
	Literatur	Interview	Literatur	Interview
Identifikation potentieller Kunden & Anwender künftiger Produkte / Auswahl von Vertretern	[23]	x		x
Identifikation der für den Kunden und Anwender entscheidenden Anforderungen	[24]		[25]	x
Definition von Anforderungen in direkter Kooperation mit Anwendern und Kunden	[24]			
Schaffung eines Kompromisses, sodass jeder Stakeholder ausreichend repräsentiert	[23]	x	[26]	x
Gewährleistung eines angemessenen und notwendigen Maß an Vollständigkeit				x
Berücksichtigen von nicht-funktionalen Anforderungen	[24], [27]	x		
Antizipation des Nutzerverhaltens bei neuartigen Produkten				x
Unzureichende Spezifizierung und Konkretisierung der Produkthanforderungen				x
Verfassen qualitativ hochwertiger Anforderungen, die von Projektstart an eindeutig sind	[24]		[11], [25]	x
Gewährleistung eines einheitlichen Verständnisses der Anforderungen	[30]			
Transparenz: Anforderungen nachverfolgbar und wiederverwendbar gestalten// Transparenz für alle Akteure bezüglich der Aktivitäten im Produktentwicklungsprozess	[27]		[28], [29]	x
Priorisierung der Anforderungen	[24], [5], [31]	x	[29]	x
Heterogenität der Tools (Demotivation der Entwickler durch komplexe Tools)			[28]	x
Gewährleistung einer minimalen, aber ausreichenden Dokumentation	[24], [27]			
Berücksichtigung von Abhängigkeiten einzelner Anforderungen zueinander	[24], [27]	x		
Integration ermittelter Änderungsbedarfe	[24]	x	[28]	x
Abschätzung der Tragweite einer Änderung		x	[32]	x
Planen der Arbeitspakete einer Iteration mit Abschätzen des Arbeitsaufwands und Fertigstellungsdatums	[31]			
Modularisierung des Produkts durch Unterteilung in sinnvolle Aktivitäten	[5], [30], [31]			
Management des Backlogs: Nacharbeitsschritte im Backlog aufnehmen & Neubewertung der Anforderungen	[24], [27], [30]	x		
Erfolgreiches Management der Zusammenarbeit der einzelnen Teams durch funktionierende Schnittstellen & Berücksichtigung externer Abhängigkeiten und Betrachten des System als Ganzes	[5], [31]			
Zu geringe Aufmerksamkeit, welche der Validierung beigemessen wird			[25], [33]	x
Bewertung der Zielerreichung und Identifikation der Bewertungskriterien	[23]			
Einbeziehung der Stakeholder: Kundenverfügbarkeit für Reviews und Akzeptanztests	[5], [24], [27]	x		
Überprüfung der Produkthanforderungen, welche anfangs nur unscharf formuliert wurden	[30]			
Erstellen von Prototypen zur Validierung innerhalb eines Sprints mit den wichtigsten Eigenschaften	[5],	x		
Bewertung der Sinnhaftigkeit und Notwendigkeit definierter Produkthanforderungen	[23]			x
Validierung trotz hohem Zeit- und Kostendruck				x
Differenzierung zwischen Verifizierung und Validierung				x
Kommunikation mit externen Stakeholdern und interdisziplinäre Zusammenarbeit	[23]	x	[29]	x
Fehlendes Know-how im Zielsystem- und Anforderungsmanagement	[24], [27]		[26], [34]	x
Mangelndes Verständnis für die Notwendigkeit des Anforderungsmanagements			[26]	x
Begegnung des hohen Kostendrucks in der Produktentwicklung			[26]	x
Optionen möglichst lange offen halten	[5], [31]			
Befähigen der dezentralisierten Entscheidungsfindung	[24]			
Generierung eines Kundennutzens am Projektanfang	[30]			

Bild 2: Herausforderungen des agilen und sequentiellen Anforderungs- und Zielsystemmanagement

Im Kontext der sequentiellen Ansätze wurde als Herausforderung, welche nicht im Kontext der agilen Ansätze auftritt, die fehlende Aufmerksamkeit der Entwickler für die Validierung und damit den kontinuierlichen Abgleich mit den Anforderungen von Kunde und Anwender genannt. Da dieser Abgleich ein zentrales Element der agilen Ansätze darstellt, findet sich diese Herausforderung hier dementsprechend nicht; allerdings werden mit der Validierung einhergehende Herausforderungen aufgeführt. Darunter fällt beispielsweise, die Schwierigkeit des Einbeziehens externer Stakeholder, da diese nur bedingt verfügbar sind, oder das Erstellen von Prototypen in jedem Sprint, da dies sehr zeitintensiv ist. Außerdem

entstehen spezifische, im agilen Vorgehen begründete Herausforderungen. So finden sich in der Literatur Schwierigkeiten, die mit der Modularisierung des Produktes zusammenhängen. Dieses ist notwendig, um das Produkt in Sprints, an deren Ende ein lieferbares Produktinkrement steht, entwickeln zu können. Damit gehen die in der Literatur identifizierten Herausforderungen, Management des Backlogs hinsichtlich Nacharbeit und Optionen in der Realisierung möglichst lange offenhalten, einher.

In der Studie mit Vertretern aus Forschung und industrieller Praxis wurden die identifizierten Herausforderungen größtenteils bestätigt. Im Kontext des sequentiellen Vorgehens wurden sämtliche Herausforderungen bestätigt und darüber hinaus noch die Antizipation des Nutzerverhalten bei neuartigen Produkten und die unzureichende Spezifizierung und Konkretisierung identifiziert. Im Zusammenhang mit der zu geringen Aufmerksamkeit der Validierung wurde von den Probanden auch der Zeit- und Kostendruck und das Verständnis für die Validierung bzw. die Abgrenzung zur Verifizierung angeführt.

Die Probanden, welche zu den agilen Ansätzen befragt wurden, bestätigten nicht alle Herausforderungen, die in der Literatur identifiziert wurden. So wurde von einigen angeführt, dass das Offenhalten von Optionen keine Herausforderung darstellt, sondern vielmehr eine Chance, die auch im Vorgehen der agilen Ansätze begründet ist. Das Verfassen qualitativer Anforderungen wurde von den Probanden auch nicht als eine Herausforderung des agilen Anforderungsmanagements gesehen, sondern vielmehr als eine übergreifende Herausforderung, die unabhängig vom Vorgehen auftritt. Auch die Transparenz über die Anforderungen für alle Stakeholder wird nicht als Herausforderung angesehen. In diesem Zuge wurde von einigen Probanden agile Praktiken wie z.B. Daylies als Lösungsansatz genannt. Eine große Herausforderung sehen viele der Befragten im Umgang mit Änderungen und in dem Berücksichtigen von Abhängigkeiten einzelner Anforderungen zueinander.

Übergreifend lässt sich feststellen, dass die in der Literatur identifizierten Herausforderungen größtenteils auch in der Probandenstudie bestätigt werden konnten. Einige, der im sequentiellen Anforderungsmanagement gefundenen Herausforderungen, wie beispielsweise die zu geringe Aufmerksamkeit für die Validierung, treten im Rahmen der agilen Ansätze nicht auf, da sie hier explizit verankert sind. Allerdings finden sich verwandte Herausforderungen auch in den agilen Ansätzen. Diese belaufen sich im Kontext der Validierung aber eher auf die Durchführung dieser und verbundenen Fragestellungen.

4.2 Methodenprofil durch Abgleich der Herausforderungen mit ASD-Prinzipien

Das Methodenprofil beinhaltet die anwendungsfallsspezifischen Herausforderungen, die entsprechend zugeordneten Einflussfaktoren hinsichtlich der agilen Fähigkeiten einer Organisation und daraus abgeleitet die Gewichtung der ASD-Grundprinzipien. In Anlehnung des Vorgehens, das in Abschnitt 2.2 beschrieben wurde, wurden zunächst alle Kontextgruppen ausgewählt. In Abhängigkeit der identifizierten Herausforderungen wurden daraufhin die Untergruppen gegeneinander gewichtet, wobei insbesondere die Untergruppen *Validierung* und *Prototyping* relevant waren. Zuletzt wurden die auf Basis der Untergruppen vorgeschlagenen Einflussfaktoren gesichtet und die irrelevanten Faktoren entfernt. Dabei waren schlussendlich 78 Faktoren relevant. Die folgende Abbildung visualisiert exemplarisch die Zuordnung einiger Herausforderungen zu den Faktoren. Dabei wurden zunächst Kontextgruppen gewählt und Untergruppen gewichtet.

Herausforderung	Zugeordneter Faktor	Kontextgruppe	Untergruppe
Identifikation der für Kunden und Anwender entscheidenden Anforderungen	Integration von Kunden, Anbieter und Anwender Planungstreffen mit Kunden	Unternehmen Projekt	1-7 Stakeholder 3-2 Projektmanagement
Schaffung eines konsensfähigen Kompromisses, in dem sich jeder Stakeholder ausreichend repräsentiert fühlt	Geregelte unternehmensübergreifende Kollaboration	Unternehmen	1-7 Stakeholder
...
Identifikation potenzieller Kunden des Produkts, um die Entwicklung auf diese abzustimmen	Identifikation und Einbindung neuer Stakeholder	Projekt	3-2 Projektmanagement
Gründliche Validierung trotz hohen Zeit- und Kostendrucks	Frühes und kontinuierliches Validieren Umfangreiche Validierung des Vorgehens	Projekt Projekt	3-9 Validierung 3-9 Validierung
Zu geringe Aufmerksamkeit, welche der Validierung im Produktentstehungsprozess beigemessen wird	Umfangreiche Validierung des Vorgehens	Projekt	3-9 Validierung

Bild 3: Herausforderungen des sequentiellen Anforderungsmanagements und zugeordnete Faktoren

Die beschriebene Vorgehensweise wurde sowohl für das agile als auch für das sequentielle Zielsystemmanagement durchgeführt und die resultierenden Faktoren verglichen. Den Herausforderungen des agilen Zielsystemmanagements konnten 61 Faktoren und denen des sequenziellen Vorgehens 31 Faktoren zugeordnet werden. Dabei gab es eine Überschneidung von 14 Faktoren. Darüber lässt sich die in Bild 4 dargestellte Gewichtung der ASD-Prinzipien ermitteln, der eine durchgeführte Zuordnung von Faktoren zu Prinzipien zu Grunde liegt [21]. Beim agilen Zielsystemmanagement sind besonders *Prinzip 4* und *Prinzip 8* von Relevanz, wohingegen beim sequentiellen Vorgehen *Prinzip 7*, die höchste Relevanz hat, wobei die *Prinzipien 8 und 4* ebenfalls sehr relevant sind. Die Unterstützung der frühen und kontinuierlichen Validierung (*Prinzip 8*) ist in beiden Vorgehensweisen von hoher Relevanz. Betrachtet man das übergreifende Ergebnis, fällt auf, dass *Prinzip 1* eine der relevantesten Positionen einnimmt und sogar vor *Prinzip 8* aufgeführt wird.

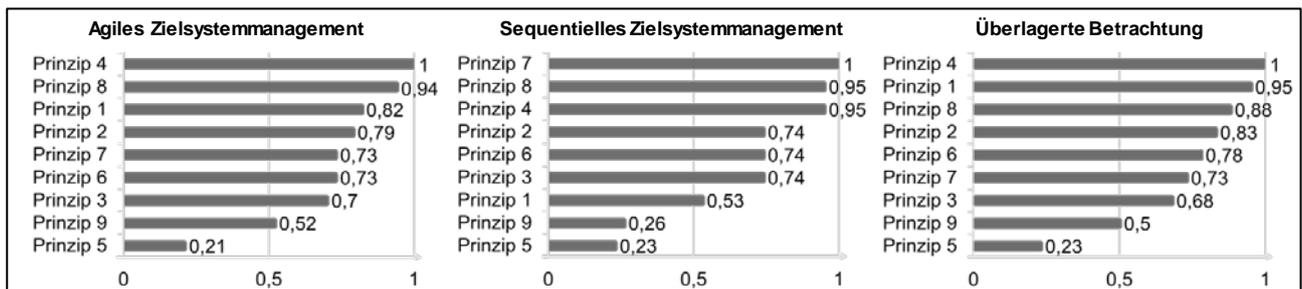


Bild 4: Ranking der ASD-Grundprinzipien entsprechend der bewerteten Herausforderungen

Das Methodenprofil umfasst somit die in Kapitel 4.1 herausgearbeiteten Herausforderungen, wie zum Beispiel den Bedarf die Aufmerksamkeit der Entwickler für die Validierung zu heben, und gleichzeitig Methoden an die Hand zu legen, welche dabei helfen Inkremente am Ende eines Sprints zu validieren. Weiter sind die gefundenen Einflussfaktoren von Relevanz. Exemplarisch sollen an dieser Stelle exemplarisch Prototyping auf Gesamtebene, Planungstreffen mit Kunden, Good enough Planing und Integration von Kunden und Anwender genannt werden. Diese spiegeln sich auch in den priorisierten ASD-Grundprinzipien wieder, die ebenfalls ein Bestandteil des Methodenprofils zur Unterstützung des Zielsystemmanagements bilden. So gilt es insbesondere die Prinzipien 1, 4, 7 und 8 bei der Methodenerstellung zu berücksichtigen.

5 Fazit und Ausblick

Die Relevanz der meisten in der Literatur identifizierten Herausforderungen bzgl. des agilen und sequentiellen Zielsystemmanagements konnte auch für die Praxis nachgewiesen werden. Die identifizierten Herausforderungen adressieren unabhängig davon, ob sie im Kontext einer agilen- oder sequentiellen Vorgehensweise verortet wurden, ähnliche Themenfelder, unterscheiden sich jedoch hinsichtlich ihres Ursprungs und ihrer Auswirkung. Beim Abgleich der Herausforderungen mit den ASD-Prinzipien konnte festgestellt werden, dass für die sequentiellen Ansätze insbesondere die Operationalisierung von *Prinzip 7* von Relevanz ist, während dieses bei den agilen Ansätzen weniger Relevanz besitzt. Dies lässt sich darauf zurückführen, dass in einem agilen Kontext Kunden- und Anwenderbedürfnisse gezielt in den Fokus des Innovationsprozesses gesetzt werden. Dass *Prinzip 8* in allen drei durchgeführten Bewertungen eine hohe Relevanzbewertung erzielte, unterstreicht die Bedeutung der Validierung für die Mechatroniksystementwicklung, zeigt aber auch, dass diese den Entwicklern weiter zugänglich gemacht werden muss.

Zur Unterstützung des Produktentwicklers beim Zielsystemmanagement wurde ein Methodenprofil abgeleitet, welches aus den identifizierten Herausforderungen, den zugeordneten Einflussfaktoren und den ASD-Prinzipien besteht. Dabei gilt es somit neben der Validierung, die Integration von Stakeholdern und die parallele Entwicklung von Zielen und Objekten systematisch zu unterstützen. Dies soll durch einen vierstufigen Prozess operationalisiert werden, bei dem zunächst das initiale Zielsystem abgeleitet wird, dann das Zielsystem durch einen Workshop mit Kunden und Anwendern konkretisiert wird, bevor durch eine Bewertung des Zielsystems die Aufmerksamkeit der Entwickler für die Validierung gesteigert werden soll, die im letzten Schritt durchgeführt wird. Diesen Prozess gilt es in nachfolgenden Forschungsarbeiten näher zu beschreiben und mit Methoden, insbesondere zur Unterstützung der frühen Validierung, anzureichern.

Literatur

- [1] Gausemeier, Jürgen; Plass, Christoph: *Zukunftsorientierte Unternehmensgestaltung: Strategien, Geschäftsprozesse und IT-Systeme für die Produktion von morgen*. 2. Aufl. München: Hanser, 2014.
- [2] Reinhart, Gunther; Lindemann, Udo, Heinzl, Joachim: *Qualitätsmanagement Ein Kurs für Studium und Praixs*. Berlin Heidelberg: Springer, 1996. – ISBN: 978-3-540-61078-6.
- [3] Albers, Albert; Behrendt, Matthias; Klingler, Simon; Reiß, Nicolas; Bursac, Nikola: *Agile product engineering through continuous validation in PGE – Product Generation Engineering*. Design Science, 2017. – DOI: 10.1017/dsj.2017.5
- [4] Fowler, Martin; Highsmith, Jim: *The Agile Manifesto*. Software Development, Nr. 9, S.28-35, 2001.
- [5] Schmidt, Tobias S.; Atzberger, Alexander; Gerling, Christoph; Schrof, Julian; Weiss, Stefan; Paetzold, Kristin: *Agile Development of Physical Products: An Empirical Study about Potentials, Transition and Applicability*, 2019. – ISBN: 978-3-943207-38-5
- [6] DIN 69901-2:2009-01: *Projektmanagement-Projektmanagementsysteme-Teil 2: Prozesse, Prozessmodell*, 2009.
- [7] VDI/VDE 3694:2014: *Lastenheft/Pflichtenheft für den Einsatz von Automatisierungssystemen*, 2014.
- [8] Albers, Albert; Heimicke, Jonas; Müller, Johannes; Spadinger, Markus: *Agility and its Features in Mechatronic System Development: A Systematic Literature Review*. In: Proceedings of 30th ISPIM Innovation Conference, in print, 2019.
- [9] Hanser, Eckhart: *Agile Prozesse: Von XP über Scrum bis MAP*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2010.
- [10] Pohl, Klaus: *Requirements Engineering: Grundlagen, Prinzipien, Techniken*. 2. Aufl. Heidelberg: Dpunkt-Verlag, 2008. – ISBN: 978-3-89864-550-8
- [11] Ebert, Christof: *Systematisches Requirements Engineering: Anforderungen ermitteln, spezifizieren, analysieren und verwalten*. 5. überarb. Aufl., Heidelberg: Dpunkt Verlag. - ISBN: 978-3-86490-139-3

- [12] Hood, Colin; Fichtinger, Stefan; Pautz, Urte; Wiedemann, Simon: *Requirements Management: The Interface Between Requirements Development and All Other Systems Engineering Processes*. Berlin: Springer-Verlag. – ISBN: 978-3-540-68476-3
- [13] Albers, Albert; Ebel, Björn; Lohmeyer, Quentin: *Systems of Objectives in Complex Product Development*. In Proceedings of TMCE 2012.
- [14] Albers, Albert; Lohmeyer, Quentin; Ebel, Björn: *Dimensions of Objectives in Interdisciplinary Product Development Projects*. Proceedings of ICED 2011, 2011.
- [15] McManus, Hugh; Hastings, Daniel: *A framework for understanding uncertainty and its mitigation and exploitation in complex systems*. IEEE Engineering Management Review Jg. 34, Nr. 3, 2006. – DOI: 10.1109/EMR.2006.261384
- [16] Weck, Olivier de; Eckert, Claudia; Clarkson, John: *A Classification of Uncertainty for early Product and System Design*. Proceedings of the 16th International Conference on Engineering Design, 2007.
- [17] Lynn, Gary S.; Akgün, Ali E: *Innovation Strategies under Uncertainty: A Contingency Approach for New Product Development*, Engineering Management Journal Jg. 10, Nr. 3, S. 11-18, 1998.
- [18] Walcher, Dominik: *Der Ideenwettbewerb als Methode der aktiven Kundenintegration*. Dissertationsschrift Techn. Universität München, DUV Deutscher Universitäts-Verlag, 2007.
- [19] Boehm, Barry; Turner, Richard: *Using risk to balance agile and plan- driven methods*, Computer, Jg. 36, Nr. 6, S .57–66, 2003. DOI: 10.1109/MC.2003.1204376.
- [20] Albers, Albert; Heimicke, J.; Spadinger, M.; Reiß, N.; Breitschuh, J.; Richter, T.; Bursac, N.; Marthaler, F.: *Eine Systematik zur situationsadäquaten Mechatroniksystementwicklung durch ASD – Agile Systems Design*. KIT Scientific Working Papers, Karlsruhe: KIT, 2019. - DOI: 10.5445/IR/1000091847.
- [21] Albers, Albert; Heimicke, Jonas; Trost, Sebastian; Spadinger, Markus: *Alignment of the change to agile through method-supported evaluation of agile principles in physical product development*. Proceedings of 30th CIRP Design Conference, in press, 2020.
- [22] Albers, Albert; Heimicke, Jonas; Trost, Sebastian: *Effects and Interactions of agile Principles in the Process of Mechatronic System Development: Building a basic Understanding for adaptive Process Design*. Proceedings NordDesign 2020, in print.
- [23] Ebel, Björn: *Modellierung von Zielsystemen in der interdisziplinären Produktentstehung*. In: IPEK-Forschungsberichte Bd. 85. Dissertationsschrift Karlsruher Institut für Technologie.
- [24] Schön, Eva-Maria; Winter, Dominique; Escalona, María José; Thomaschewski, Jörg: *Key Challenges in Agile Requirements Engineering*. Agile Processes in Software Engineering and Extreme Programming, S. 37-51, 2017. - DOI: 10.1007/978-3-319-57633-6_3
- [25] Karlsson, Lena; Dahlstedt, Asa G.; Natt och Dag, Johan: *Challenges in Market-Driven Requirements Engineering - an Industrial Interview Study*. Proceedings of Eighth International Workshop on Requirements Engineering, 2002.
- [26] Morris, Philip; Masera, Marcelo; Wilikens, Marc: *Requirements engineering and industrial uptake*. Requirements Engineering Jg. 3, Nr. 2 S. 79-83, 1998. – DOI: 10.1007/BF02919966
- [27] Vithana, N. V.: *Scrum Requirements Engineering Practices and Challenges in Offshore Software Development*. International Journal of Computer Applications, 2015. – DOI: 10.5120/20472-2649

-
- [28] Weber, Matthias; Weisbrod, Joachim: *Requirements engineering in automotive development: experiences and challenges*. IEEE Software Jg. 20, Nr. 1, 2003. – DOI: 10.1109/MS.2003.1159025
- [29] Zave, Pamela: *Classification of research efforts in requirements engineering*. ACM Computing Surveys, Jg. 29, Nr. 4, S. 315-321, 1997. – DOI: 10.1145/267580.267581
- [30] Gregory, Peggy; Barroca, Leonor; Taylor, Katie; Salah, Dina; Sharp, Helen: *Agile Challenges in Practice: A Thematic Analysis*. Agile Processes in Software Engineering and Extreme Programming, 2015.
- [31] Ovesen, Nis; Dowlen, Chris: *The Challenges of Becoming Agile – Experiences from New Product Development in Industry and Design Education*. Proceedings of the 14th International Conference on Engineering and Product Design Education, 2012.
- [32] Peterson, Clint; Paasch, Robert K.; Ge, Ping; Dietterich, Thomas G.: *Product Innovation for Interdisciplinary Design under Changing Requirements*. Proceedings of ICED 2007, S. 861-862, 2007.
- [33] Bubenko, J. A.: *Challenges in requirements engineering*. IEEE Computer Society 1995 – Proceedings of the Second IEEE, S. 160-162, 1995. – DOI: 10.1109/ISRE.1995.512557

Potentiale des Additive Tooling zur Steigerung der Effizienz und Agilität von Validierungsaktivitäten in der frühen Phase der Produktentwicklung

Steffen Schrock^{a,b}, Fang-Wei Chang^b, Stefan Junk^a, Albert Albers^b

^aHochschule Offenburg

Labor Rapid Prototyping

Brückenhäuserstr. 26, 77723 Gengenbach

Email: steffen.schrock@hs-offenburg.de; Internet: <https://www.hs-offenburg.de/>

^bKIT – Karlsruher Institut für Technologie

IPEK – Institut für Produktentwicklung

Kaiserstr. 10, 76131 Karlsruhe

Email: sekretariat@kit.edu; Internet: <http://www.ipek.kit.edu>

Inhalt: Zur Herstellung von Spritzgussformeinsätzen kommen in der Regel spanende Verfahren zum Einsatz. In den letzten Jahren hat sich allerdings auch die additive Herstellung dieser Werkzeuge als zweckmäßig erwiesen. In der Produktentwicklung spielt die Agilität heute eine immer wichtigere Rolle. Um mögliche Potentiale des Additive Tooling im Rahmen des Agile Prototyping und um Unterschiede zu den konventionellen Herstellverfahren aufzuzeigen, werden Angebote für die Fertigung mehrerer Formeinsätze durch eine CNC- und HSC-Fertigung, sowie durch additive Herstellung angefragt und hinsichtlich Beschaffungskosten und -zeiten miteinander verglichen. Zudem erfolgt eine Bewertung der technischen Unterschiede. Aus diesen beiden Betrachtungen kann schließlich ein Profil über die drei Herstellverfahren abgeleitet werden, welches bei der anwendungsfallspezifischen Verfahrensauswahl unterstützen soll.

Stichwörter: Spritzguss, Additive Tooling, Agile Produktentwicklung, Agiles Prototyping

Potentials of additive tooling to increase the efficiency and agility of validation activities in the early phase of product development

Abstract: Generally, machining processes are used to manufacture injection mold inserts. In recent years, however, the additive manufacturing of these tools has also proven to be useful. Agility plays an increasingly important role in product development today. In order to show possible potentials of additive tooling in the context of agile prototyping and to show differences to the conventional manufacturing processes, offers for the manufacture of multiple mold inserts by CNC and HSC manufacturing, as well as through additive manufacturing are requested and compared in terms of procurement costs and times. The technical

differences are also assessed. From these two considerations, a profile can finally be derived about the three manufacturing processes, which should support the application-specific process selection.

Keywords: *Injection Molding, Additive Tooling, Agile Product Development, Agile Prototyping*

1 Einleitung

Die Validierung trägt erheblich zum Wissensgewinn und letztlich zu einer erfolgreichen Produktentwicklung bei. Allerdings ist sie auch die aufwendigste und herausforderndste Aktivität im ganzen Produktentstehungsprozess. Damit kommt der Validierung eine zentrale Bedeutung für die weitere Verbesserung von Produktentstehungsprozessen zu. Um sicherstellen zu können, dass das Produkt später am Markt erfolgreich sein kann, muss die Validierung von Beginn an und kontinuierlich über die gesamte Entwicklungszeit erfolgen. [1] Eine, die Validierung erschwerenden Randbedingung der frühen Phase der Produktentwicklung, liegt insbesondere im Fehlen physischer Prototypen [2]. Besonders in der Entwicklung spritzgegossener Bauteile ist die frühe Phase durch eine schlechte Verfügbarkeit von Prototypen gekennzeichnet, da die für den Spritzgussprozess notwendigen Werkzeuge teuer sind und oft lange Herstellzeiten aufweisen. Erschwerend kommt hinzu, dass vor allem im Prozess der Produktentstehung häufige Anpassungen des Werkzeuges nötig sind, was zu einem zusätzlichen Anstieg der Entwicklungskosten und einer verlängerten Time-to-Market führt [3]. Besonders Entwicklungsprozesse die von geringer Planungsstabilität geprägt sind, können stark von Methoden zur Steigerung der Agilität profitieren, um durch den frühen Erhalt validierungsfähiger Prototypen die Unsicherheit zu verringern [4, 5].

Der eigentliche Prozess des Spritzgießens mit konventionellen Hard- und Softtools ist allgemein hin gut bekannt und auch initiale Untersuchungen mit additiv hergestellten Formeinsätzen sind verfügbar [6]. Allerdings beschäftigen sich diese Arbeiten im Wesentlichen mit dem reinen Fertigungsprozess. Deshalb wird der Fokus dieser Studie auf den Beschaffungsprozess von Formeinsätzen gelegt. Forschungsziel ist es, einschätzen zu können, welches Potential zur Steigerung der Effizienz und Agilität sich hinter dem Additive Tooling verbirgt, wenn die Werkzeuge nicht selbst gefertigt, sondern über einen entsprechenden Lieferanten beschafft werden müssen.

2 Stand der Forschung

Eine Möglichkeit zur schnellen und günstigen Erstellung von Prototypen stellt das Rapid Prototyping, häufig auch als 3D-Druck bezeichnet, dar. Allerdings unterliegen die so erstellten Prototypen diversen Einschränkungen. Da sie mit einer anderen Fertigungstechnologie und in der Regel aus anderen Werkstoffen als das spätere Produkt hergestellt werden, besitzen sie meist auch andere Eigenschaften und sind somit nur bedingt validierungsfähig. Eine effiziente Alternative bietet hier das Additive Tooling (AT), eine Fertigungsmethode bei der in der Regel sogenannte Formeinsätze, für die Anwendung in einer Stammform, additiv hergestellt werden. Auch diese Methode zur Fertigung validierungsfähiger Prototypen unterliegt Einschränkungen [6]. Beispielweise sind nur vergleichsweise wenige Kunststoffe für das Spritzgießen in die gedruckten Formeinsätze geeignet und es lassen sich nur verhältnismäßig kleine Stückzahlen realisieren [7]. Auch weisen die Einsätze eine schlechtere Oberflächengüte auf und die längeren Abkühlzeiten im Spritzgussprozess könnten zu anderen Eigenschaften der Prototypen führen, falls das Serienprodukt in einem Metallwerkzeug gefertigt wird. Allerdings wurde in verschiedenen Untersuchungen bereits gezeigt, dass sich auf diese Weise funktionsfähige Spritzgusswerkzeuge bereitstellen lassen [8], welche auch zur Produktion von Funktionsprototypen und Kleinstserien genutzt werden können [9].

Unter dem Begriff der „agilen Prototypen“, bieten aber auch die mit Einschränkungen versehenen Prototypen einen großen Mehrwert im agilen Entwicklungsprozess, da sie als phasenadäquate und auf das Wesentliche reduzierte Versuchsmodelle der späteren Produkte, eine bedarfsgerichtete Bestätigung der an sie gerichteten Fragestellung liefern [10]. Durch eine meist einfachere Aufbaubarkeit wird ein schnelleres Ausprobieren von Lösungsmöglichkeiten realisiert, mit dem Ziel des schnellen Scheiterns und einem damit frühzeitig einhergehenden Erkenntnisgewinn [4]. Der Faktor „Zeit“ zum Erhalt der Prototypen stellt dabei eine wesentliche Größe dar.

3 Forschungsvorgehen

Für eine differenzierte Untersuchung der Unterschiede zwischen konventionellem und additivem Tooling, wurden Angebote für mehrere Formeinsätze mit unterschiedlichen Herstellmethoden angefragt und miteinander verglichen. Zunächst wurden auf Basis einer Internetrecherche 63 Dienstleister ermittelt, die für eine Anfrage geeignet schienen. Davon

waren 38 aus der konventionellen Werkzeugfertigung (CNC und High Speed Cutting (HSC)) und 25 aus der Branche der additiven Fertigung. Da die prinzipielle Eignung des PolyJet-Verfahrens für das Additive Tooling von Spritzgusswerkzeugen bereits nachgewiesen wurde [7, 9], sollte sich die Angebotsstellung der Dienstleister speziell auf dieses Verfahren beziehen.

Um eine realistische Angebotsanfrage abgeben zu können, wurden zunächst die CAD-Modelle drei unterschiedlicher Formeinsätze konstruiert und Fertigungszeichnungen daraus abgeleitet. Für eine Beurteilung fertigungstechnischer Unterschiede auf den Preis und die Lieferzeit, wurden drei verschiedene Formeinsätze mit unterschiedlichen geometrischen Ausprägungen konstruiert, die noch dazu jeweils in drei Größen aufgeteilt wurden (siehe Bild 1). Den Formeinsatz „O-Ring“ mit Film- oder Kegelschnitt, den Formeinsatz „Zugprobe“ mit und ohne Kühlung, sowie den Einsatz „Eiskratzer“. Alle jeweils in den drei Größen 100 x 70 x 20 mm, 200 x 140 x 40 mm und 300 x 210 x 60 mm pro Formhälfte.

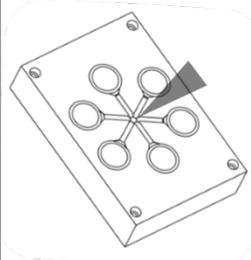
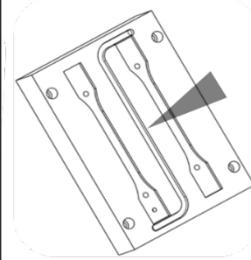
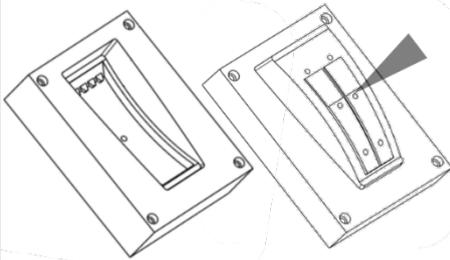
Name	O-Ring	Zugprobe	Eiskratzer (Formnest + Kern)
Komplexität	Einfach	Mittel	Hoch
			

Bild 1: Darstellung der unterschiedlichen Formeinsatzhälften und des Angusspunktes

Weiterhin wurde zur genaueren Untersuchung von Fertigungsprozessunterschieden (CNC, HSC, AT) auf folgende konstruktive Besonderheiten Wert gelegt:

- „**O-Ring**“: Symmetrische Kavität auf Auswerfer- und Düsenseite
- „**Zugprobe**“: Kavität nur auf Auswerferseite
- „**Eiskratzer**“: Asymmetrische Kavität (Formnest und Kern)

In Summe standen für die Untersuchung somit 15 Formeinsatzpaare zur Verfügung, welche sich in Form, Komplexität und Größe unterschieden und dennoch eine Vergleichbarkeit boten. Angefragt wurde jeweils ein Angebot für die Fertigung und Lieferung je eines Formeinsatzpaares. Alle Anfragen bezogen sich auf eine Fertigung unter der Einhaltung der Allgmeintoleranzen nach DIN ISO 2768-mK.

Neben dem **Angebotspreis** standen folgende Faktoren im Vordergrund:

- **Art der Anfrage:** z.B. per Mail oder Online
- **Angebotszeit:** Zeit ab der Anfrage bis zum Erhalt des Angebots
- **Lieferzeit:** Zeit ab der Bestellung bis zum Erhalt des Formeinsatzes

Aus der Literatur wurden zudem noch weitere, technische Merkmale für den Vergleich herangezogen:

- **Oberflächenqualität:** Beschaffenheit der Werkzeugoberfläche direkt nach der spanenden Bearbeitung bzw. der additiven Fertigung ohne Nacharbeit.
- **Zykluszeit:** Zeit vom Beginn der Spritzgussprozesses bis zum nächstmöglichen Beginn des Prozesses.
- **Standzeit:** Mit dem Formeinsatz herstellbares Produktionsvolumen bis dieser keine Gut-Teile mehr produzieren kann.

4 Analyse des Beschaffungsprozesses

Art der Anfrage: Neben der klassischen Anfragemöglichkeit per E-Mail bieten einige Dienstleister auch eine Werkzeugkostenkalkulation in einem Online-Kalkulator an. Der große Vorteil liegt dabei in der sofortigen Angebotserstellung und der damit einhergehenden Zeitersparnis. Das Bereitstellen einer Fertigungszeichnung ist dabei nicht notwendig, da die Online-Tools lediglich CAD-Daten benötigen. Der größte Nachteil wird allerdings in der fehlenden Prüfung durch einen realen Mitarbeiter bzw. Experten gesehen. Spezielle Wünsche oder Fragen können weiterhin nur bei direktem Kontakt berücksichtigt werden. Während die konventionelle Werkzeugherstellung noch verstärkt auf eine Anfrage per E-Mail (70 %) und somit auf eine mitarbeitergebundene Angebotserstellung ausgerichtet ist, setzen fast die Hälfte (46 %), der in der Studie betrachteten Unternehmen mit additiver Fertigung, auf die direkte Online-Kalkulation (siehe Bild 2).

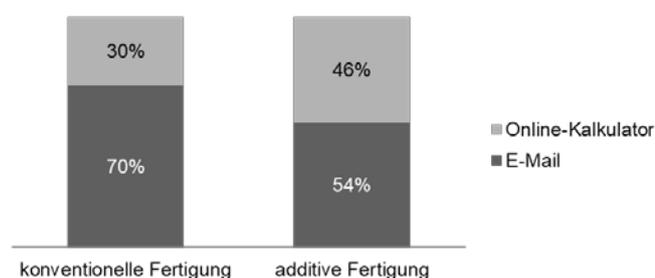


Bild 2: Anteil zwischen der Option auf E-Mail- oder Online-Angebote

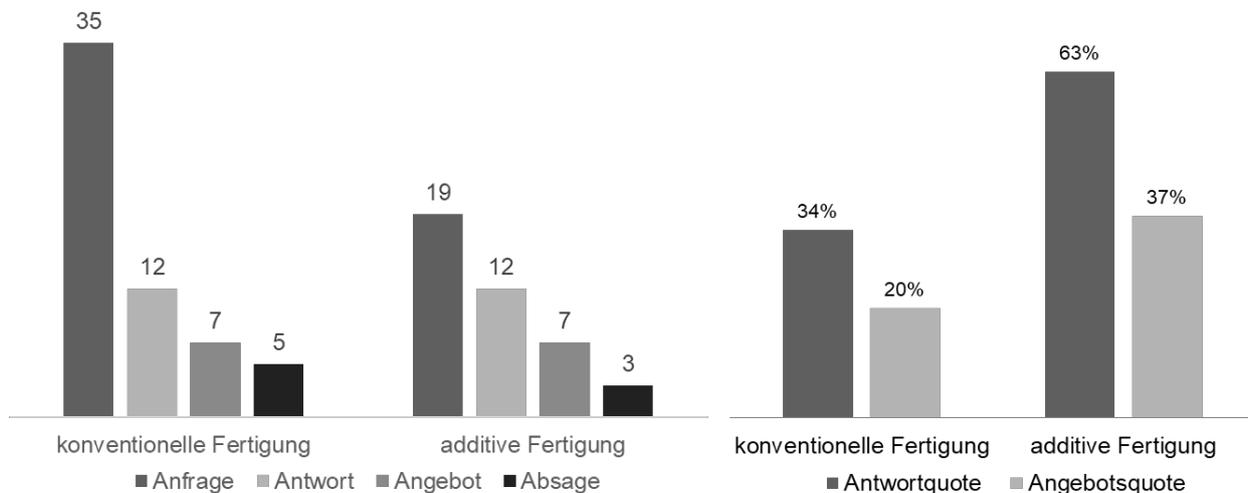


Bild 3: Anzahl der E-Mail Anfragen und Rückmeldungen (li.) und die daraus resultierende Quote (re.)

Als interessante Kennzahl stellte sich, unerwarteter Weise, die Angebotsquote, also das Verhältnis zwischen Angebotsanfrage und Angebotserhalt, heraus (siehe Bild 3). Es wird vermutet, dass die geringe Quote dem Umstand geschuldet ist, dass die Anfrage unter der Vorgabe eines studentischen Projektes durchgeführt wurde. Auffällig ist jedoch, dass die Zahl der Antworten und der verbindlichen Angebote für die additive Herstellung deutlich höher lag, als die der spanenden Fertigung. Für Unternehmen mit zuverlässigen Werkzeuglieferanten dürfte diese Quote zwar eine untergeordnete Rolle spielen, allerdings lassen sich dazu folgende Überlegungen anstellen: Zum einen könnte dies ein Indiz für die aufwändigere Angebotserstellung bei der konventionellen Werkzeugfertigung sein. Im Vergleich dazu kann bei den meisten additiven Fertigungsanlagen eine Fertigungszeit- und Kostenkalkulation, auf Basis der eingesendeten CAD-Daten, in wenigen Minuten durch die eingesetzte Software erstellt werden. Dafür spricht auch, dass auf die Anfrage für die spanende Fertigung eine höhere Zahl an Rückfragen zu den Fertigungsdetails eingingen. Zum anderen könnten hier aber auch die Verfügbarkeit von Fertigungskapazitäten oder andere Umstände einen Einfluss gehabt haben.

Angebotszeit: Die Dauer für den Erhalt eines Angebotes für die Herstellung in konventionellen Fertigungsverfahren lag in dieser Studie im Schnitt bei rund 3,8 Arbeitstagen. Mit durchschnittlich rund ein bis zwei Arbeitstagen lagen die Angebote zur additiven und HSC Fertigung somit gut zwei Arbeitstage früher vor.

Lieferzeit: Die von den Lieferanten angegebenen Lieferzeiten für die CNC- und HSC-Formeinsätze lagen durchschnittlich bei ca. 15,6 bzw. 17,2 Arbeitstagen. Für die additive Herstellung wurde eine Lieferung nach ca. 9,1 Arbeitstagen im Mittel angegeben. Jedoch bieten viele Dienstleister auch eine Option zur Expresslieferung gegen Aufpreis an. Diese Option wurde in der Studie nicht berücksichtigt, um den Preisvergleich nicht zu verfälschen. In Summe über den gesamten Beschaffungsprozess ergibt sich für das Additive Tooling eine Gesamtzeit von 11 Arbeitstagen. Gegenüber der CNC-Fertigung besteht somit das Potential, die Zeit zwischen Anfrage und Erhalt der Formeinsätze um durchschnittlich 43 % zu verkürzen (siehe Bild 4). Zudem verkürzt sich bei der additiven Fertigung auch der zeitliche Aufwand vor der Anfrage, da lediglich CAD-Daten benötigt werden und somit die Erstellung einer technischen Fertigungszeichnung entfällt.

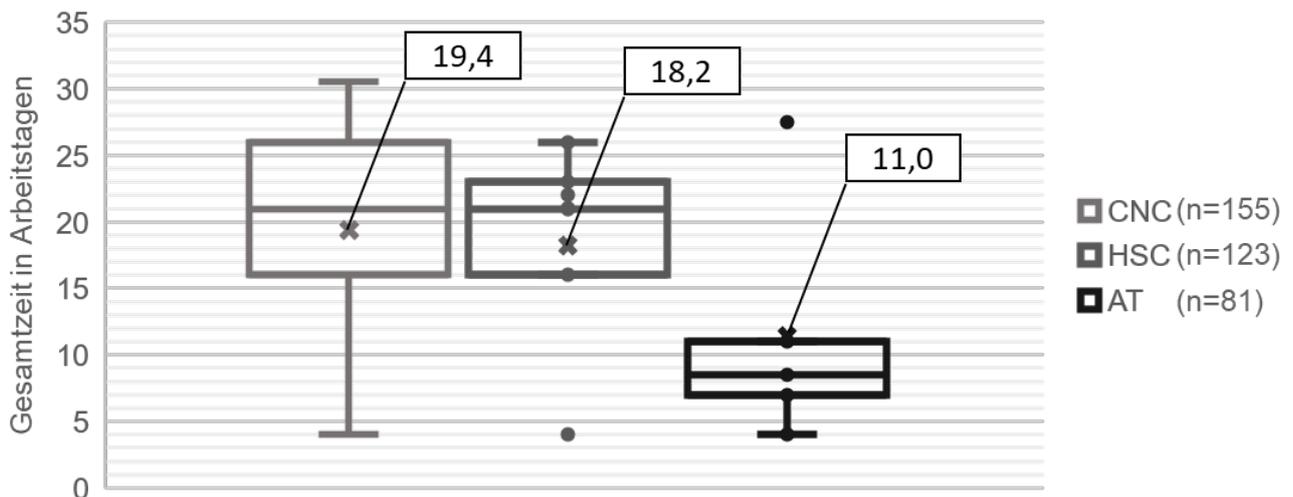


Bild 4: Gesamtzeit von Anfrage bis Lieferung (im Schnitt und über alle Formeinsatzvarianten)

Angebotspreis: Generell waren die erhaltenen Angebote selbst innerhalb einer Technologieklasse von einer starken preislichen Varianz gekennzeichnet. Verglichen wurden die Nettopreise für Formeinsatzpaare aus Auswerfer- und Düsenseite. Für das Additive Tooling im PolyJet-Verfahren stellte sich vor allem die Formeinsatzgröße als wesentlicher Preistreiber heraus. Während in der Formhälftengröße 1 der günstigste Preis noch beim Additive Tooling abgegeben wurde, folgten in den anderen Größen die günstigsten Preise für die HSC-Fertigung (mit Pfeil markiert, siehe Bild 5).

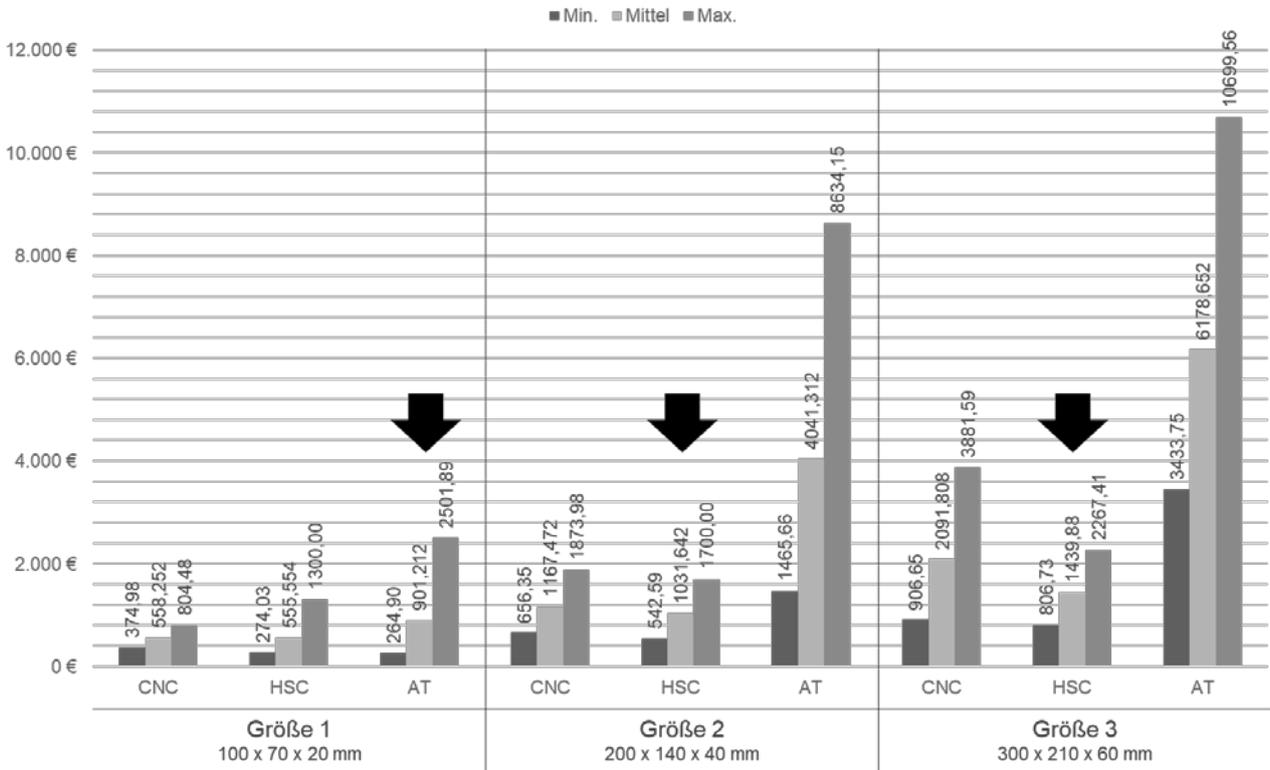


Bild 5: Preisvergleich der Fertigungstechnologien am Beispiel der Formeinsätze vom Typ „Eiskratzer“

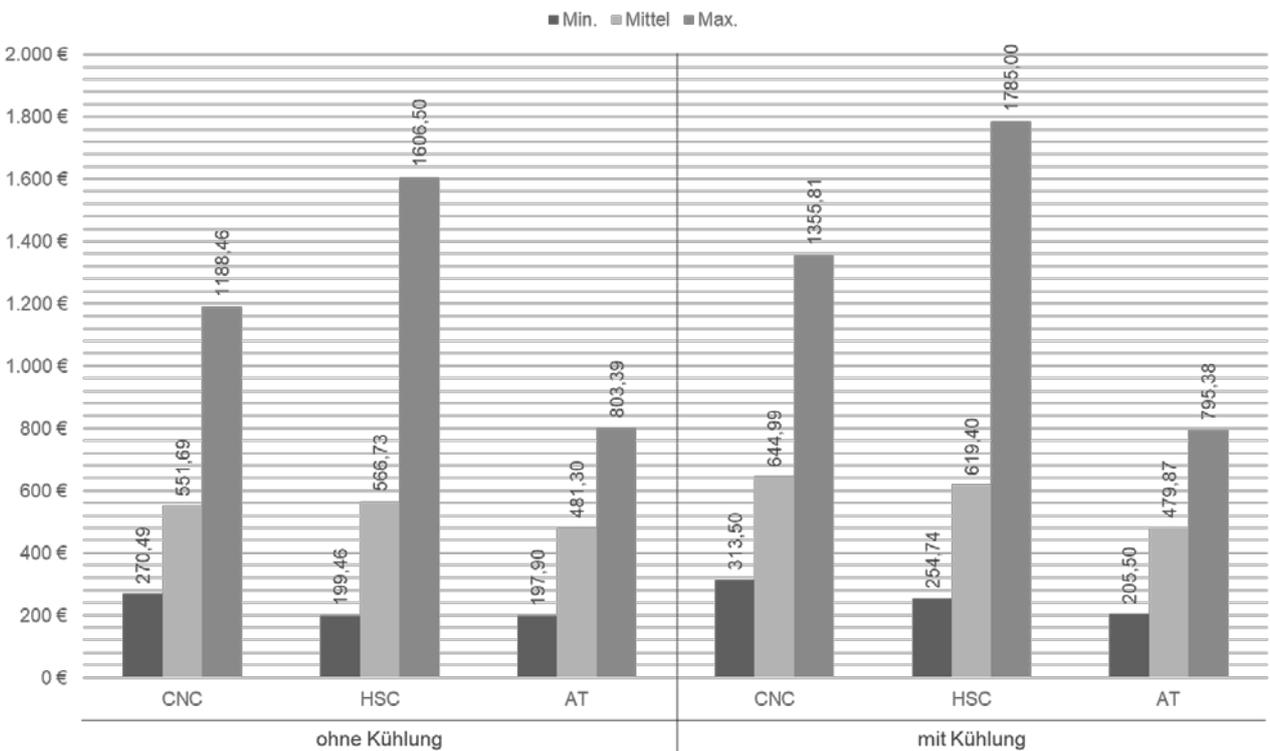


Bild 6: Preisvergleich der Einsätze vom Typ „Zugprobe“ in der Größe 100x70x30 mm

Im Fall der Zugprobe-Formeinsätze wurde zudem erkannt, dass Formeinsätze mit Kühlung bei konventionellen Fertigungsverfahren teurer waren, als ohne Kühlung. Dagegen lagen die Kosten für Formeinsätze mit Kühlung beim additiven Fertigungsverfahren fast gleich wie die Formeinsätze ohne Kühlung (siehe Bild 6).

Auf Basis des Vergleichs der Minimal- und Mittelwerte erfolgte eine Punktevergabe um die Verfahren in ein Profil einordnen zu können. Nach Punktebewertung des Kostenvergleichs ergibt sich mit der Bewertung „1 = am teuersten“ und „3 = am günstigsten“ Tabelle 1:

Tabelle 1: Bewertung der Angebotspreise nach Punkten

	CNC	HSC	AT
Größe 1	1	2	3
Größe 2	2	3	1
Größe 3	2	3	1

5 Technische Bewertung

Um ein Profil über die drei verglichenen Verfahren erstellen zu können, wurden auf Basis einer Literaturrecherche typische Charakteristika für die Merkmale Oberflächenqualität, Zykluszeit und Standzeit ermittelt und Verfahrensweise miteinander verglichen. Da die grundlegenden Eigenschaften in den genannten Merkmalen der verglichenen Verfahren bereits allgemein bekannt sind, wird an dieser Stelle nur kurz auf die Bewertung eingegangen. Es sei darauf hingewiesen, dass die Bewertung der Merkmale in bestimmten Fällen von der hier vorgenommenen abweichen kann.

Oberflächenqualität: Für das Merkmal der Oberflächenqualität wird das HSC-Verfahren am besten bewertet. Aufgrund der geringen Schnitttiefe werden hier bessere Oberflächengüten als beim klassischen CNC-Verfahren erreicht (ohne weitere Nacharbeit). Aufgrund des sogenannten „Treppenstufeneffektes“, bedingt durch die schichtbauweise additiver Verfahren, erhält das AT hier die schlechteste Bewertung [3].

Zykluszeit: Aufgrund der um das Vielfache besseren Wärmeleitfähigkeit von Aluminium gegenüber Werkzeugstahl und der damit reduzierten Zykluszeit [11] wird auch hier die beste Bewertung für das HSC-Verfahren vergeben (der Einfluss spezieller Kühlungssysteme

wurde hier nicht berücksichtigt). Die Acryl-Werkzeuge des AT hingegen besitzen eine sehr schlechte Wärmeleitfähigkeit und somit die längsten Zykluszeiten [12].

Standzeit: Hier besitzen Werkzeuge aus Stahl das höchste Potential mit Stückzahlen im Millionenbereich gefolgt von den weicheren Aluminium Werkzeugen. Die erreichbaren Stückzahlen der AT-Werkzeuge aus Acryl hängen sehr stark vom eingespritzten Kunststoff und den verwendeten Prozessparametern ab, liegen aber in der Regel unter 1.000 Stück [6, 9]. Aus dieser Beurteilung ergibt sich mit der Bewertung „1 = am schlechtesten“ und „3 = am besten“ Tabelle 2:

Tabelle 2: Bewertung der technischen Merkmale nach Punkten

	CNC	HSC	AT
Oberflächenqualität	2	3	1
Zykluszeit	2	3	1
Standzeit	3	2	1

6 Gegenüberstellung der Verfahrensprofile

Anhand der Vergleiche zwischen dem CNC-, HSC- und PolyJet-Fertigungsverfahren ergaben sich Bewertungen über technische und wirtschaftliche Merkmale. Wie aus Bild 7 ersichtlich wird, verhält sich das additive PolyJet Verfahren besonders gegenüber der klassischen CNC-Fertigung recht komplementär.

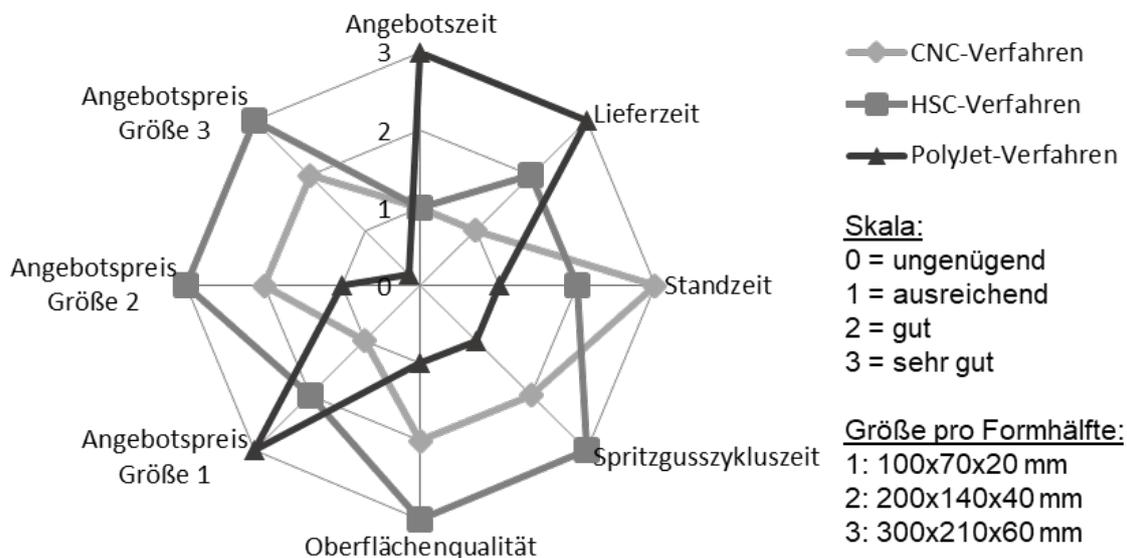


Bild 7: Profil der Verfahren nach technischen und wirtschaftlichen Merkmalen

7 Fazit

Die Recherchen zu den technischen Eigenschaften zeigten, dass konventionell hergestellte Formeinsätze aus Metall nach wie vor bessere technische Eigenschaften aufweisen und unter diesen Aspekten auch zu bevorzugen sind. Im Vergleich dazu haben die Ergebnisse der Beschaffungsstudie allerdings gezeigt, dass bei den additiven Fertigungsverfahren eine schnellere Angebotsprozess- und eine kürzere Lieferzeit vorliegen. Für die Validierung in der Produktentwicklung werden in der Regel nur geringere Stückzahlen benötigt, jedoch könnten durch Änderungen im Produktdesign eine neue Formeinsatzerstellung nötig werden. Daher werden die Standzeit und Zykluszeit in diesem Anwendungsfall als weniger ausschlaggebend betrachtet, als die Zeit bis zum Erhalt validierbarer Prototypen. Die Ergebnisse der durchgeführten Studie legen deshalb nahe, dass der Einsatz des Additive Tooling durchaus eine Verbesserung der Effizienz und Agilität des Produktentwicklungsprozesses ermöglicht, wenn es um die (agile) Prototypenherstellung von Spritzgussbauteilen geht.

8 Ausblick

Um eine agile Bereitstellung von Prototypen im PEP unter anwenderorientierten Gesichtspunkten zu erleichtern, soll das Verfahrensprofil in Zukunft weiter verfeinert und spezifiziert werden. Neben einer feinmaschigeren Untergliederung der Merkmale soll eine Gewichtung nach den Anforderungen der Produktentwicklung erfolgen. In dieser Studie wurde auch erkannt, dass die additiven Verfahren ab einer bestimmten Größe preislich nicht mehr konkurrenzfähig sind. Weitere Untersuchungen sollen deshalb speziell auf kleinere Formeinsatzgrößen abzielen. In den kommenden Jahren werden weitere Fortschritte in der additiven Fertigungstechnik erwartet, weshalb auch das Additive Tooling weiter an Einfluss gewinnen dürfte. Um die Vorteile des Additive Tooling für Produktentwickler zugänglich zu machen, wird auch an einer anwenderorientierten Methodik gearbeitet, welche einen situationsspezifischen und agilen Einsatz der AT-Werkzeuge unterstützt.

Literatur

- [1] A. Albers, M. Behrendt, S. Klingler und K. Matros, „Verifikation und Validierung im Produktentstehungsprozess“ in Handbuch Produktentwicklung, U. Lindemann, Hg., München: Hanser, 2016, S. 541–569, doi: 10.3139/9783446445819.019.

- [2] A. Albers, S. Rapp, C. Birk und N. Bursac, „Die Frühe Phase der PGE – Produktgenerationsentwicklung“ in Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung 2017.
- [3] A. Gebhardt, J. Kessler und L. Thurn, 3D printing: Understanding additive manufacturing, 2. Aufl. Munich, Cincinnati: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2019. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.hanser-elibrary.com/doi/book/10.3139/9781569907030>
- [4] A. Kampker, R. Förstmann, M. Ordnung und A. Haunreiter, „Prototypen im agilen Entwicklungsmanagement“, ATZ Automobiltech Z, Jg. 118, 7-8, S. 72–77, 2016, doi: 10.1007/s35148-016-0065-6.
- [5] A. Albers et al., „Eine Systematik zur situationsadäquaten Mechatroniksystementwicklung durch ASD - Agile Systems Design“. KIT SCIENTIFIC WORKING PAPERS 113, Karlsruher Institut für Technologie (KIT); IPEK – Institut für Produktentwicklung, 2019.
- [6] A. Kampker, J. Triebs, B. Alves, S. Kawollek und P. Ayvaz, „Potential analysis of additive manufacturing technologies for fabrication of polymer tools for injection moulding – A comparative study“ in 2018 IEEE International Conference on Advanced Manufacturing (ICAM), 2018, S. 49–52.
- [7] Stratasys Mold Tooling Solutions Team, „Precision Prototyping: The role of 3d printed molds in the injection molding industry“, 2017. [Online]. Verfügbar unter: Stratasys.com.
- [8] Thorsten Brorson Otte, Grundfos A/S, and Stratasys, Choosing the Right Material for Injection Molds. An evaluation of various 3d printing techniques. (WP_PJ_Grundfos_EN_0815). USA, 2015.
- [9] A. Kampker und P. H. Z. Ayvaz, „Direct Polymer Additive Tooling : Polymerwerkzeuge für das Spritzgießen von Kleinserien“, PLASTVERARBEITER, S. 44, 06/18, REPORT NUMBER: RWTH-2018-226315. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.plastverarbeiter.de/76447/>
- [10] A. Gebhardt, Understanding additive manufacturing: Rapid prototyping, rapid tooling, rapid manufacturing. München: Hanser, 2011. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.hanser-elibrary.com/action/showBook?doi=10.3139/9783446431621>
- [11] T. Droste, „Werkstoffe im Spritzgießwerkzeugbau: Aluminium oder Stahl?“, PLASTVERARBEITER, Jg. 52, Nr. 11, S. 42–44, 2001. [Online]. Verfügbar unter: https://www.plastverarbeiter.de/wp-content/uploads/migrated/docs/442_28129.pdf
- [12] T. Tábi et al., „Comparison of thermal, mechanical and thermomechanical properties of poly(lactic acid) injection-molded into epoxy-based Rapid Prototyped (PolyJet) and conventional steel mold“, J Therm Anal Calorim, Jg. 123, Nr. 1, S. 349–361, 2016, doi: 10.1007/s10973-015-4997-y.

Akustische Qualifizierung von neuartigen Verbundwerkstoffen auf Basis von stärkehaltigen Granulaten

**Raphael Rehmet (1), Armin Lohrengel (1), Florian Freundt (2),
Alireza Kharazipour (2)**

(1) Fritz-Süchting-Institut für Maschinenwesen der Technischen Universität Clausthal

Robert-Koch-Str. 32, 38678 Clausthal-Zellerfeld

E-Mail: rehmet@imw.tu-clausthal.de; Internet: <https://www.imw.tu-clausthal.de>

(2) BÜSGEN-Institut der Georg-August-Universität Göttingen

Büsgenweg 2, 37077 Göttingen

***Inhalt:** Ziel des Forschungsvorhabens ist die Entwicklung eines möglichst gut auf das Anwendungsfeld angepassten Schallabsorbers. Das Projekt sieht die Entwicklung eines Verbundwerkstoffs auf Basis von stärkehaltigen Granulaten seitens des BÜSGEN-Instituts der Georg-August-Universität Göttingen vor. Dieser Verbundwerkstoff besteht aus einer festen Materialmatrix mit Lufteinschlüssen. Die Materialentwicklung basiert auf einem stärkehaltigen Grundwerkstoff, der durch verfahrenstechnische Abfolgen expandiert wird. Dabei sind Kenngrößen wie die Größe der Luftzwischenräume oder die Durchmesser der Materialmatrix-Komponenten über Fertigungsparameter wie die Dichte sehr gut anpassbar. Auch die Steifigkeit der Materialmatrix selbst kann beeinflusst werden. Diese Eigenschaften können genutzt werden, um Absorber für einen bestimmten Frequenzgang zu konfigurieren. Innerhalb des geförderten Vorhabens wird an der TU Clausthal zum einen ein experimenteller Nachweis der Tauglichkeit als Absorber geführt. Zum anderen wird ein Modell entwickelt, welches die Vorhersage des akustischen Verhaltens ermöglicht. Um ein möglichst breitbandiges Absorptionsspektrum zu erzeugen, werden neben verschiedenen Absorberkonzepten wie Lochflächenabsorber auch Materialkombinationen mit unterschiedlichen physikalischen und geometrischen Eigenschaften erzeugt.*

Stichwörter: Verbundwerkstoffe, Akustik, Absorber

Acoustic qualification of novel composite materials based on granulates containing starch

***Abstract:** The aim of this research project is to develop a sound absorbing material from starch-based granules. The material consists of a rigid matrix which is saturated with air. By changing the parameters of production, the geometry of the pores can be changed easily. The stiffness of the material itself can be changed with the help of the grade of compression. Those properties can be used to generate a sound absorber with predictable absorbing capacity.*

***Keywords:** composite materials, acoustic absorbers*

1 Einleitung

Schallabsorbierende Produkte im Büroumfeld können helfen, die Produktivität in Großraumbüros zu verbessern. In diesem Umfeld werden oft Standelemente oder solche, die am Schreibtisch angeschraubt werden, verwendet. Diese Produkte basieren im Allgemeinen auf einem plattenförmigen Werkstoff, der je nach Biegestabilität mit einem Holz- oder Aluminiumrahmen versehen wird und anschließend mit einer Stoffbahn bespannt wird. Übliche schallabsorbierende Materialien, zum Beispiel Melaminharzschäume, Polyurethanschäume oder Polyesterwolle basieren auf chemischen Verbindungen, die auch als fossile Brennstoffe genutzt werden. Aufgrund der Vermeidung von schwer recyclebaren Werkstoffen und der Nutzung von nachwachsenden Rohstoffen bieten die hier angesprochenen innovativen Absorberprodukte einen klaren Markt- und Umweltvorteil. [3], [4]

Im Rahmen eines Kooperations-Forschungsprojektes mit der Georg-August-Universität Göttingen wird die Eignung, der Verbundwerkstoffe auf Basis von stärkehaltigen Granulaten, als Ersatz für obengenannte Absorber, untersucht. Dabei gliedert sich die Arbeit in drei Aufgabengebiete: Die Materialentwicklung wird durch die Universität Göttingen bearbeitet. Der Anteil der Produktentwicklung wird durch einen Industriepartner bearbeitet, der Anteil der akustischen Modellbildung durch die Technische Universität Clausthal.

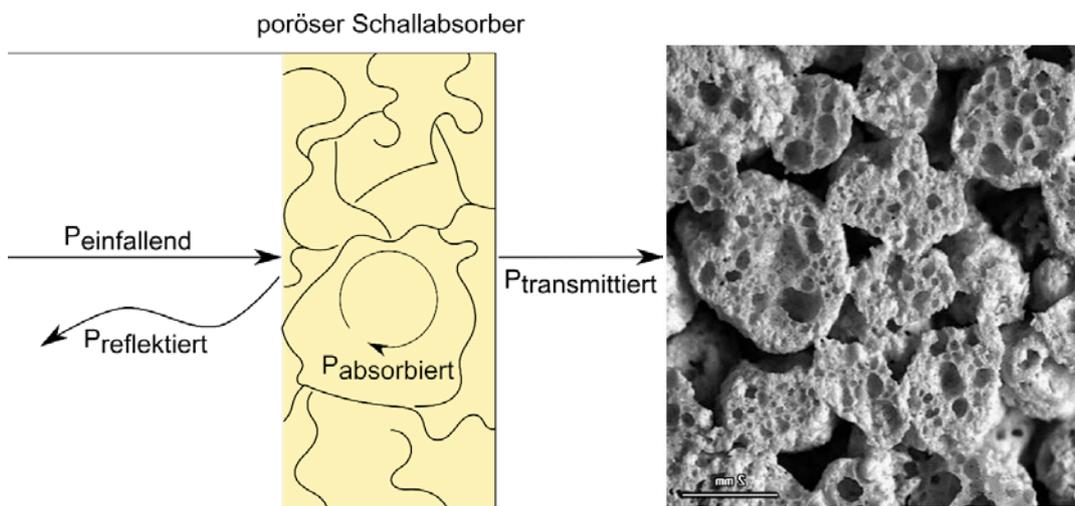


Abbildung 1: (l): Prinzipskizze eines Porösabsorbers mit relevanten Schalleistungsgrößen, (r): Mikroskopische Aufnahme eines Schallabsorbers [1]

Mit diesem Absorbermaterial besteht die Möglichkeit, eine Festkörpermatrix herzustellen, die zwischen den einzelnen Festkörperelementen auch Luftvolumina als Einschlüsse

erzeugt. In diesen Luftvolumina sowie in der Materialstruktur kann wie in Abbildung 1 dargestellt Schall absorbiert werden. Das styroporähnliche Material eignet sich daher als poröser Absorber. Das Material bringt die günstige Eigenschaft mit, dass die Dichte und damit auch das Verhältnis von Luft zu Festkörper gut einstellbar sind. Von diesem Punkt ausgehend wird in dem Projekt der Fragestellung nachgegangen, in wie weit ein modularer Aufbau von derartigen Absorbern wirksam ist, wie dieser auszugestaltet ist, und ob ein anwendungsoptimierter Absorbere Aufbau vorausgesagt werden kann.

2 Theoretische Grundlagen und Messaufbau

Um schallabsorbierende Materialien zu qualifizieren, muss zunächst auf den spezifischen Anwendungsfall eingegangen werden. Handelt es sich um Schallabsorber im Büroumfeld, ist die Norm EN ISO 11654 für die Bewertung der Schallabsorption maßgeblich. Wie in Abbildung 2 dargestellt, werden die Schallpegel in den Frequenzbereichen zwischen 500 und 2000 Hz mit einem Gewichtungswert von 1 besonders stark gewichtet. In diesem Bereich ist das menschliche Gehör besonders empfindlich.

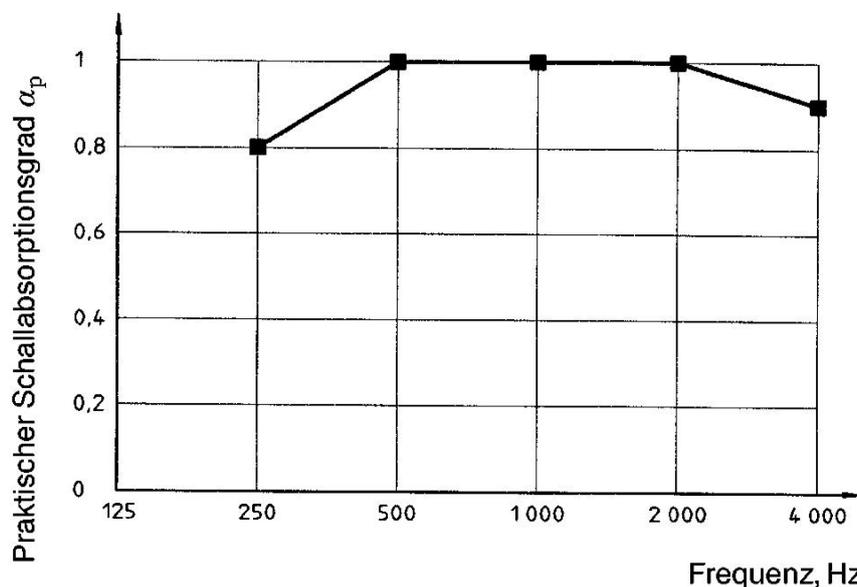


Abbildung 2: Bewertungskurve für die Wirksamkeit von Schallabsorbermaterialien [2]

Die Absorptionskurve eines für diesen Anwendungsfall optimierten Absorbers gleicht der oben dargestellten Kurve. Reale Absorber weisen Absorptionswerte kleiner 1 auf, besonders im Frequenzbereich unter 1000 Hz flacht die Kurve bei vielen Materialien ab.

2.1 Mechanismen der Schallabsorption

Die Herausforderung für Absorber im Bereich der Raumakustik liegen insbesondere im Frequenzbereich unterhalb von 1000 Hz, da oft neben dem Anspruch auf einen hohen Absorptionsgrad auch ein optisches oder konstruktives Interesse besteht, dass die Abmessungen eines Absorbers beschränkt.

Um eine wirksame Absorption von über 80% in tieferen Frequenzbereichen unterhalb von 1 kHz zu ermöglichen, wird in [5] für poröse Absorber eine Dicke des Absorbers von mindestens 50 mm empfohlen. Dieser Empfehlung liegt das Vorhandensein von schwingender Masse zu Grunde, das durch die Vergrößerung der Länge des Absorbers realisiert wird.

Die Kombination aus hoher Masse bei gleichzeitig kleinen Abmessungen des Absorbers stellt daher einen Zielkonflikt dar, da zum einen eine breitbandige akustische Wirksamkeit gefordert wird, zum anderen der Absorber aber nicht beliebig dick sein darf.

In [1] wird für den Zusammenhang zwischen der Dicke eines porösen oder faserigen Schallabsorbers und dem Absorptionsgrad eine Frequenzabhängigkeit angegeben, diese ist in Abbildung 3 dargestellt.

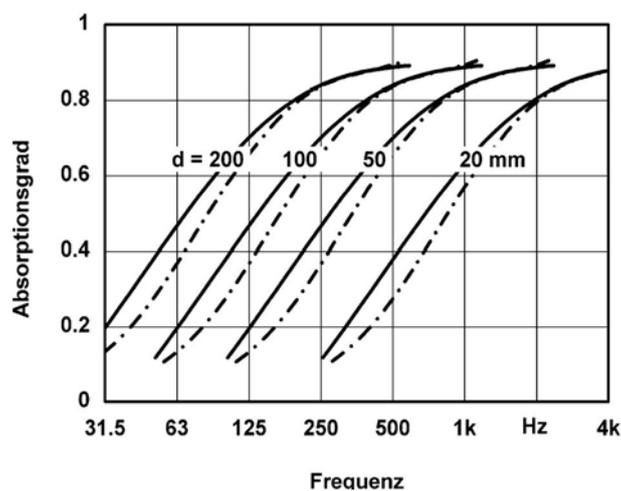


Abbildung 3: Absorptionsgrad α für faserige und poröse Absorber bei senkrechtem(-.) bzw. diffusem Schalleinfall (-) [1]

Weiterhin wird angegeben, dass eine zusätzliche, gut abgestimmte Lochfläche in Kombination mit einem schallabsorbierenden Material auch bei kleineren Absorberdicken den Grad der Schallabsorption erhöhen kann. In Abbildung 4 sind Messergebnisse dargestellt, die den Einfluss von Lochflächenabsorbern zeigen.

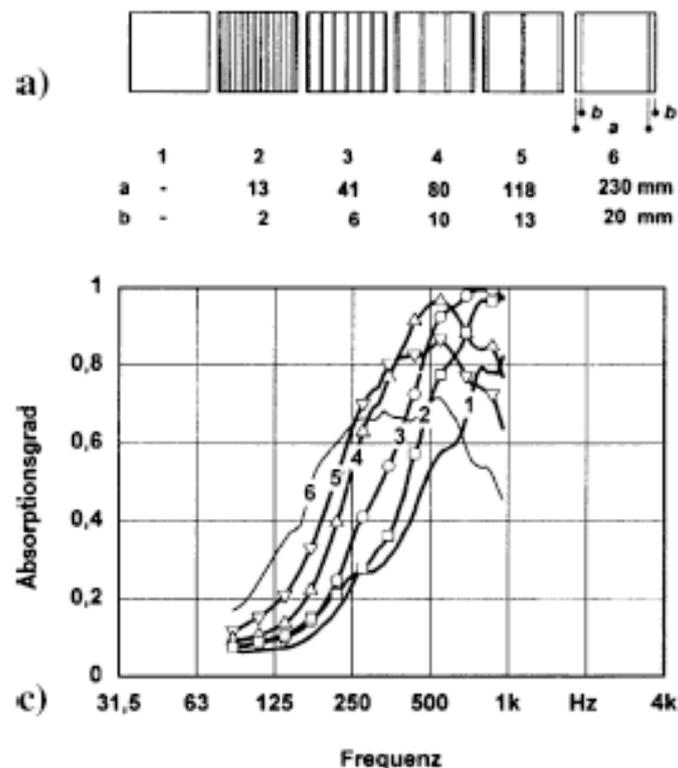


Abbildung 4: Zusammenhang der Geometrie einer Lochfläche mit dem Absorptionsgrad nach [1]

Lochflächenabsorber zeichnen sich durch eine erhöhte Oberflächenporosität durch eingebrachte Bohrungen in der dem Schall zugewandten Oberfläche aus. Die Abbildung legt nahe, dass durch den zielgerichteten Einsatz von Lochflächenabsorbern der Anwendungsbereich hinsichtlich der Frequenz gesenkt werden kann.

Während für den Frequenzbereich bis 1kHz vor allem die Geometrie des gesamten Absorbers verantwortlich ist, kommt oberhalb dieser Frequenz die Struktur des Materials zum Tragen. Besonders wichtige Einflussgrößen für eine wirksame Absorption in diesem Bereich sind:

- Strömungswiderstand σ :
Der Strömungswiderstand wird nach Norm DIN EN ISO 9053-1 durch den Druckverlust einer Strömung durch eine Schicht beschrieben. Weiterhin ist er abhängig von der durchströmten Fläche, dem Volumenstrom des Fluids und der Schichtdicke.
- Grad der offenen Porosität ϕ :

Mit diesem dimensionslosen Parameter wird das Verhältnis zwischen dem Luftvolumen im gesamten Absorber zum Gesamtvolumen beschrieben. Der Wert für ϕ liegt zwischen 0 und 1, wobei 1 für ein reines Luftvolumen ohne Festkörperstruktur steht, 0 entsprechend für einen Festkörper ohne Lufteinschlüsse.

Der Stand der Technik legt nahe, dass es konträre Ziele in der Herstellung von Absorbern gibt. Gleichzeitig bieten die abgegrenzten Funktionalitäten auch die Möglichkeit, Absorber mithilfe eines Baukastensystems zusammenzustellen

2.2 Vorgehensweise zum experimentellen Nachweis der Wirksamkeit als Absorber

Zur akustischen Erstqualifizierung des Werkstoffs kommt ein Impedanzrohr nach EN ISO 10534-2 zum Einsatz. Dieser Prüfaufbau besteht aus einem metallischen Rohr, dessen Wandstärke ausreichend ist, um im akustisch relevanten Bereich als „schallhart“ verstanden zu werden. An einem Ende des Rohrs befindet sich ein Breitbandlautsprecher, der ein definiertes Testsignal erzeugt. An der anderen Seite des Rohres wird ein kreisrunder Prüfling eingespannt. In der Mitte des Rohres sind zwei Druckmikrofone platziert, die in bekanntem Abstand den Schalldruck messen. Dieser breitet sich im Rohr als Druckfeld aus, das durch die räumliche Beschränkung als ebenes Druckfeld angenommen wird. Die Umgebungstemperatur wird protokolliert. Der Aufbau ist in Abbildung 5 schematisch dargestellt.

Weiterhin sind in der Abbildung 5 Schalldrücke in Abhängigkeit von der Position dargestellt. Der einfallende und der von der Probe reflektierte oder ausfallende Druck sind theoretische Größen. Gemessen wird an den Stellen x_1 und x_2 nur der überlagerte Druck.

Eine weitere Vereinfachung in der Abbildung stellt die Druckwelle dar. Im realen Messaufbau ist diese Welle zum einen ein dreidimensionales Druckfeld, zum anderen wird im Versuch nicht eine festgelegte Frequenz geprüft, sondern aufgrund eines Testsignals ein Spektrum durch den Lautsprecher erzeugt.

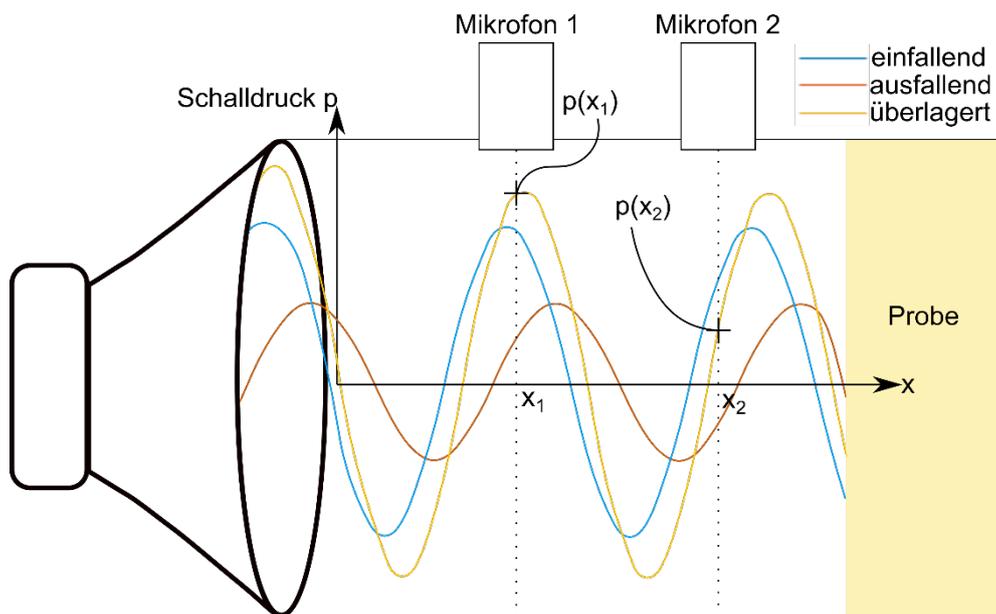


Abbildung 5: Darstellung des Versuchsaufbaus

Da die Schallgeschwindigkeit in einem Medium in Abhängigkeit der Temperatur leicht berechnet werden kann, wird die theoretische Ausbreitung des einfallenden Druckfeldes bestimmt. Für die gemessenen, zusammengesetzten Drücke ergibt sich in Abhängigkeit der Position x der folgende, komplexe Ausdruck, siehe Formel (1).

$$\underline{p}(x) = \underline{p}_e(x) + \underline{p}_a(x) \quad (1)$$

mit: $\underline{p}(x)$ – komplexwertiger Schalldruck an der Stelle x
 $\underline{p}_e(x)$ – einfallender Schalldruck erzeugt durch Lautsprecher, an der Stelle x
 $\underline{p}_a(x)$ – durch Probe reflektierter Schalldruck an der Stelle x

Aus der angegebenen Gleichung ist ersichtlich, dass auch das ausfallende Druckfeld berechnet werden kann, wenn $\underline{p}(x)$ gemessen und $\underline{p}_e(x)$ als Testsignal vorgegeben werden. Letztlich kann aus den gemessenen und berechneten Daten eine Energiebilanz an der Grenzfläche der Probe ausgeführt werden. Dabei wird in Formel (2) der einfallenden Schallenergie die Summe der Anteile von reflektierter, absorbierter und transmittierter Schallenergie gleichgesetzt.

$$P_e = P_{ref} + P_{abs} + P_{tra} \quad (2)$$

$$P_e = P_e \cdot (r + \alpha + \tau) \quad (3)$$

$$1 = r + \alpha + \tau \quad (4)$$

mit: P_e – auf die Probe einfallende Schallleistung
 P_{ref} – von der Probe reflektierte Schallleistung
 P_{abs} – durch die Probe absorbierte Schallleistung

P_{tra} – transmittierte Schalleistung
 r – Anteil der reflektierten Schalleistung
 α – Anteil der absorbierten Schalleistung
 τ – Anteil der transmittierten Schalleistung

Der zu ermittelnde Kennwert der Schallabsorption α kann unter der Annahme, dass der Anteil der transmittierten Leistung vernachlässigbar klein ist, aus Formel (4) aus der reflektierten Schalleistung berechnet werden.

$$\alpha = f [(\underline{p}(x_1), \underline{p}(x_2), T)] \quad (5)$$

mit: T – Umgebungstemperatur

Dabei ist ein möglichst hoher Absorptionskoeffizient α das Ziel der Untersuchungen.

2.3 Ansätze zur Simulation

Mithilfe von FEM-Simulationen wird das akustische Verhalten des Absorbers vorhergesagt. Als Grundlage für die Berechnung des Schallfeldes im Absorbermaterial werden mathematische Modelle genutzt, die auf den Studien von Johnson, Champoux und Allard basieren. Das damit beschriebene Verschiebungs- und Druckfeld kann genutzt werden, um die in Abschnitt 2 beschriebenen Parameter zu bestimmen.

Das genannte mathematische Modell bildet die Grundlage für eine Reihe von Anpassungen an die Materialien und ihre strukturellen Eigenschaften. Jenen Modellen, die auf den Ansätzen von Johnson, Champoux und Allard basieren, ist gemein, dass sie für den Fall des porösen Absorbers genutzt werden können. In dem ursprünglichen Ansatz werden strömungsrelevante Kenngrößen, wie der Strömungswiderstand aber auch die Porosität aber auch die Porengeometrie berücksichtigt. Durch den Parameter „thermisch-charakteristische Länge“ wird auch der Wärmeaustausch zwischen Fluidschichten berücksichtigt. Die genannten Größen sind jeweils Konstanten und besitzen daher keine Frequenzabhängigkeit. [6], [7]

Das Modell wurde unter anderem durch Lafarge erweitert, der die Möglichkeit der thermischen Durchlässigkeit des absorbierenden Festkörpers ergänzte. Es berücksichtigt unter Nutzung eines weiteren Parameters, der von dem absorbierenden Material und des umgebenen Fluids abhängig ist. [8]

Pride ergänzte das Modell um die Erweiterung im Bereich der Strömungsmechanik, die sich mit der unten beschriebenen Turtosität, also dem Grad der Verschlungenheit der Transportwege beschäftigt. Dieses Modell geht davon aus, dass der Wert für die Turtosität eine Frequenzabhängigkeit besitzt. [9]

Es existieren auch Ansätze für die Berechnung in faserigen Materialien, an der Stelle seien Delany und Bazley genannt. [10]

3 Anwendung der generierten experimentellen Daten: Fertigungsempfehlung, Baukasteneignung

Die aus den Experimenten gewonnene Erkenntnisse können in einem gemeinsamen Konstruktionskatalog zusammengefügt werden, sodass eine empirisch-basierte Empfehlung für eine Absorptionskonfiguration möglich ist.

Aus den experimentell ermittelten Absorptionskurven lassen sich Fertigungsempfehlungen ableiten. Mithilfe des Zusammenhangs zwischen der Rohdichte des Materials vor Verdichtung und der Porosität werden besonders wirksame Absorber herausgearbeitet.

Für die tieferen Frequenzen wird durch die Erhöhung des Flächengewichts eine Steigerung der Rohdichte oder eine Verlängerung der Absorptionsstrecke empfohlen. Dies kann durch eine größere Absorber-Dicke erreicht werden.

Für den Bereich der höherfrequenten Schwingungen wird eine makroskopisch sichtbare Porosität empfohlen. Durch Variation der Porosität kann der Strömungswiderstand des Materials beeinflusst werden, dessen Wertebereich in der Literatur angegeben wird.

Eine Kombination von einem Absorber mit hoher Porosität in der vorderen Lage, also der Schallquelle zugewandt, und einem Absorber mit höherem Flächengewicht in der hinteren Lage ist nach ersten Erkenntnissen vielversprechend. Ein qualitatives Ergebnis ist in Abbildung 6 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass das vorteilhafte Absorptionsverhalten der Platte mit einer höheren Dichte und entsprechend kleiner Porosität im Bereich von 200 Hz bis 1500 Hz auch in dieser Sandwichplatte nachgewiesen werden kann. Die Stärken der Platte mit einer höheren Porosität zeigen sich im Frequenzbereich zwischen 1500 Hz bis 2500 Hz. Dieser Effekt, der durch die Hohlräume an der Oberfläche hervorgerufen wird, zeigt sich auch in den Messdaten der Sandwich-Platte. Die Hohlräume resultieren aus der höheren Porosität des Materials.

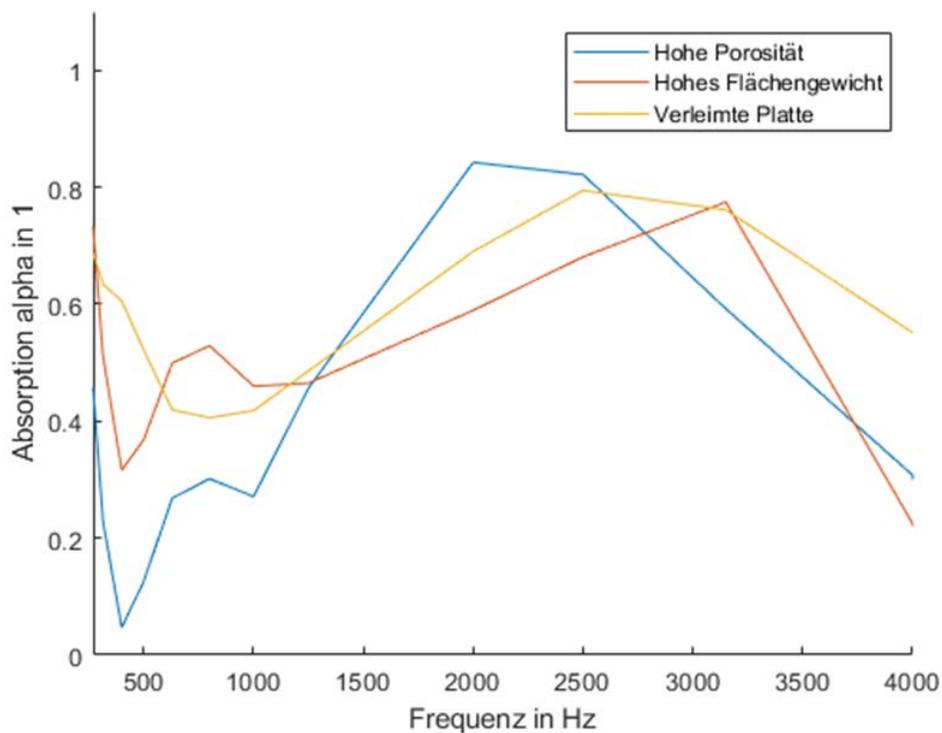


Abbildung 6: Vergleich von Absorptionsgraden verschiedener Proben.

Die bisher ermittelten Ergebnisse weisen auf eine Eignung des Werkstoffs als Schallabsorber und eine gute Anpassbarkeit hinsichtlich des Frequenzgangs hin. Eine Konstruktionsempfehlung erzeugt Parameter zur Herstellung, die den späteren Anwendungszweck und die maßgeblichen Absorptionsbereiche berücksichtigen

4 Ausblick

Der Versuchsplan sieht weitere experimentelle Untersuchungen an Platten, die mit unterschiedlichen Parametern hergestellt werden, vor. Die Materialentwicklung sieht vor, alternative Bindemittel zu verwenden, welche qualifiziert werden müssen. Die Parameterentwicklung im Herstellprozess ist noch nicht abgeschlossen.

Weitere Untersuchungen mithilfe von Absorber-Konzepten, wie zum Beispiel Lochflächenabsorber sind vorgesehen. Dabei ist das Ziel, ein gleichwertiges Ersatzprodukt herzustellen, das durch die Umweltverträglichkeit einen Marktvorteil liefert. Ein vielversprechender Ansatz ist auch die Steigerung des Strömungswiderstands durch Bespannung der Platten mit Stoffbahnen.

Das in der Simulation verwendete Modell nach dem Johnson-Champoux-Allard-Modell muss um weitere Parameter erweitert werden, um die Berechnung auf die Festkörpermatrix

des untersuchten Materials anzupassen. In einem erweiterten Ansatz wird unter anderem eine Frequenzabhängigkeit der Tortosität zugrunde gelegt. Da gerade der niederfrequente Bereich für das Anwendungsfeld eines Akustikabsorbers von Interesse ist, wird in die Nutzung des Johnson-Champoux-Allard-Pride-Lafarge-Modells angestrebt.

Durch die Anpassung der Simulation mithilfe genauerer Werte für die Simulationsparameter ist es möglich, in Abhängigkeit der Fertigungsparameter eine Vorhersage über die Schallabsorption beliebiger Platten zu treffen. Auch kombinierte Sandwichplatten sollen durch geeignete Simulationsmodelle dargestellt werden.

Literatur

- [1] Raum-Akustik und Lärminderung; Fuchs, H. V.; Springer Berlin Heidelberg (VDI-Buch); Berlin, Heidelberg; 2017
- [2] Norm EN ISO 11654: Schallabsorber für die Anwendung in Gebäuden; Beuth-Verlag; Berlin; 1997
- [3] Bauphysik-Kalender 2017: Schwerpunkt: Gebäudehülle und Fassaden (Deutsch); Nabil A. Fouad; Ernst & Sohn; Berlin; 2017
- [4] Eintrag zu Harnstoff in Römpf Online; Georg Thieme Verlag; Stuttgart; Abruf 26.05.2020
- [5] Bau und Raumakustik; Fasold W, Sonntag W, Winkler H; Verlag Bauwesen; Berlin; 1987
- [6] Theory of dynamic permeability and tortuosity in fluid-saturated porous media; Johnson, D. L., Koplik, J., Dashen, R.; J. Fluid Mech. (Journal of Fluid Mechanics); 1987
- [7] Dynamic tortuosity and bulk modulus in air-saturated porous media; J.-F. Allard, Y. Champoux; Journal of Applied Physics 70; 1991
- [8] Dynamic compressibility of air in porous structures at audible frequencies; Lafarge, D., Lemarinier, P., Allard, J.-F., Tarnow, V.; Journal of Applied Physics; 1997
- [9] Drag forces of porous-medium acoustics; Pride, S. R., Morgan, F. D., Gangi, A.F.; Phys. Rev. B 47; 1993
- [10] Acoustical properties of fibrous absorbent materials; Delany, M. E., Bazley, E. N.; Applied Acoustics 3; 1970

SMART Standards: Automatisierungsansatz – Methodik zur Wissensrepräsentation durch Graphdatenbanken

Dominik Ehring, André Loibl, Leyao Zhou, Arun Nagarajah

Lehrstuhl für Produktentstehungsprozesse und Datenmanagement

Institut für Produkt Engineering, Universität Duisburg-Essen

Lotharstr. 1, 47057 Duisburg

E-Mail: dominik.ehring@uni-due.de; Internet: <https://www.uni-due.de/pep>

Inhalt: Normen sind – nicht unmittelbar für jeden Menschen sichtbar – allgegenwärtig. Sie beeinflussen nahezu jeden Lebensbereich. Im Kontext der Digitalisierung besitzt die Industrie einen Bedarf an maschinenausführbaren Normen, um autonome und effiziente Prozesse gewährleisten zu können. Ausgehend vom häufig verwendeten Format – PDF – soll ein möglicher Ansatz zur Überführung der Normeninhalte in eine maschinenausführbare Wissensrepräsentation entwickelt werden. Hierbei liegt der Fokus auf der Repräsentation von Formeln und wie diese mittels Graphdatenbanken bereitgestellt werden können. Aufgrund der zukünftigen Bereitstellung von Normen im NISO-STS Format wird dessen Potenzial für die weitere Automatisierung anhand einer Beispielnorm evaluiert.

Stichwörter: SMART Standards, Graphdatenbanken, Maschinenausführbar

SMART Standards: Automation approach - Methodology for knowledge representation by graph databases

Abstract: Standards are omnipresent - not directly visible to everyone. They influence almost every area of life. In the context of digitization, industry has a need for machine-executable standards to ensure autonomous and efficient processes. Starting from the frequently used format - PDF - a possible approach to transform the contents of standards into a machine-executable knowledge representation is to be developed. The focus is on the representation of formulas and how they can be provided by means of graph databases. Due to the future availability of standards in the NISO-STS format, its potential for further automation will be evaluated by means of an example standard.

Keywords: SMART Standards, Graph databases, Machine-executable

1 Einleitung

Das Gesamtsystem Normung wird im Kontext fortschreitender Digitalisierung vor neue Herausforderungen gestellt. Prozesse, nicht nur im Rahmen von Industrie 4.0, sollen zukünftig durch Rechnerunterstützung autonom ablaufen. Eine notwendige Bedingung hierfür ist, dass relevante Informationen aus Normen automatisch entnommen und verarbeitet werden können. Zurzeit kann diese Voraussetzung durch die Normung nicht erfüllt werden. So stehen Normen, welche als Wissensträger in jeder Phase des Produktentstehungsprozesses verwendet werden, als PDF und/ oder in Papierform unterschiedlichen Stakeholdern eines Unternehmens zur Verfügung. Kennzeichnend sind die fehleranfälligen und zeitintensiven Arbeitsschritte, wobei die für den Anwender relevanten Informationen manuell extrahiert und in eine Lösung überführt werden müssen. Demzufolge stellt die Digitalisierung von Normeninhalten einen revolutionären Schritt in Richtung autonom ablaufender Produktions- und Produktentstehungsprozesse dar (vgl. Abb. 1). Es stellt sich die Frage, wie klassifizierte Normeninhalte (vgl. hierzu: [1]), ohne Informationsverlust maschinenausführbar repräsentiert werden können. Hierbei behandelt die vorliegende Publikation zwei Teilziele:

- Teilziel 1: Überprüfung der Eignung von Graphdatenbanken für eine digitale Wissensrepräsentation von Normen
- Teilziel 2: Entwicklung eines Automatisierungsansatzes zur Überführung von Norminhalten in eine maschinenausführbare Form am Beispiel von Formeln

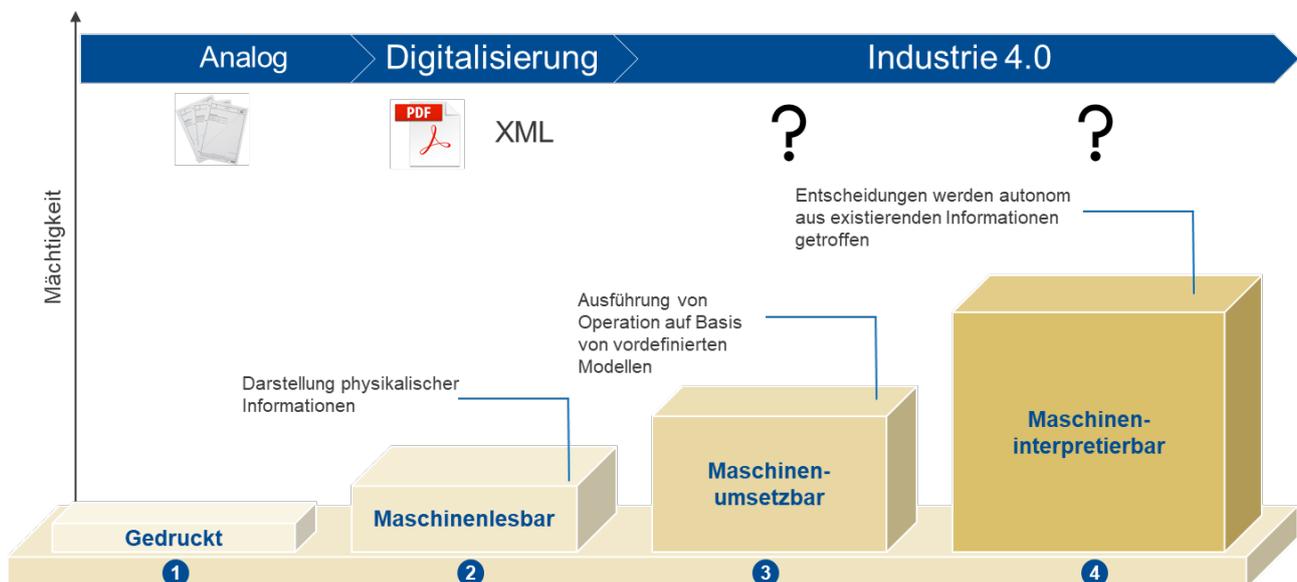


Abb. 1: Digitalisierungsstufen von Normen

2 Stand der Technik

Die heutige Arbeitsweise mit Normen wird durch eine manuelle Sichtung von Dokumenten im PDF-Format oder in Papierform gekennzeichnet, wobei ein Anwender die für ihn relevanten Informationen wie beispielsweise Berechnungsformeln, Bemessungsvariablen oder Toleranzen suchen muss und diese in seinen Prozess überführt. [3] Die händisch extrahierten Informationen werden durch externe Programme und/ oder das Wissen des Anwenders verarbeitet. [1, 4] D. h. in der aktuell gängigsten Form, dem plattformunabhängigen Dateiformat – PDF – ist eine automatische Weiterverarbeitung nicht möglich. [1] Zur Effizienzsteigerung verwenden Unternehmen oftmals programmierte (excelbasierte) Individuallösungen, die keine Durchgängigkeit mit Normeninhalten aufweisen und nur ein sehr begrenztes Anwendungsfeld aufweisen.

Mit dem sogenannten Standards Tag Suite hat die National Information Standards Organization (NISO-STS) ein Regelwerk für einen strukturierten und einheitlichen Aufbau einer XML-basierten Norm entwickelt, wobei das Deutsche Institut für Normung bereits einen Großteil der nationalen Normen ins STS-Format transformiert hat. [6] Das Ziel des STS besteht u. a. darin, durch die Definition von XML-Elementen und Attributen, Norminhalte wie bspw. Volltext sowie Metadaten zu beschreiben und ein übergreifendes Austauschformat für die Industrie zu schaffen. [6]

In einer Studie des BMWi aus dem Jahr 2017 mit dem Titel „Die Rolle der Normung 2030 [...]“ (Projekt Nr. 70/15) wurde ermittelt, dass 47% aller Befragten, Normen in maschinenlesbaren und weiterverarbeitbarer Form fordern. [7] Systeme sollen autonom auf digitalisierte Daten zugreifen können. Hieraus lässt sich der Bedarf nach alternativen Datenformaten ableiten, um Informationen in neutralen Modellierungsnotationen bereitzustellen. Zwar eignet sich XML als Modellierungsnotation, jedoch sind die Inhalte in der aktuell verwendeten Form von XML nicht maschinenausführbar. Aus der heutigen Arbeitsweise mit Normen ist zu konkludieren, dass es ohne großen zusätzlichen Aufwand seitens Dritter nicht möglich scheint Normeninhalte in eine Industrie 4.0 Umgebung zu integrieren. [1]

3 Grundlagen

Zur Lösung des Problems Normeninhalte – ohne Informationsverlust – maschinen- ausführbar zur Verfügung zu stellen, dienen innovative Entwicklungen und deren Adaption aus den Bereichen Finanzwesen, Medizintechnik sowie Produktdatenmanagement. Die hier verwendeten Graphdatenbanken scheinen brauchbare Möglichkeiten zur Wissensrepräsentation und Darstellung komplexer Sachverhalte zu sein, wobei im Rahmen der Publikation die Übertragung auf Normen evaluiert wird. Im Folgenden wird die Vorgehensweise zur Erzeugung eines allgemeinen Wissensgraphen verkürzt präsentiert, wobei zwischen den Schritten Wissensexpression, -modellierung, -extraktion, -fusion, -speicherung und -anwendung differenziert wird (vgl. Abb. 2). [2]

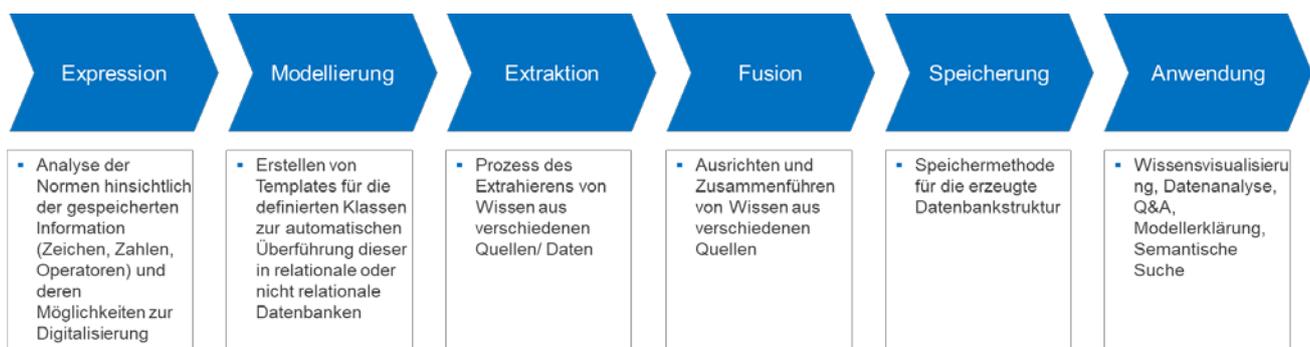


Abb. 2: Aufbaumethodik eines Wissensgraphen

Des Weiteren ist die Informationsextraktion (IE) eine grundlegende Komponente bei der Konstruktion eines Wissensgraphen. Wie der Name implizit andeutet, besteht das Ziel eines IE-Systems darin, nützliche Informationen aus Rohdaten i. d. R. aus unstrukturierten Texten zu extrahieren, wobei zwischen drei Teilfunktionen „Erkennen benannter Entitäten“, „Beziehungsextraktion“ und „Ereignisextraktion“ unterschieden werden kann. [8]

4 Vision

Die Vision von SMART Standards im Bereich des Wissensmanagements und der hier zugrunde liegenden Arbeit besteht darin, von einer rein maschinenlesbaren zu einer maschinenausführbaren, intelligenten Wissensrepräsentation zu gelangen. Normeninhalte sollen in einer Art und Weise modelliert werden können, dass unterschiedliche Autorensysteme, wie bspw. CAD-Anwendungen, Maschinensoftware oder Expertensysteme (z. B. Chatbots) auf sie zugreifen können. Nun stellt sich die Frage,

welche Transformationsschritte zwischen diesen beiden Zuständen – von der PDF/ XML-Norm kommend, hin zur Wissensrepräsentation durch Graphdatenbanken – notwendig sind.

Abbildung 3 zeigt, dass Normeninhalte aus einem PDF-Dokument durch einen Ingenieur in einen Wissensgraphen zu transformieren sind. Im visualisierten Anwendungsfall wird ein Expertensystem, welches mit einer Wissensbasis verknüpft ist, betrachtet. Anwenderfragen, die in natürlicher Sprache formuliert werden, sollen automatisiert und normkonform beantwortet werden können.

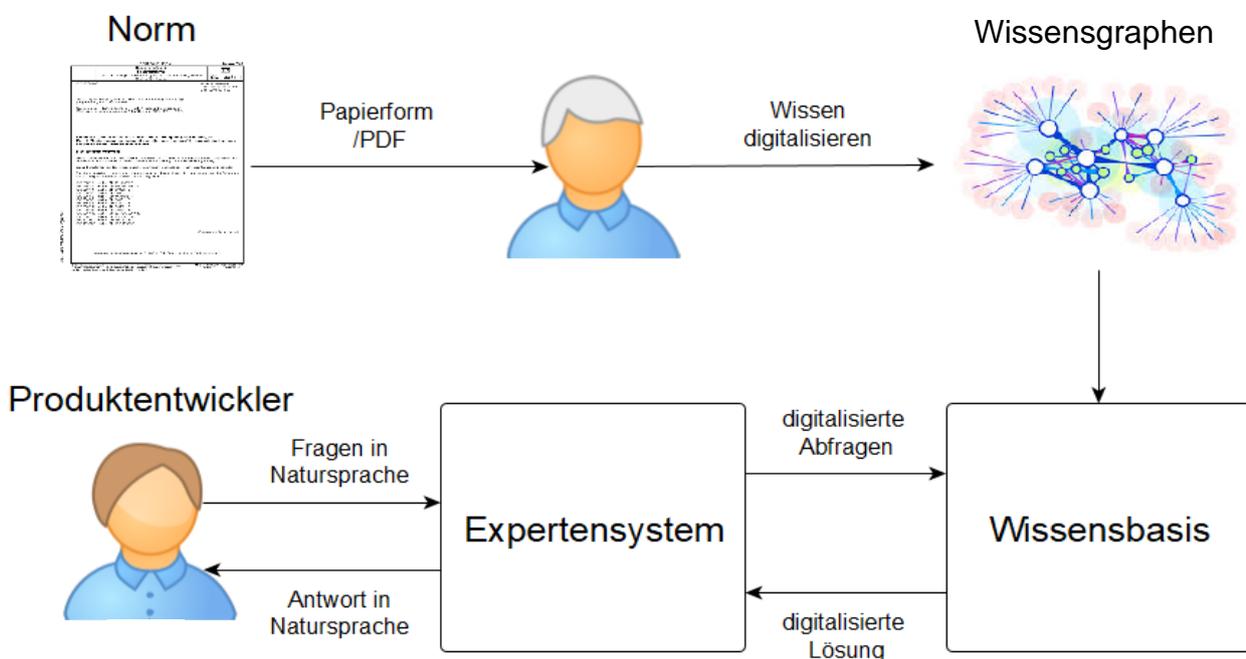


Abb. 3: Vision

5 Vorgehensmodell

In der vorliegenden Publikation wird der Fokus auf die Vorgehensweise zur Überführung von Normeninhalten in einen maschinenausführbaren Zustand, am Beispiel von Formeln, gelegt. D. h. die einzelnen Schritte zur Erkenntnisgewinnung, wie bspw. Problemanalyse, Anforderungserhebung, Toolauswahl und Validierung am Beispiel einer Wälzlagernorm rückt hier in den Hintergrund.

Die Repräsentation des Wissens aus Normen soll nach der Extraktion in einer Struktur der Graphdatenbank erfolgen. Bevor mit dem Aufbau eines normenbasierten Wissensgraphen

begonnen werden kann, wird eine Klassifikation der Normeninhalte durchgeführt. Diese basiert auf der Grundlage von Layern, von denen drei in Normen identifiziert werden können: dem Norm Layer, dem Inhalt Layer und dem Entitys Layer. Der Norm Layer stellt die Beziehung zwischen den Normen dar, welche durch Verweise in Normen beschrieben werden. Der Inhalt Layer stellt Elemente einer Norm, wie z. B. Formeln, Tabellen, Diagramme, Texte und Abbildungen sowie eine Liste von Entitäten (Parameter, Begriffe und Produkt) dar. Die Klassifikation dient unter anderem der Entwicklung einer einheitlichen Hierarchiestruktur eines universellen, normenbasierten Wissensgraphen, welche auf jede beliebige Norm angewendet werden kann (vgl. Abb. 4). Zur Umsetzung der klassifizierten Normenelemente in eine Graphdatenbank müssen Modellierungsmethodiken für jedes Normenelement entwickelt werden, sodass die spezifischen Graphenmuster den unterschiedlichen Anforderungen, wie bspw. Äquivalenz und Durchgängigkeit gerecht werden können. Im Vergleich zur Klassifizierung von Normeninhalten durch eine Kapitelstruktur, besitzt eine Klassifizierung durch Elementtypen in einer Graphdatenbank eine einfachere Umsetzbarkeit und Anwendbarkeit, da die entsprechende Normenelemente spezifische Merkmale und ihre eigenen Umsetzungsmethoden aufweisen.

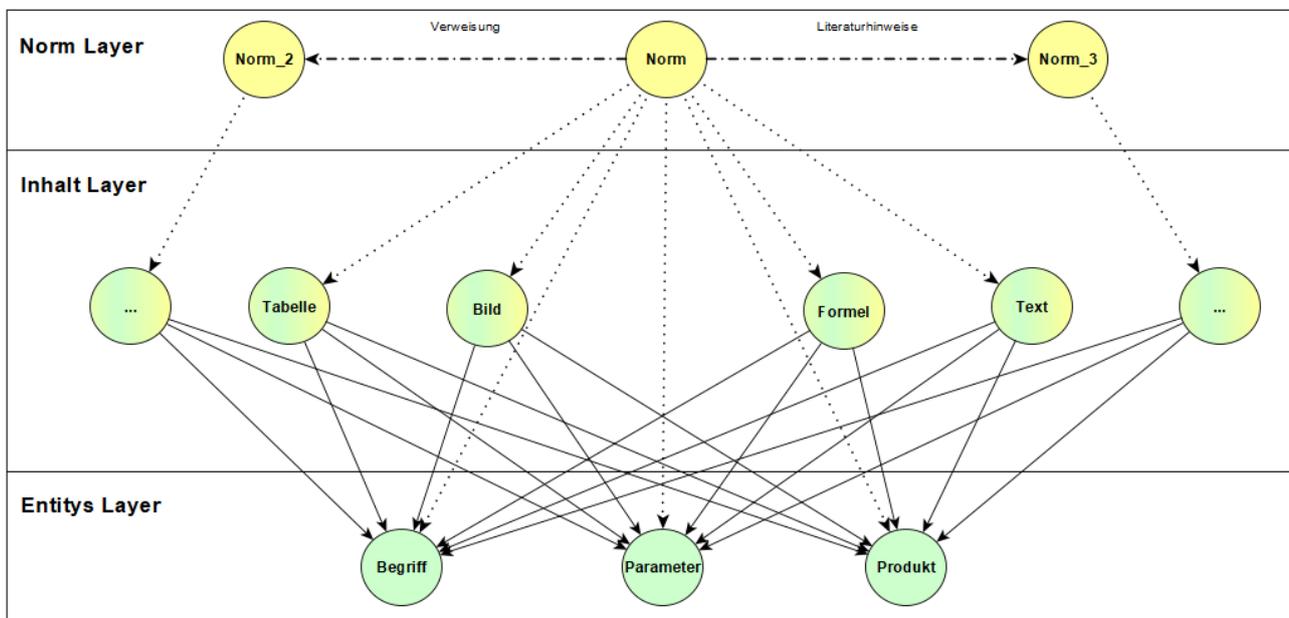


Abb. 4: Hierarchiestruktur eines universellen, normenbasierten Wissensgraphen

Die Intention beim Entwurf der Struktur besteht darin, Normenelemente und Entitäten in einer Art und Weise in Beziehung zu setzen, dass jeder Inhalt einfach durch die relevanten Entitäten in Benutzerfragen eines Expertensystems gefunden werden können. Entitäten können von verschiedenen Normenelementen gemeinsam genutzt werden, sodass der normenbasierte Wissensgraph durch die Verknüpfungen weniger Speichervolumen benötigt und eine höhere Genauigkeit von Abfragen erzielt wird.

5.1 Notwendige Vorarbeit: Modellierung von Parametern und Begriffen

Die Graphen von Parametern, Begriffen und Produkten werden in erster Instanz aufgebaut, da sie die Grundlage von normbasierten Wissensgraphen darstellen. Alle anderen Normenelemente werden durch diese Entitäten miteinander verknüpft. Abbildung 5 zeigt die einfache Struktur ihrer Graphenmuster, wobei „Name“, „Symbol“, „Einheit“, „Definition“ und „Anmerkung“ in den Knotenattributen gespeichert werden.



Abb. 5: Graphenmuster von Begriff und Parameter

Bekannterweise existieren in heutigen PDF-Normen Begriffsdefinitionen und Parameterlisten, sodass die Informationen unmittelbar in eine Excel-Tabelle kopiert und mit Hilfe einer String-Funktion von Excel über die Erzeugung eines Cypher (deklarative Abfragesprache für Graphen) in ein Graphenmuster transformiert wird (vgl. Abb. 6).

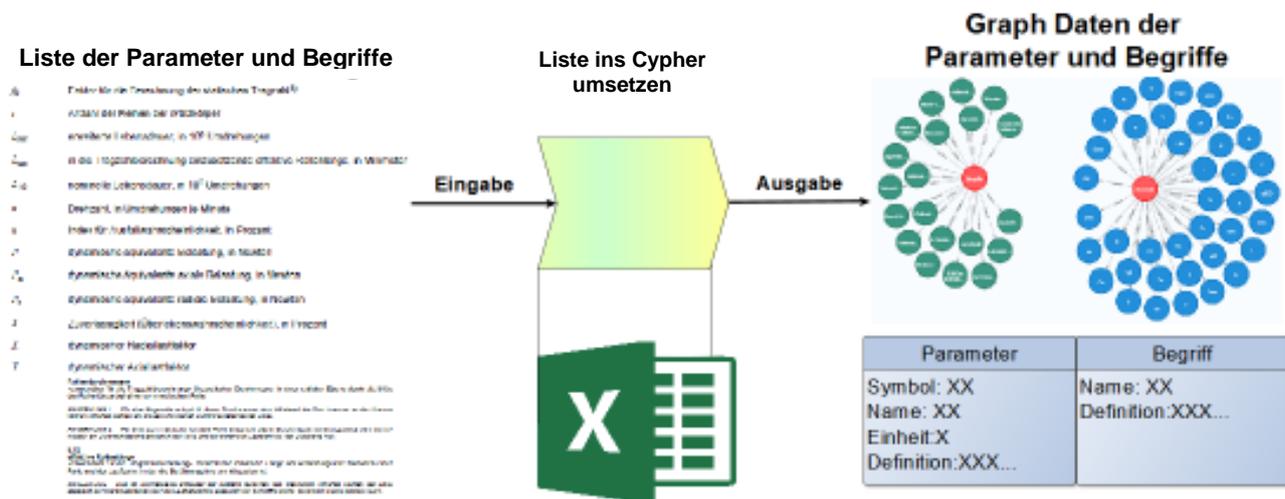


Abb. 6: Generierung der Graphdaten für Parameter und Begriff

5.2 Überführung von Norminhalten am Beispiel der Formeln

Wie in Abbildung 2 gezeigt, besteht die Überführung von Normeninhalten aus mehreren Schritten. Es erfolgt zunächst die Expression, Modellierung, Extraktion, Fusion und anschließend die Speicherung. Exemplarisch soll in diesem Kapitel die Extraktion der Klasse „Formel“ aufgezeigt werden.

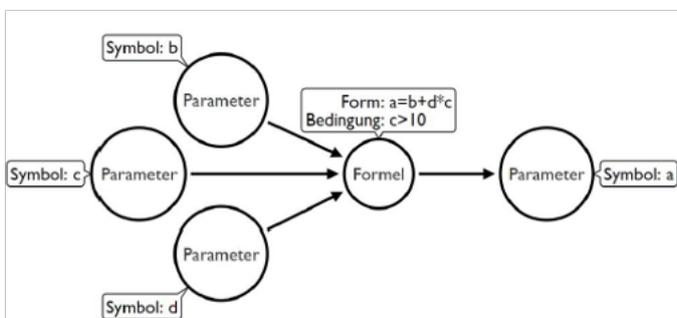
Der Schritt „Expression“ ist in Tabelle 1 abgebildet, wobei die Unterklassen „Mathematische Expression“, „Berechnungsbedingung“ und „Beziehung zwischen Formel, Parameter, Produkt und Berechnungsbedingung“ identifiziert wurden. Sie besitzen jeweils einen unterschiedlichen Formalisierungsgrad und lassen sich durch verschiedene Speicherformate in die Maschinenausführbarkeit überführen. Hierbei kann konstatiert werden, dass alle Unterklassen in einer Graphdatenbank abgebildet werden können.

Tab. 1: Schritt „Expression“ für Formeln

Formel			
	Mathematische Expression	mittel	String/Graphdatenbank
	Berechnungsbedingung	mittel	String/Graphdatenbank
	Beziehung zwischen Formel, Parameter, Produkt und Berechnungsbedingung	hoch	Graphdatenbank

Im nächsten Schritt der „Modellierung“ werden die Templates erstellt, um die Formeln in einer Graphdatenbank abzubilden. Am Beispiel der Formel „ $a=b+d*c$ “ sollen zwei unterschiedliche Möglichkeiten zu Modellierung aufgezeigt werden:

Modellierungsvariante 1



Modellierungsvariante 2

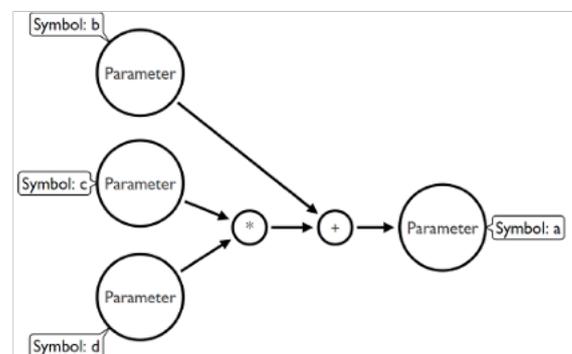


Abb. 7: Varianten der Modellierung von Formeln

In der ersten Modellierungsvariante wird die mathematische Expression als String in den Attributen des Knotens gespeichert, wobei die relevanten Parameter durch Beziehungen mit dem „Formelknoten“ verbunden werden (vgl. Abb. 7). Durch die Beziehungsrichtung können die zu verwendenden Parameter von dem zu berechnenden Parameter unterschieden werden. Bei einer Berechnungsdurchführung eines Autorensystems auf Basis der Graphdatenbank wird die mathematische Expression vom Knoten extrahiert und die Variablen durch definierte Werte ersetzt. In der alternativen Modellierungsform wird die Gesamtformel in Teilformeln aufgespalten, wobei jeweils nur zwei Parameter über eine mathematische Beziehung verknüpft werden. Zwar repräsentiert die zweite Modellierungsform eine detailliertere Beziehung zwischen einzelnen Parameter, allerdings ist die Überführung in einen Graphen von komplexerer Natur. Aufgrund einer einfacheren Berechnungsdurchführung und besseren Automatisierbarkeit für die Umsetzung in einen Graphen wird die erste Variante als zielführend erachtet.

Die Vorgehensweise zur automatisierten Überführung des Normenelementes „Formel“, aus einem maschinenlesbaren PDF-Dokument in einen maschinenausführbaren Wissensgraphen, wird durch den Schritt „Extraktion“ in Abbildung 8 gezeigt. Hierbei wird auf einen cloudbasierten API-Dienst – Language Understanding (kurz: Luis genannt) – zurückgegriffen, welcher in der Lage ist benutzerdefiniertes Machine Learning auf Texte, die in natürlicher Sprache vorliegen, anzuwenden. [9]

Um relevante Informationen aus der Norm mit Hilfe von Luis zu extrahieren, werden zwei Teilschritte in Form der „Identifikation von Entitäten“ und der „Ereignisextraktion“ durchgeführt. Um entsprechende Entitäten aus der Norm erkennen zu können, müssen diese in Luis vordefiniert werden. Hierzu werden die in Kap. 5.1 definierten Parameter und Begriffe dem Dienst „Luis“ übergeben. Zusätzlich wird der Dienst mit Beispieltextrn zur Beschreibung von Formeln angereichert und es werden Ereignissen wie z. B. „Formel erkennen“ deklariert. Die Trefferwahrscheinlichkeit korreliert mit Anzahl der Trainingsdaten. Infolgedessen kann Luis formelbeschreibende Texte erkennen und sowohl den mathematischen Ausdruck mit zugehörigen Berechnungsbedingungen, als auch das Produkt extrahieren und an einer passenden Position des vorbereiteten Graphen-Templates einsetzen.

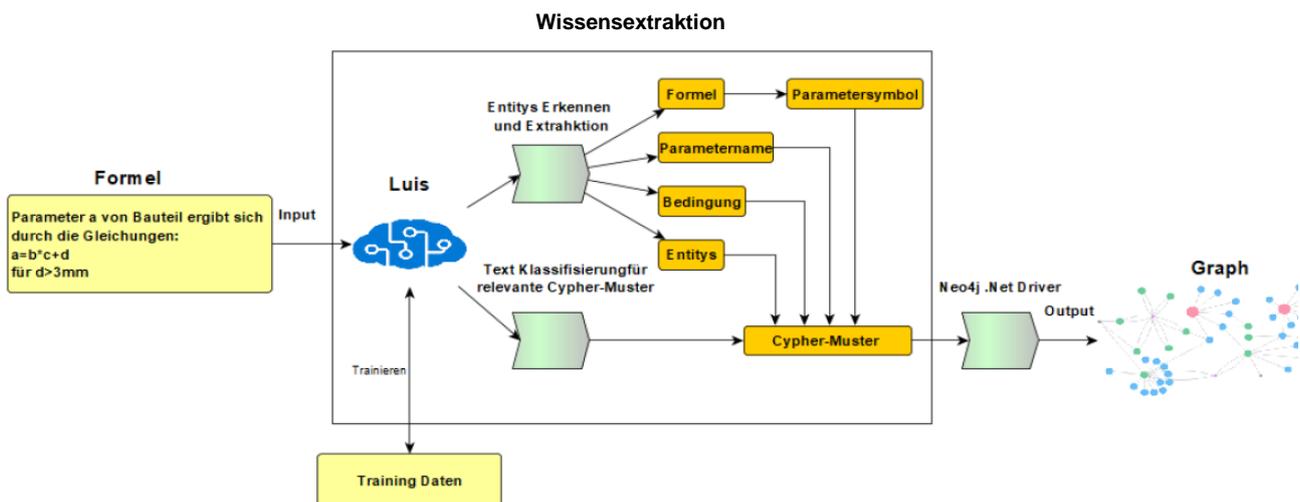


Abb. 8: Vorgehensweise zur Überführung von Formeln in einen Wissensgraphen

6 Automatisierungspotenzial durch Auswertung von XML-Normen

Unter Berücksichtigung der Ausführungen von Kap. 2 – konkret der Einführung eines Standards Tag Suite und der zukünftigen Bereitstellung von XML-basierten Normen stellt sich die Frage, ob die Vorgehensweise zur Überführung von Norminhalten in eine maschinenausführbare Form, zur Eliminierung manueller Schritte, optimiert werden kann. Im Folgenden werden die Ergebnisse einer Analyse zur Fragestellung der „Extrahierbarkeit von Formeln“ aus Normen im XML-Format und deren Bereitstellung über einen modifizierten Service vorgestellt. Es können drei wesentliche Probleme beim Auslesen von Formeln aus einer XML-Datei konstatiert werden:

1. Formeln, wie bspw. in Abb. 9 ersichtlich, sind zwar gut genug für die Extrahierung getagt, allerdings ist ihre Bedingung als separate Formel abgespeichert. Eine Zuordnung der Bedingung ist in der aktuellen Norm zwar möglich allerdings nur, aufgrund der Zuordnung über die Position innerhalb der Datei – erst die Gleichung mit Label, dann die Einschränkung. Ist die Anordnung bei einer anderen Formel innerhalb der Norm nicht identisch, ist auch keine Berücksichtigung der Bedingung gewährleistet. Zusätzlich kann konstatiert werden, dass dieser Sachverhalt in der betrachteten Norm nicht konsistent ist.

$$C_r = b_m \times f_c \times (i \cos \alpha)^{0,7} \times Z^{2/3} \times D_w^{1,8}$$

für $D_w \leq 25,4 \text{ mm}$

Abb. 9: Formel zur Berechnung der dynamischen radialen Tragzahl aus DIN ISO 281 [10]

2. Das zweite Problem besteht darin, dass überall wo „Text“ verwendet wird – z. B. in Kopfzeilen von Tabellen – die verwendeten Terme und Symbole nicht korrekt getagt sind. Variablenbezeichnungen besitzen zwar einen tiefgestellten Buchstaben (hier: m), jedoch ist die korrekte Variable b nicht als Teil der Formel getagt (vgl. Abb. 10). Dies schließt eine Überführung von Tabellen nicht aus, jedoch kombiniert mit einem komplexen Aufbau der Kopfzeilen sorgt es dafür, dass der gesamte Text ausgewertet werden muss.

Tabelle 1 — Werte von b_m für Radialkugellager

Lagerart	b_m
Radial- und Schrägkugellager (ausgenommen Lager mit Füllnut), Spannlager und Pendelkugellager	1,3
Lager mit Füllnut	1,1

Abb. 10: Werte des Tragzahlbeiwertes für Radialkugellager – DIN ISO 281 [10]

3. Das größte Problem besteht voraussichtlich in der Verwendung von Texten für die Einschränkungen von Formeln.

"Sie gelten für Lager, deren im Lagerquerschnitt gemessener Laufrillenradius nicht größer ist als $0,52 D_w$ für die Innenringe von Radialkugellagern und Schrägkugellagern und nicht größer ist als $0,53 D_w$ für die Außenringe von Radialkugellagern und Schrägkugellagern sowie die Innenringe von Pendelkugellagern." [10] Hierbei wird die Auswertung von Textinhalten zu einem Problem. Zusätzlich werden die Terme " $0,52 D_w$ " und " $0,53 D_w$ " nicht richtig getagt.

Neben dem Bedarf potenzielle Aufbereitungsprobleme der XML-basierten Normen im Preprocessing zu eliminieren, zeigt die Analyse, dass die automatische Extraktion von Formeln aus einer XML-Datei grundsätzlich möglich ist.

7 Diskussion und Ausblick

Ziel dieser Publikation ist es, einen ersten möglichen Weg zur Überführung von Normeninhalten in eine maschinenausführbare Repräsentationsform zu ermitteln, wobei der Fokus auf dem Wissenselement „Formel“ liegt. Es wurde gezeigt, dass Graphdatenbanken eine mögliche Wissensrepräsentation für Normeninhalte darstellen, wobei Formeln aus einer maschinenlesbaren PDF extrahiert und in einen maschinenausführbaren

Wissensgraphen durch die Anwendung der Vorgehensschritte „Expression“, „Modellierung“, „Extraktion“, „Fusion“ und „Speicherung“ überführt werden können. Es sind jedoch auch Schwachstellen zu identifizieren. So muss eine PDF-Norm vorab vollständig dupliziert werden, um die Formeln händisch in eine maschinenlesbare Zeichenkette zu transformieren, da diese in ihrer ursprünglichen Form als Abbildungen integriert sind. Die Analyse einer XML-basierten Norm zeigt das Potenzial zur automatischen Extraktion von Formeln, ohne diese vorab händisch erstellen zu müssen, sodass manuelle Schritte der präsentierten Vorgehensweise substituiert werden können. Die Erkenntnisse werden genutzt, um hierauf aufbauend weitere Forschungsaktivitäten hinsichtlich einer möglichen Kombination der Ansätze durchzuführen. Neben einer automatisierten Parameterbereitstellung und/ oder der Berücksichtigung von Kontextsensitivität, sollen die Erkenntnisse als Basis zur Abstrahierung einer universell anwendbaren Methodik – zur Überführung von Normeninhalten in eine Maschinenausführbarkeit – dienen.

Literatur

- [1] Loibl, A./Nagarajah, A. (2019): „Klassifizierung von Normen zur Eignung für eine Maschinenumsetzbarkeit“. In: 17. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik.
- [2] Guilin Qi Huajun Chen, Kang Liu, Haofen Wang, Qiu Ji, Tianxing Wu Hrsg.: KNOWLEDGE GRAPH. Springer, [Place of publication not identified], 2018.
- [3] Beuth, <https://www.beuth.de/de/erweiterte-suche/272754!search?alx.searchType=complex&searchA-reald=1&query=DIN+281&facets%5B276612%5D=&hitsPerPage=10>, (abgerufen am 12.06.2019).
- [4] Manoharan, T., Köhler, P, Wissensbereitstellung als Service, 16. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik 2018, 2018, S. 224-235.
- [5] Peter Rauh (2019): NISO STS – Mitwirkung bei der Überarbeitung. In: <https://din.one/pages/viewpage.action?pageId=28607076> (abgerufen am 29.05.2020).
- [6] ANSI/NISO Z39.102-2017, STS: Standards Tag Suite. In: https://groups.niso.org/apps/group_public/download.php/18492/Z39.102-2017.pdf (abgerufen am 20.05.2020).
- [7] Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) (2017): Die Rolle der Normung 2030 und Gestaltungsoptionen unter Berücksichtigung der technologiespezifischen Besonderheiten der IKT in der Normung und Standardisierung. Projekt Nr. 70/15, In: https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Studien/rolle-der-normung-2030.pdf?__blob=publicationFile&v=16 (abgerufen am 19.04.20).
- [8] Kejriwal, M.: Domain-specific knowledge graph construction. Springer, Cham, Switzerland, 2019.
- [9] diberry: Worum handelt es sich bei Language Understanding (LUIS)? - Azure Cognitive Services. <https://docs.microsoft.com/de-de/azure/cognitive-ser-vices/luis/what-is-luis>, (abgerufen am 12.01.20).
- [10] DIN ISO 281:2010-10, Wälzlager – Dynamische Tragzahlen und nominelle Lebensdauer (ISO 281:2007).

Digitale Analyse und Dokumentation von Tragbildern und Flankenschäden an Kegelradverzahnungen

**Dipl.-Ing. Arthur Hilbig, Dipl.-Ing. Felix Müller, M.Sc. Hannes Sardemann*,
Dr.-Ing. S. Holtzhausen, Prof. Dr. habil. H.-G. Maas*, Prof. Dr.-Ing. B. Schlecht**

Institut für Maschinenelemente und Maschinenkonstruktion, Technische Universität Dresden

Münchner Platz 3, 01187 Dresden

Internet: <https://tu-dresden.de/ing/maschinenwesen/imm>

*Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, Technische Universität Dresden

Helmholtzstraße 10, 01069 Dresden

Internet: <https://tu-dresden.de/bu/umwelt/geo/ipf/photogrammetrie>

Email: Arthur.Hilbig@tu-dresden.de; Felix.Mueller1@tu-dresden.de; Hannes.Sardemann@tu-dresden.de;

Inhalt: *In der Produktentwicklung von Getrieben ist die Analyse und Dokumentation von Verzahnungen ein wichtiger Bestandteil der Qualitätssicherung. Das vorliegende Paper beschäftigt sich exemplarisch mit der Tragbildprüfung und Schadensbefundung an Kegelradverzahnungen und der damit einhergehenden Problemstellung, die versuchstechnisch ermittelten Trag- und Schadensbilder mit Simulationsergebnissen vergleichbar zu machen. Darüber hinaus ist es das Ziel mit Hilfe dieser Verknüpfung die verschiedenen Datenformate aus Versuch und Simulation in einem einheitlichen Format zu bündeln und zu dokumentieren. Mit dem vorliegenden Paper wird ein neuartiges Mess- und Analyseverfahren vorgestellt, mit dem es möglich wird Flankentexturen und Simulationsdaten direkt und hochgenau miteinander zu vergleichen und zusätzlich die Analyseergebnisse in einem einheitlichen Format abzulegen. Diese Ergebnisse können Grundlage für eine abgesicherte Montage von Verzahnungen, die Untersuchung von Tragfähigkeiten sowie die Validierung von Simulationsmodellen sein. Zudem erlaubt die hohe Flexibilität und Zugänglichkeit des Messsystems einen Einsatz von der Laborumgebung bis hin zum Getriebe im realen Umfeld.*

Stichwörter: *Verknüpfung von Simulation und Versuch, Photogrammetrische Tragbilderfassung*

Digital analysis and documentation of contact patterns and flank damage on bevel gears

Abstract: *In the product development of gearboxes, the analysis and documentation of gears is an important part of quality assurance. This paper deals with the contact pattern inspection and damage evaluation of bevel gears and the associated problem of making the contact pattern or flank damage determined by tests comparable with simulation results. Furthermore, the aim is to combine and document the different data formats from test and simulation in a standardised data format. This paper presents a novel measurement and analysis method that allows the direct and highly accurate comparison of flank textures and simulation data and additionally allows to store the analysis results in a uniform format. These results can be the basis for a reliable mounting of gears, the investigation of load capacity and the validation of simulation models. In*

addition, the high flexibility and accessibility of the measuring system allows its use in experimental and real world applications.

Keywords: Linking of simulation and experimental data, photogrammetric detection of contact patterns

1 Problemstellung und Motivation

In der Forschung und Entwicklung von Getrieben ist die Analyse und Dokumentation von Verzahnungen ein wichtiger Bestandteil der Qualitätssicherung und damit eine Grundlage der stetigen Weiterentwicklung der Getriebe. Unter dem Begriff Analyse werden hierbei zwei wesentliche Aspekte gesehen: die virtuelle Analyse der Verzahnung mit Hilfe von Simulationswerkzeugen sowie die versuchstechnische Untersuchung der Verzahnung. Beide Aspekte sind Teil der Produktentwicklung eines Getriebes.

Beispielsweise wird im Bereich der Kegelradverzahnungen die Tragbildprüfung zur Beurteilung der Fertigungsqualität und zur Bestimmung der Einbaulage während der Getriebemontage verwendet. Anhand der Tragbildform und -größe können Rückschlüsse auf die Fertigungsqualität gezogen werden, die Lage des Tragbildes ist entscheidend für eine mögliche Einbaumaßkorrektur der Verzahnung. Für die Tragbildprüfung wird die Zahnflanke farbig markiert. Beim Abwälzen der Verzahnung wird die Markierung im Bereich des Kontakts beider Zahnflanken abgetragen und das Tragbild kommt zum Vorschein. Das Tragbild kann entweder lastfrei als Tuschieertragbild (Bild 1, oben) oder als Lasttragbild (Bild 1, unten) geprüft werden. Für beide Kriterien erfolgt ein Abgleich mit Solldaten, welche bspw. mit Hilfe der Zahnkontaktsimulation ermittelt werden (Bild 1 links). Für einen Vergleich ist es notwendig die Simulationsdaten direkt mit den Versuchsdaten in Bezug zu setzen. Beispiele zur Durchführung einer Tragbildvermessung werden in [1]-[5] gegeben.

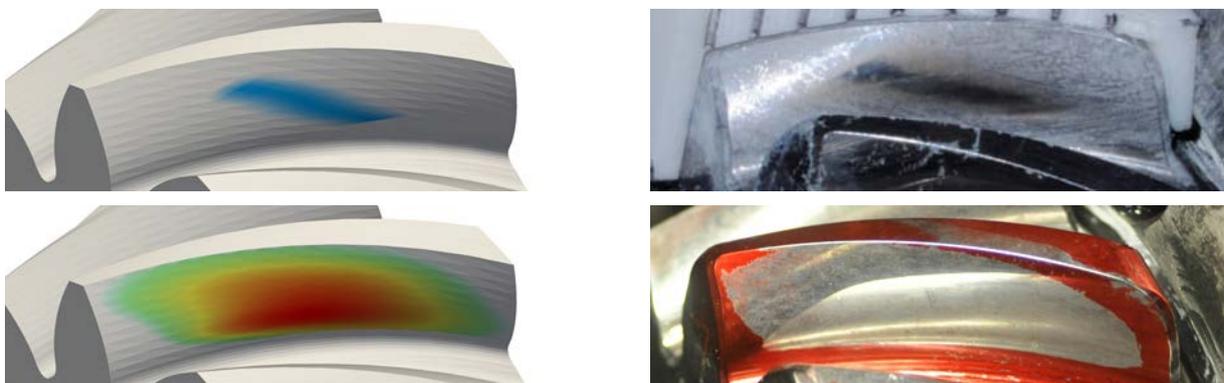


Bild 1: Tragbilder berechnet (links) und aufgenommen während der Montage (rechts)

Weitergehend ist für die Untersuchung der Verzahnungstragfähigkeit die Befundung von Flankenschäden entscheidend. Als Beispiele für Schäden an der Flankenoberfläche seien Grübchen und Grauflecken (vgl. Bild 2) oder Fresser genannt. Bei der Befundung werden Ort und Ausprägung des Schadens ermittelt und in Bezug zu den bis zum Inspektionszeitpunkt aufgetretenen Lasten und Lastzyklen gesetzt.



Bild 2: Kombination aus Grübchen- und Graufleckenschaden

Parallel dazu existieren Simulationsmodelle, z.B. in [6], mit deren Hilfe der Schaden vorhergesagt oder auch rekonstruiert werden kann. Dabei ist ein Abgleich zwischen den Versuchs- und Simulationsdaten zwingend notwendig um die Modelle zu validieren.

Ein Abgleich der Simulations- und Versuchsdaten in den gezeigten Beispielen erfolgt bisher anhand der qualitativen Bewertung der Flankenbilder. Aufgrund der doppelt gekrümmten Flanken der Kegelradverzahnung und dem Einfluss der Kameraperspektive ist die Bewertung jedoch stark subjektiv geprägt. Eine quantitative Aussage über Lage und Ausprägung des Tragbildes bzw. des Schadens ist damit unmöglich.

Die korrekte Erfassung der versuchstechnischen Untersuchung bildet somit die Grundlage, um der zentralen Herausforderung einer Verknüpfung der Simulations- und Versuchsdaten im Sinne eines digitalen Zwillings zu begegnen. Damit werden virtuelle und reale Verzahnung in ihren jeweiligen Prozessschritten vergleichbar und Sollwerte des Simulationsmodells können direkt mit versuchstechnisch ermittelten Kenngrößen in Bezug gesetzt werden. Darüber hinaus ergibt sich aus der Verknüpfung die Möglichkeit die verschiedenen Datenformate in einem einheitlichen Format zu bündeln und so gezielt zu dokumentieren.

2 Lösungsansätze der versuchstechnischen Erfassung

In einem Patent der Firma Gleason [7] erfolgt die Tragbildprüfung an einem Tragbildtester anhand von Bildaufnahmen der Zahnflanke mit einer justierten Kamera, sodass die Bildaufnahme auf ein hinterlegtes 3D-Modell der Verzahnung perspektivisch angeglichen wird. Auf Grundlage eines Rasters auf der virtuellen Verzahnung werden die Bildaufnahmen

ausgewertet. Das Tragbild wird automatisch für alle Zähne detektiert und kann mit den Simulationsdaten verglichen werden. In einem weiteren Patent der Firma Klingelberg [5] wird die Tragbildprüfung analog zu [7] durchgeführt. Ein wesentlicher Unterschied besteht im Abgleich der Bildaufnahmen mit dem Simulationsmodell. Hierfür werden die Kanten der Zahnflanke in den Bildaufnahmen detektiert und über eine Transformation in Bezug auf die 3D-Geometrie entzerrt. Damit wird die Flankenkrümmung berücksichtigt. Ein wesentlicher Nachteil beider Ansätze besteht in der perspektivischen Angleichung bzw. Entzerrung der Bildaufnahmen zur Verknüpfung mit dem Simulationsmodell. Diese Annäherungen bilden den optischen Strahlenverlauf vom Objekt zum Bildsensor der Kamera physikalisch nicht korrekt ab, sodass Lage und Größe des Tragbildes nicht genau wiedergegeben werden. Zudem basieren beide Ansätze auf stationären Messsystemen, die ausschließlich für die labortechnische Anwendung konzipiert sind. Die Erfassung von Flankenschäden am Prüfstand oder im realen Einsatz ist damit nicht möglich.

3 Prozessablauf der zukünftigen Tragbilderfassung

Ausgehend von dieser Problemstellung wird im vorliegenden Beitrag ein neuartiger Lösungsansatz und Prozessablauf (Bild 3) zur digitalen Auswertung von Tragbildern und Flankenschäden dargestellt. Wesentliches Merkmal des zukünftigen Analyseprozesses einer versuchstechnischen Untersuchung ist es, dem Nutzer ein einfach zu bedienendes Auswertungswerkzeug bereitzustellen. Ohne zusätzliche und kostenintensive Apparaturen und mit einem flexiblen anwendbaren Messsystem unterstützt diese Tragbilderfassung die optisch exakte Darstellung und Analyse von Flankenschäden, sowie die Verknüpfung der Simulations- und Versuchsdaten in einem einheitlichen Datenformat für eine nachhaltige Datensicherung.

Ausgehend von einer lokalen Zahnkontaktsimulation wird die exakte Flankengeometrie im offenen REXS-Format (Reusable Engineering Exchange Standard) den folgenden Prozessschritten bereitgestellt. Die Erweiterung der REXS-Spezifikation ermöglicht den Austausch aller Dokumentationsdaten mit Hilfe eines Schnittstellengitters der Flankengeometrie bzw. eindeutiger Referenzierungen der Verzahnungskomponenten.

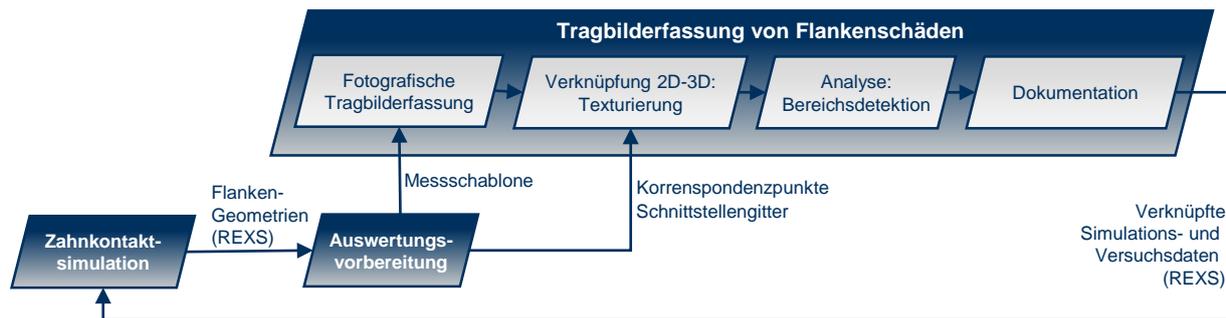


Bild 3: Prozessablauf der Versuchsauswertung und Dokumentation

In einer Auswertungsvorbereitung wird die Flankengeometrie der Simulation für die Erstellung einer Messschablone genutzt, welche in einer fotografischen Tragbildfassung die äußere Orientierung der Kameraposition zur Flankengeometrie vorgibt. Weitergehend werden charakteristische Korrespondenzpunkte an einen Texturierungsprozess übergeben, welcher die Bilddaten der Tragbildfassung auf das Schnittstellengitter der Flankengeometrie überträgt. Anschließend findet in einer Bereichsdetektion die lokale Klassifizierung der Flankenbildbestandteile statt. Hieraus erfolgt in einer Dokumentation die Verknüpfung zu den bereitgestellten Simulationsergebnissen, die dem Simulationsprozess selbst wieder bereitgestellt werden können.

4 Erfassung und Verknüpfung von Bild- und Geometriedaten

Ein wesentlicher Arbeitsschritt der Flankenuntersuchung bildet somit die optische Erfassung der Zahnflankentextur als Abbild des realen Zustands. Die Aufnahme der Zahnflankentextur soll mit einem photogrammetrischen Erfassungsverfahren erreicht werden, das anhand einer oder mehrerer Bilder des Objekts die Verknüpfung von 2D-Bildinformation zur 3D-Flankengeometrie ermöglicht. Grundlage bildet ein zentralperspektivisches Kameramodell, welches den Einsatz klassischer Spiegelreflexkameras mit handelsüblichen Weitwinkel- oder Teleobjektiven im Versuchsumfeld ermöglicht. Die zentralperspektivische Abbildung charakterisiert dabei die Projektion eines Punktes vom Objektraum, der berechneten 3D-Flankengeometrie, in den Bildraum eines aufgenommenen Versuchsbildes. Dabei untergliedert sich die Projektion in zwei aufeinanderfolgende Transformationen: Die äußere Orientierung, eine Transformation (Rotation und Translation) vom Objektkoordinatensystem in das Kamerakoordinatensystem, sowie die innere Orientierung, eine Transformation in das 2D-Koordinatensystem des Bildes bzw. die Abbildung durch das Kameraobjektiv auf den Bildsensor. Die Korrespondenz zwischen Punkten der 3D-Geometrie (X, Y, Z) und den

zugehörigen Bildpunkten (X', Y') kann mit Hilfe der Kollinearitätsgleichung hergestellt werden [8]. Die Kollinearitätsgleichung wird mit einer linearen Version eines Rückwärtsschnitts gelöst [9]. Dafür müssen mindestens 4 bekannte und exakte Punktkorrespondenzen (Bild 4) vorliegen, nachfolgend als Passpunkte bezeichnet, um die Transformation der äußeren Orientierung $(R(\omega, \phi, \kappa), X_0, Y_0, Z_0)$ zu berechnen. Die Voraussetzung hierfür ist die bekannte innere Orientierung mit der Kamerakonstante, der Hauptpunktlage und den Verzeichnungsparametern, die über eine vorhergehende integrierte Kamerakalibrierung ermittelt werden. Die Aufnahmen eines Kalibrierfelds aus unterschiedlichen Blickwinkeln führen dabei in einer Bündelblockausgleichung zu den gemeinsamen Parametern der inneren Orientierung [8].

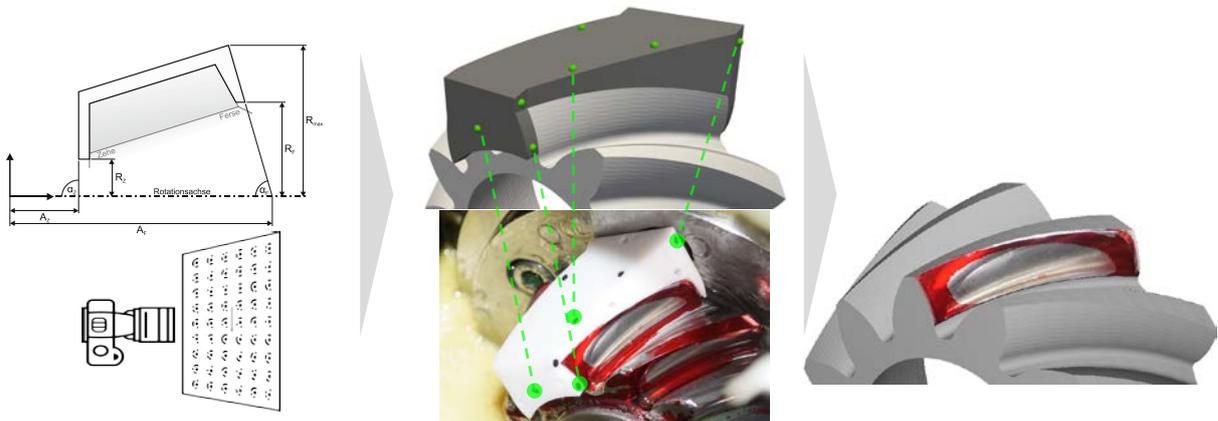


Bild 4: Beispiel der photogrammetrischen Tragbildaufnahme

Die tatsächliche Fertigungsgeometrie einer Verzahnung weicht insbesondere an charakteristischen Eckpunkten durch gebrochene Kanten zum theoretischen Simulationsmodell ab. Ebenfalls liegen die Flankenpunkte meist in einer Ebene, wodurch sie als Passpunkte zum Lösen der Kollinearitätsgleichung ungeeignet sind. Folglich wird auf eine Messschablone zurückgegriffen, die sich ausschließlich auf die Flankenflächen, sowie die Stirnflächen der Verzahnung stützt und über ihre Außenkontur bzw. eingebrachte Zylinderstifte die charakteristischen Passmarken bereitstellt. Dem zukünftigen Anwender wird über ein Framework die unkomplizierte Anpassung und Erstellung der Messschablone ermöglicht. Damit können mögliche Bauraumrestriktionen durch das Verzahnungsumfeld auf Grundlage weniger Parameter berücksichtigt werden. Die Schablone kann schließlich mit Hilfe eines Rapid-Prototyping-Verfahrens hergestellt werden.

5 Genauigkeitsevaluation der Texturierung

Ausgehend von den möglichen Fehlerquellen der Texturierung werden der systematische und zufällige Gesamtfehler näher betrachtet. Systematische Fehler entstehen durch fertigungsbedingte Abweichungen der Messschablonengeometrie und der Verzahnung, insbesondere im Bereich der Anlagefläche (Bild 5) und der Außenkontur. Ebenfalls spielen die Lageabweichung der manuell applizierten Zylinderstifte als Passmarken, sowie Abweichungen durch den Modellansatz der Kamera-kalibrierung eine Rolle. Dazu wurde in Vorbereitung der Untersuchung die gefertigte Messschablone mit Hilfe eines 3D-Scanners (ATOS Triple Scan der Firma GOM) digitalisiert.

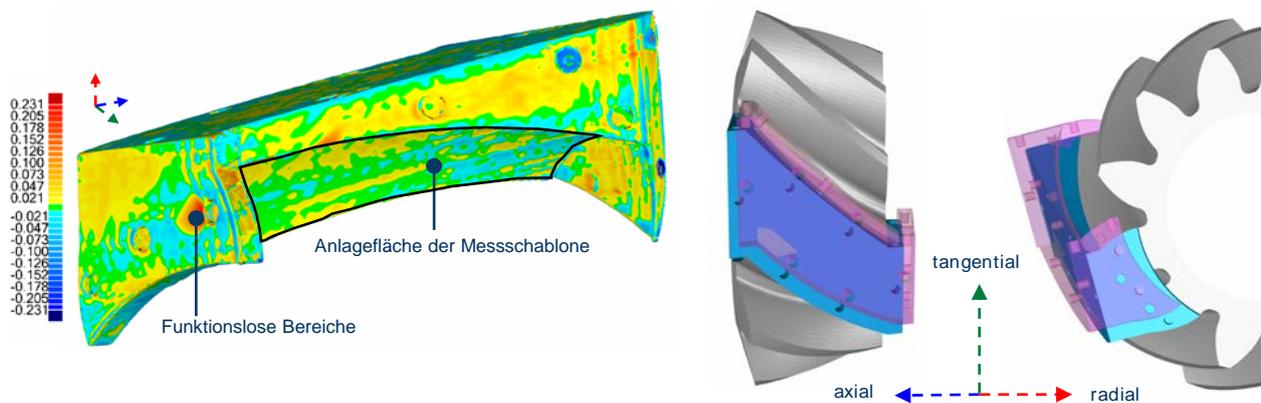


Bild 5: Formabweichung der Schablone (links), Lageabweichung (rechts)

In einer Best-Fit-Ausrichtung von gefertigtem zu theoretischem Gegenstück der Messschablone wird die Passung bzw. der Messschablonensitz näher betrachtet. Dieser wird ausschließlich durch die Zahnflanke selbst und dem Gegenstück der Messschablone bestimmt. Die festgestellte Maximalabweichung funktionsloser Teilbereiche (Bild 5, links, $rot = 231 \mu m$) haben keinen Einfluss. Die zwar hohe Fertigungsgenauigkeit der Verzahnungsflanke von $10 \mu m$ führt jedoch in Verbindung mit der Abweichung der Anlagefläche der Messschablone (Bild 5, links, $gelb = 47 \mu m$, $grün = 21 \mu m$, $blau = -47 \mu m$) im Vergleich des theoretischen zum realen Messschablonensitzes (Bild 5, mittig/rechts) zu einer Verschiebung von $791 \mu m$ radial, $480 \mu m$ tangential und $124 \mu m$ axial. Hiervon ausgehend soll die Auswirkung der Form- und Lageabweichung in Bezug auf den Messschablonensitz und der daraus resultierende systematische Fehler (Genauigkeit) bei der Texturierung der Zahnflanke näher untersucht werden.

Hierfür wurde ein Zahnrad entsprechend Bild 6 (links) mit 10 Referenzpunkten (rot markiert) versehen, welche mit Hilfe des 3D-Scans vermessen wurden und im Folgenden als Referenz angenommen werden. Die photogrammetrische Vermessung erfolgt auf Grundlage der dargestellten Messschablone.



Bild 6: Messaufnahme (links), texturierte Zahnflanke mit virtueller Messschablone (rechts)

Um zur Bewertung des systematischen Fehlers die Form- und Lageabweichung der Messschablone getrennt von den Abweichungen aus Kalibrierung und Texturierung betrachten zu können, werden zwei unterschiedliche Versuche durchgeführt. Der erste Versuch (Textur Scan) wird auf Grundlage der gescannten 3D-Geometrie von Zahnrad und Messschablone durchgeführt. Für die Texturierung werden ausschließlich die mit dem 3D-Scan erfassten Passmarken auf der Schablone verwendet. Damit wird lediglich der Fehler aus Kalibrierung und Texturierung erfasst. Im zweiten Versuch (Textur Soll-Geometrie) wird die Textur basierend auf den STL-Daten der Soll-Geometrie von Zahnrad und Messschablone erfasst (Bild 6, rechts). Dabei werden ausschließlich die grün markierten Korrespondenzpunkte entsprechend der Soll-Vorgabe verwendet. Somit wird der Gesamtfehler des Messverfahrens ermittelt. Zusätzlich wird im zweiten Versuch die Wiederholgenauigkeit des Verfahrens untersucht, welche im gesamten Messablauf zu erwarten ist. Hierzu werden insgesamt sechs Wiederholmessungen mit jeweils zwei Messaufnahmen ausgewertet. Daraus wird ein Wert für die Präzision des Messverfahrens abgeleitet. Die vier Schritte des Verfahrens, die Kamerakalibrierung, die Platzierung der Messschablone auf der Verzahnung, die Aufnahme des Messbildes sowie die Texturierung werden in jeder Wiederholmessung erneut ausgeführt. Durch die Variation von Brennweite und Blende sowie der Kameraperspektive als Parameter der Kalibrierung und Messaufnahme kann eine Abschätzung über die Robustheit der photogrammetrischen Messung getroffen werden. Die für die Wiederholmessungen erfassten Kamerabilder wurden mit einer Spiegelreflexkamera Sony Alpha SLT-A65V und einem Weitwinkelobjektiv

SAL16105 (16 - 105 mm, F3.5 - 5.6) aufgenommen. Dabei wurde die Brennweite über den gesamten Bereich von 16-105 mm in sechs Schritten variiert. Die eingesetzte Blende bewegt sich je nach den Belichtungsverhältnissen in einem Bereich von F 5.6-22. Durch das wiederholte Platzieren der Messschablone wird zusätzlich der Einfluss der Passgenauigkeit (siehe Bild 5) auf die Präzision des Verfahrens erfasst. Zudem wird mit der Texturierung der Wiederholfehler aus der manuellen Korrespondenzpunktfindung berücksichtigt.

Die Ergebnisse beider Versuche sind in Bild 7 dargestellt. Zur besseren Darstellung wird die Flanke in die $\varphi = 0$ -Halbebene projiziert, d.h. die kartesischen Koordinaten (x, y, z) werden in zylindrische Koordinaten (r, φ, z) transformiert und die Koordinate $\varphi = 0$ gesetzt. Damit ergibt sich eine ebene Abbildung der Zahnflanke, wie sie für Kegelräder üblich ist. Das Ergebnis aus dem ersten Versuch (Textur Scan) zeigt die reinen Abweichungen aus Kalibrierung und Texturierung. Diese liegen in einem Bereich von 0,077 bis 0,155 mm bei einem Mittelwert über alle Referenzpunkte von 0,106 mm. Die Abweichungen sind dabei gleichmäßig über die gesamte Flanke verteilt. Die mit dem zweiten Versuch (Textur Soll-Geometrie) erfassten Abweichungen zeigen zusätzlich den Fehler, der durch die Formabweichung und Passung der Schablone entsteht. Dabei fallen die mittleren Abweichungen der einzelnen Referenzpunkte in einen Bereich von 0,123 bis 0,224 mm und verteilen sich gleichmäßig über die Flanke. Die Gesamtgenauigkeit der Textur (Mittelwert über alle Referenzpunkte) beträgt letztlich 0,156 mm mit einer Präzision von 0,029 mm.

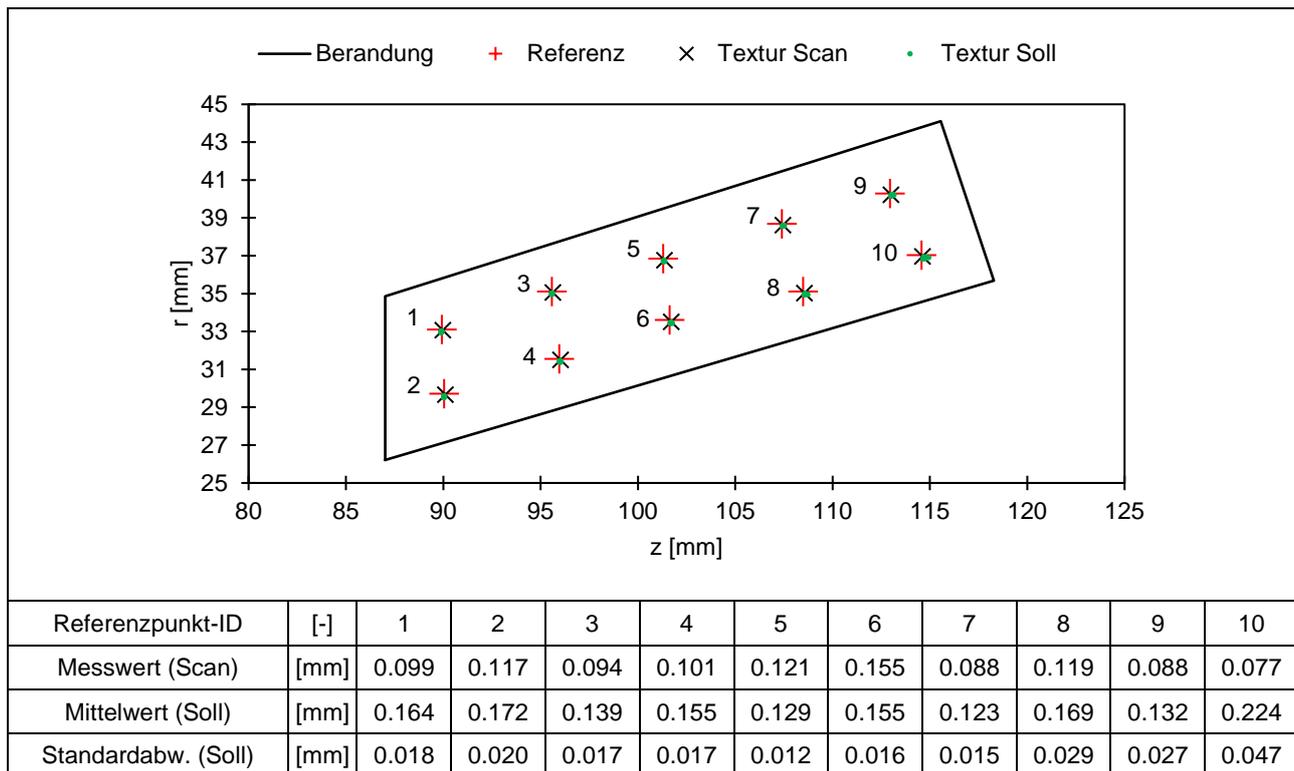


Bild 7: Texturgenauigkeit aller Referenzpunkte für n = 12 Messungen

Damit lässt sich insgesamt zeigen, dass mit Hilfe der Flankentextur zuverlässige und für eine Auswertung von Tragbildern und Flankenschäden hochgenaue Aussage getroffen werden kann.

6 Analyse und Dokumentation in der Tragbildprüfung

Wie in Abschnitt 1 bereits dargelegt, ist die Tragbildprüfung ein wichtiger Bestandteil der Qualitätssicherung bei der Montage von Kegelradverzahnungen.

Für das vorliegende Paper wurden die Tragbilder einer Kegelradverzahnung (Bild 8), versuchstechnisch ermittelt und mit einer Bereichsdetektion ausgewertet. Hierzu wurde unter Anwendung des neuen Messverfahrens die Zahnflankengeometrie des Ritzels mit den tatsächlichen Tragbildern texturiert (Bild 9, links). Anschließend wurde die Tragbildkontur (rote Markierung) anhand der Messaufnahme detektiert. Für das vorliegende Beispiel wurde die Kontur mit einem Polygonwerkzeug manuell gesetzt. Abschließend wurde die Kontur auf die Simulationsergebnisse übertragen, wodurch ein direkter Abgleich von Tragbildform und -lage möglich wird.



Bild 8: Tragbildprüfung am Ritzel, Tuschiertragbild (links), Lasttragbild (rechts)

Die Auswertung des Tuschiertragbildes (Bild 9, oben) zeigt eine hohe Übereinstimmung bezüglich der trapezförmigen Erscheinung, d.h. die Fertigungsabweichung der Flankengeometrie befindet sich in einem akzeptablen Bereich. Jedoch weicht die Lage des Tragbildes ab, welche unmittelbar aus einer falschen Einbaulage von Ritzel zu Tellerrad resultiert. Das Ergebnis für das Lasttragbild (Bild 9, unten) zeigt ebenfalls eine gute Korrespondenz zur ellipsenförmigen Gestalt des berechneten Tragbildes. Die Lageabweichung wird auch im Lasttragbild deutlich. Auf Grundlage der festgestellten Lageabweichungen und unter Zuhilfenahme der Simulation besteht perspektivisch die Möglichkeit konkrete Einbaumaßkorrekturen wie in [2] dargelegt zu berechnen und diese direkt in der Montage des Radsatzes zu berücksichtigen.

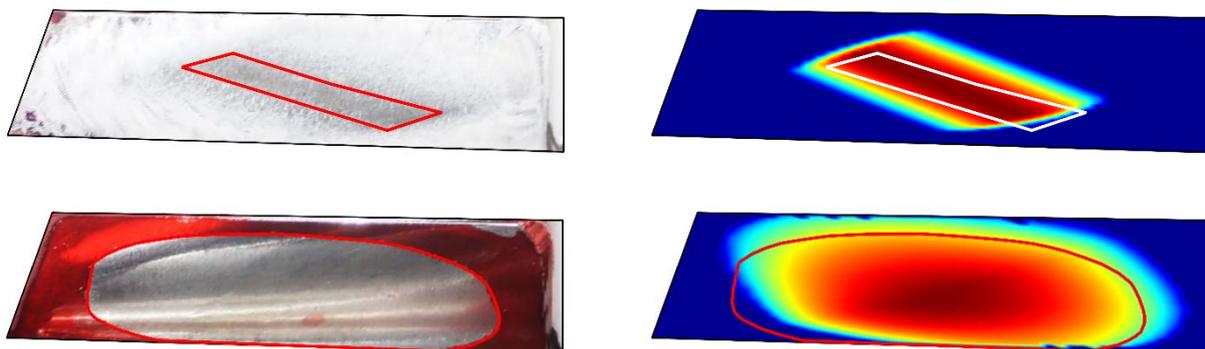


Bild 9: Ergebnis der Tragbildprüfung, vermessenes Tragbild (links), Simulation (rechts)

In Bezug auf die Dokumentation der Tragbilder ist es nunmehr möglich diese in einheitlicher Form und unabhängig von der Kameraperspektive der Messaufnahme abzulegen. Weiterhin ist auch die Übertragbarkeit auf die Dokumentation von Flankenschäden gewährleistet.

7 Zusammenfassung und Ausblick

In der Produktentwicklung von Getrieben ist die Analyse von Verzahnungen ein wichtiger Bestandteil. Das vorliegende Paper beschäftigt sich dabei mit der Tragbildprüfung und Schadensbefundung an Kegelradverzahnungen und der damit einhergehenden Problemstellung der Verknüpfung von Simulations- und Versuchsdaten. Hierbei besteht die Herausforderung darin, die versuchstechnisch ermittelten Trag- und Schadensbilder mit Simulationsergebnissen vergleichbar zu machen um daraus Schlussfolgerungen für den Produktentwicklungsprozess zu ziehen. Darüber hinaus ist es das Ziel mit Hilfe der Verknüpfung die verschiedenen Datenformate aus Versuch und Simulation in einem einheitlichen Format zu bündeln und so gezielt zu dokumentieren.

Der hier vorgestellte Lösungsansatz basiert auf der photogrammetrischen Erfassung der Zahnflankentextur, sodass ein oder mehrere Aufnahmen des Tragbildes unmittelbar mit der 3D-Geometrie der Zahnflanke verknüpft und mit den Simulationsdaten direkt verglichen werden können. Ein wesentlicher Vorteil des Verfahrens ist der Einsatz handelsüblicher Kamerasysteme, wodurch kein spezielles Messsystem erforderlich ist. Um die projektive Transformation vom Bild- in den Objektraum zu ermitteln, wird eine eindeutige Punktkorrespondenz zwischen fotografischer Tragbilderfassung und Zahnflanke benötigt. Diese wird mit Hilfe einer Messschablone realisiert, welche basierend auf der exakten Verzahnungsgeometrie automatisch berechnet und mittels Rapid-Prototyping-Verfahren gefertigt werden kann. Ausgehend von der Textur erfolgt dann die Auswertung des Tragbildes in Bezug auf die Simulationsdaten. Der Prozessablauf wurde als eigenständiges Software-Werkzeug umgesetzt, um einen durchgängigen Verfahrensablauf zu gewährleisten.

Zusätzlich zur Erläuterung des Messverfahrens wird die Genauigkeit der Texturierung untersucht. Dabei werden systematische und zufällige Fehlerquellen dargestellt und quantitativ erfasst, mit dem Ergebnis, dass mit Hilfe der Flankentextur eine zuverlässige und für eine Auswertung von Tragbildern und Flankenschäden hochgenaue Aussage getroffen werden kann. Mit dieser Erkenntnis wird das Verfahren abschließend auf das Beispiel einer Tragbildprüfung angewendet.

Zusammenfassend wird mit dem vorliegenden Paper ein neuartiges Mess- und Analyseverfahren vorgestellt, mit dem es möglich wird Flankentexturen und Simulationsdaten direkt und präzise miteinander zu vergleichen und zusätzlich die

Analyseergebnisse in einem einheitlichen Format abzulegen. Diese Ergebnisse können Grundlage für eine abgesicherte Montage von Verzahnungen, die Untersuchung von Tragfähigkeiten sowie die Validierung von Simulationsmodellen sein. Zudem erlaubt die hohe Flexibilität und Zugänglichkeit des Messsystems einen Einsatz von der Laborumgebung bis hin zum Getriebe im realen Umfeld.

Literatur

- [1] Müller, F.; Schlecht, B.: *FVA 223 XV BECAL-Tragbildvermessung*, Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V., Frankfurt am Main, Abschlussbericht 1343, Juli 2019.
- [2] Zhang, H.: *Fertigungsintegriertes Messsystem zur Qualitätsprüfung und -regelung in der Serienproduktion von Kegelradgetrieben*, 1. Auflage. Aachen: Apprimus Verlag, 2018.
- [3] Goebbelet, J.: *Tragbildprüfung von Zahnradgetrieben, eine Methode zur Qualitätsbeurteilung*, TH Aachen, Aachen, 1980.
- [4] Stadtfeld, H. J.: *Gleason bevel gear technology: the science of gear engineering and modern manufacturing methods for angular transmissions*. 2014.
- [5] Bartelt, V.; Pahud, C.; Rutschke, A.: *Verfahren und Vorrichtung zum optoelektronischen Ermitteln der Tragbilder an Zahnflanken von Zahnrädern*, DE19840969C2, 28-Nov-2002.
- [6] Merder, M.; Müller, F.; Schlecht, B.: *FVA 223 XII BECAL - Schädigungsfortschritt Zahnflanke*, Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V., Frankfurt am Main, Abschlussbericht 1277, Feb. 2018.
- [7] Stadtfeld, H. J.; Swanger, J. W.: *Digital imaging of tooth contact pattern*, US5610994A, 11-März-1997.
- [8] Luhmann, T.: *Nahbereichsphotogrammetrie: Grundlagen, Methoden und Anwendungen*, 3., völlig neu bearbeitete und erweiterte Auflage. Berlin: Wichmann, VDE-Verlag, 2010.
- [9] Haralick, B. M.; Lee, C.-N.; Ottenberg, K.; Nölle, M.: *Review and analysis of solutions of the three point perspective pose estimation problem*, Int J Comput Vision, Bd. 13, Nr. 3, S. 331–356, Dez. 1994.

Danksagung

Die Autoren danken der Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V. (FVA) für die Finanzierung des Forschungsprojektes, auf dem dieser Beitrag basiert.

(FVA 223 XXI Versuchsauswertung und -dokumentation für Industrie 4.0)

Betrachtung von Konfigurationsdateiformaten und GUI-Frameworks für Programme zur Aufbereitung von Austauschdateien

Johannes Mohr, Claudia Kleinschrodt, Pascal Diwisch, Frank Rieg

Lehrstuhl für Konstruktionslehre und CAD, Universität Bayreuth

Universitätsstraße 30, 95447 Bayreuth

Email: johannes.mohr@uni-bayreuth.de; Internet: <http://www.lscad.de>

Inhalt: *Obwohl qualitativ hochwertige Daten die Basis für die Realisierung der Vision Industrie 4.0 darstellen, sehen sich Anwender immer noch mit immensen Problemen konfrontiert, die einer einheitlichen und konsistenten Informationsweitergabe entgegenstehen. Ein Programm zur Aufbereitung von Austauschdateien stellt eine praktikable Lösung dar, um die Qualität der Datenübermittlung zu validieren und zu verbessern. Um die Benutzungsfreundlichkeit zu optimieren, muss die Schnittstelle zwischen dem Programm und dem Anwender bestmöglich gestaltet sein. Ziel der Arbeit ist es, etablierte Konfigurationsdateiformate und GUI-Frameworks methodisch miteinander zu vergleichen und die jeweils optimale Lösung zu ermitteln.*

Stichwörter: *Benutzungsfreundlichkeit, Datenaustausch, GUI-Framework, Industrie 4.0, Konfigurationsdateiformat, Nutzwertanalyse, Softwareentwicklung*

Consideration of configuration file formats and GUI-frameworks for programs for the preparation of exchange files

Abstract: *Although high quality data is the basis for the realisation of the vision Industry 4.0, users are still confronted with immense problems that prevent a uniform and consistent information transfer. A program for the preparation of exchange files represents a practicable solution to validate and improve the quality of the data transfer. To optimise the usability, the interface between the program and the user must be designed in the best way possible. The goal of this thesis is to methodically compare established configuration file formats and GUI frameworks and to determine the optimal solution in each case.*

Keywords: *Configuration file format, data exchange, GUI-framework, Industry 4.0, software development, usability, utility analysis*

1 Einführung

Die Industrie befindet sich bereits seit Jahren an der Schwelle zu einer vierten industriellen Revolution. Ziel der Vision Industrie 4.0 ist die Steigerung der Produktivität durch eine intelligente Kommunikation und Vernetzung verschiedener Systeme und Anlagen [1]. Um eine konsistente und effiziente Informationsübermittlung zu gewährleisten, muss eine ausreichende Datenqualität der Austauschdateien sichergestellt werden. Jedoch sehen sich Nutzer mit Herausforderungen konfrontiert, die einem kontinuierlichen und effizienten Austausch entgegenstehen [2]. Die Vielzahl an zur Verfügung stehenden Systemen verschiedener Hersteller und unternehmensspezifischen Anforderungen erschweren eine fehlerfreie Informationsweitergabe. Außerdem existiert eine große Menge diverser Austauschformate, die in den Systemen zum Teil unterschiedlich implementiert sind. Beispielsweise werden mit STEP (Standard for the Exchange of Product Model Data) oder STL (Surface Tessellation Language) geometrische Objekte, wie Punkte, Koordinatensysteme oder Konturen übertragen. JPEG (Joint Photographic Experts Group) oder PNG (Portable Network Graphics) werden genutzt, um Bildinhalte auszutauschen und PDF (Portable Document Format) oder IO (CPIO Compressed Format Archive), um Dokumentationen zu übertragen [3]. Entsprechend gibt es eine Reihe weiterer Austauschformate.

Die Vielzahl an unterschiedlichen Problemstellen legt nahe, ein Aufbereitungsprogramm zu entwickeln, dessen Fokus auf Anpassbarkeit liegt. Vom Anwender editierbare Konfigurationsdateien ermöglichen eine Berücksichtigung von systembezogenen Eigenheiten, unterschiedlichen Austauschformaten sowie speziellen Bedürfnissen einer Branche oder eines Anwenders. Der Ablauf des Programms aus Nutzerperspektive ist in Bild 1 dargestellt. Ein Grobkonzept ist teilweise bereits in [2] und [4] veröffentlicht.

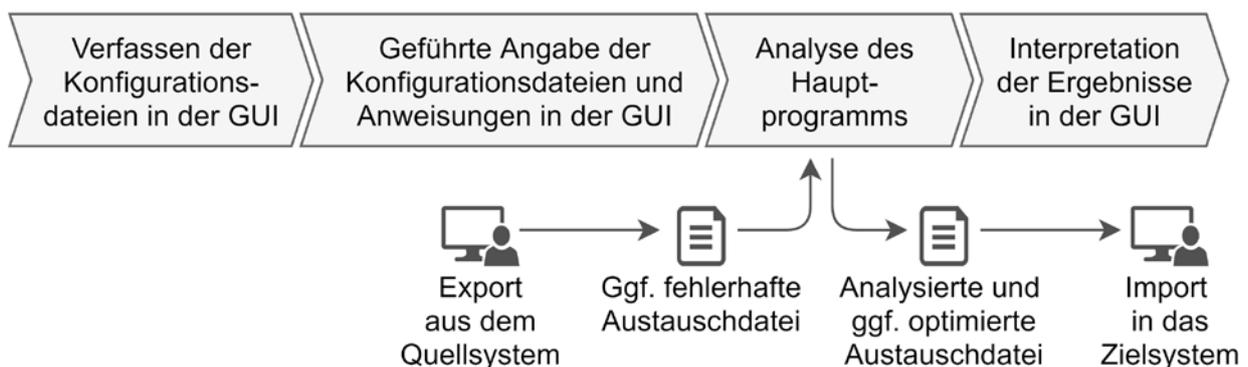


Bild 1: Programmablauf aus Nutzerperspektive [2]

Aus Nutzerperspektive stellen die Konfigurationsdateien und die Oberfläche (Englisch: Graphical User Interface, kurz: GUI) die wichtigsten Komponenten dar, da diese die Schnittstelle zwischen dem Nutzer und dem Hauptprogramm repräsentieren. In den Konfigurationsdateien hinterlegt der Nutzer die Zusammensetzung und die Bedingungen an die Objekte, wie zum Beispiel bestimmte Geometrien in STEP-Dateien, die in den Austauschdateien überprüft und verbessert werden. Die Konfigurationsdateien können sehr umfangreich werden. Dabei muss jedes einzelne Zeichen korrekt angegeben werden. Durch einen angepassten Editor, der in der GUI integriert ist, wird der Nutzer beim Erstellen der Konfigurationsdateien unterstützt. Durch die individuelle Entwicklung des Editors können Module integriert werden, die speziell auf den Kontext abgestimmt sind. Zusätzlich hilft die GUI bei der Auswahl der benötigten Konfigurationsdateien, bei der Erstellung der Anweisungen für das Hauptprogramm und bei der Anzeige der Ergebnisse.

Das Hauptprogramm bietet verschiedene Funktionen. Einerseits können Objekte in Austauschdateien auf ihr Vorhandensein überprüft und ergänzt werden, andererseits kann die Kompatibilität kontrolliert werden. Bevor die fehlerhafte Datei in ein Zielsystem importiert wird, können mangelhafte Informationen ergänzt beziehungsweise angepasst werden. Näheres hierzu kann [2] entnommen werden.

Für das Abbilden der Informationen in Konfigurationsdateien existieren eine Reihe unterschiedlicher Formate und für das Erstellen einer GUI eine Vielzahl verschiedener Frameworks. Ziel des vorliegenden Forschungsbeitrags ist es, geeignete Konfigurationsdateiformate und GUI-Frameworks anhand verschiedener Kriterien, die für die Entwicklung eines Programms zur Aufbereitung von Austauschdateien von zentraler Bedeutung sind, zu bewerten und die jeweils beste Lösung zu ermitteln.

2 Grundlagen von Konfigurationsdateiformaten

Konfigurationsdateien sind Dateien, in welchen Einstellungen und Informationen gespeichert werden, die für den Ablauf eines Programms benötigt werden. Für das Hinterlegen der Daten haben sich eine Reihe verschiedener Formate durchgesetzt. Im Rahmen dieses Beitrags ist die Syntax eines Formats, also die Form wie die Daten hinterlegt werden, untersucht. Die Semantik, also die Bedeutung der Informationen, wird separat gesehen. Im Folgenden sind binäre Formate nicht näher betrachtet, da die Dateien von den Nutzern selbst geschrieben werden. Es sind lediglich Formate, die eine UTF-8 (Universal Coded Character Set Transformation Format) Kodierung verwenden, die von Menschen

lesbar sind, untersucht. Eine Recherche ergab, dass die UTF-8 kompatiblen und frei nutzbaren Formate JSON (JavaScript Object Notation), XML (Extensible Markup Language) und YAML (YAML Ain't Markup Language) weitreichend verbreitet und etabliert sind. Alle genannten Formate können übliche Datentypen wie Zeichenketten, Ganz- oder Gleitkommazahlen abbilden und sind tendenziell dazu geeignet, die geforderten Informationen darzustellen.

Bei XML handelt es sich um ein deskriptives Markup (Textauszeichnung) Format. Die hinterlegten Informationen werden mit Tags (Auszeichnungselemente) umschlossen, die die Daten näher spezifizieren. Tags werden durch „<“ und „>“ eingegrenzt [5]. Die Daten in YAML- und JSON-Dateien werden als Schlüssel-Wert-Paare gespeichert [6] [7].

In Tabelle 1 sind jeweils die gleichen Informationen in den ausgewählten Formaten abgebildet. Es ist der allgemeingültige Aufbau eines Koordinatensystems für das Überprüfen und Verbessern einer STEP-Austauschdatei auf Basis von [8] angegeben.

Beim Verarbeiten einer Konfigurationsdatei wird auch von Parsen gesprochen. Demnach wird ein Parser dazu genutzt, Konfigurationsdateien zu interpretieren. Genauer wird der Vorgang des Interpretierens der Informationen aus einer Datei als Deserialisieren beziehungsweise das Überführen in eine Datei als Serialisieren bezeichnet [9].

Tabelle 1: JSON (oben), XML (mittig) und YAML (unten) Beispiel [8]

<pre>{ "itemDefinitions": [{ "item": "coordinate_system", "data": [" ref1~ENTITY =CARTESIAN_POINT(NAME , (NUMBER , NUMBER , NUMBER));", " ref2~ENTITY =DIRECTION(NAME , (NUMBER , NUMBER , NUMBER));", " ref3~ENTITY =DIRECTION(NAME , (NUMBER , NUMBER , NUMBER));", " ~ref0 =DIRECTION(NAME , (NUMBER , NUMBER , NUMBER));"] }] }</pre>
<pre><itemDefinitions> <itemDefinition> <item>coordinate_system</item> <definition> <data> ref1~ENTITY =CARTESIAN_POINT(NAME , (NUMBER , NUMBER , NUMBER));</data> <data> ref2~ENTITY =DIRECTION(NAME , (NUMBER , NUMBER , NUMBER));</data> <data> ref3~ENTITY =DIRECTION(NAME , (NUMBER , NUMBER , NUMBER));</data> <data> ~ref0 =DIRECTION(NAME , (NUMBER , NUMBER , NUMBER));</data> </definition> </itemDefinition> </itemDefinitions></pre>
<pre>- itemDefinitions: - item: coordinate_system data: - " ref1~ENTITY =CARTESIAN_POINT(NAME , (NUMBER , NUMBER , NUMBER));" - " ref2~ENTITY =DIRECTION(NAME , (NUMBER , NUMBER , NUMBER));" - " ref3~ENTITY =DIRECTION(NAME , (NUMBER , NUMBER , NUMBER));" - " ~ref0 =DIRECTION(NAME , (NUMBER , NUMBER , NUMBER));"</pre>

3 Grundlagen von GUI-Frameworks

Eine Oberfläche einer Software zeichnet sich durch die Interaktion des Anwenders mit grafischen Elementen aus. Im Gegensatz hierzu stellt die Kommandozeile (Englisch: Command Line Interface, kurz: CLI) eine Mensch-Maschine-Schnittstelle dar, bei der der Anwender Befehle in Form von Text angibt. Durch hilfegebende Elemente, wie eine gezielte Führung durch ein Programm, Infotexte oder einer flexiblen Anordnung von Steuerelementen kann die Benutzungsfreundlichkeit einer Anwendung, die durch eine GUI gesteuert wird, deutlich erhöht werden.

Es existieren unterschiedliche Frameworks, die für die Programmierung einer Oberfläche genutzt werden können. GUI-Frameworks sind vorgefertigte Bibliotheken für die Gestaltung einer GUI. Die Bibliotheken stellen unterschiedliche Elemente zur Verfügung. Darunter fallen Steuerelemente, wie Buttons oder Checkboxes, Multimedia-Komponenten, Layouts oder Formulare. Die Frameworks bieten ein einheitliches Programmiermodell, um Oberflächen im Browser, auf dem Desktop oder auf mobilen Endgeräten anzuzeigen [10]. Das Programm wird mit der universellen Programmiersprache C# umgesetzt. Im Folgenden sind die von Microsoft entwickelten Frameworks WinForms (Windows Forms), WPF (Windows Presentation Foundation) und UWP (Universal Windows Platform) für die Programmierung einer Oberfläche untersucht, die in Verbindung mit C# genutzt werden können [10].

4 Auswahl durch Nutzwertanalysen

Für die Priorisierung der in Betracht gezogenen Formate und GUI-Frameworks werden Nutzwertanalysen eingesetzt. Die Analysen sind getrennt voneinander durchgeführt und unabhängig voneinander zu betrachten, da jedes Format in jedem Framework genutzt werden kann. Die Nutzwertanalyse ist ein systematisches Verfahren bei dem zunächst die relevanten Kriterien festgelegt und mit einer individuellen Wichtung versehen werden [11]. Die hier getroffene Auswahl und aus Beobachtungen der Industrie gewonnenen Wichtungen der Kriterien entsprechen den maßgeblichen Faktoren, die bei der Entwicklung eines Programms zur Aufbereitung von Austauschdateien von zentraler Bedeutung sind [2]. Im nächsten Schritt werden die Alternativen hinsichtlich der Kriterien auf einer diskreten Skala von 1 bis 5 bewertet, wobei 1 einer mangelhaften und 5 einer optimalen Lösung entspricht. Im Anschluss werden die gewichteten Einzelbewertungen errechnet und je Alternative

aufsummiert. Die Alternative mit der größten Summe entspricht der bestmöglichen Option in Bezug auf die zugrunde gelegten Kriterien [11].

Tabelle 2 zeigt die Nutzwertanalyse für die Auswahl des Konfigurationsdateiformats. Die Basis, um den Speicherbedarf zu bewerten, ist jeweils eine Datei im JSON-, XML- und im YAML-Format. Auf Grundlage von [8] sind 150 Objekte hinterlegt, die für die Routinen des Hauptprogramms benötigt werden. Zur Gegenüberstellung der verschiedenen Alternativen sind im Folgenden relative Werte angegeben, um eine allgemeingültige Vergleichbarkeit sicherzustellen.

Die JSON- und XML-Beispieldatei weisen eine ähnliche Größe auf, wohingegen die XML-Datei einen, um mehr als ein Drittel, höheren Speicherbedarf benötigt. Die Abweichung ist vor allem auf die Redundanz der Informationen in den Tags zurückzuführen. Die vergleichsweise geringe Informationsdichte führt ebenfalls dazu, dass XML weniger verständlich und schwerer angepasst werden kann. Durch klar definierte Regeln, die schnell erlernt werden können, sowie dem Verzicht auf Tags, kann JSON gut verstanden und angepasst werden. JSON stellt eine definierte Untermenge von YAML dar. Letzteres bietet an verschiedenen Stellen mehrere Alternativen, um die gleichen Informationen darzustellen. Dies führt gegebenenfalls zu Fehlinterpretationen und Verständlichkeitseinbußen. Werden die Regeln jedoch beherrscht, kann YAML effizient angepasst werden. Mit Hilfe von JSON und YAML lassen sich die gleichen Informationen hinterlegen, wohingegen XML einen höheren Umfang bietet [5–7].

In Bezug auf die Verarbeitbarkeit wird auf etablierte und wenig fehleranfällige Parser zurückzugreifen. Generell stehen in den bekanntesten Programmiersprachen Bibliotheken zum Verarbeiten von JSON und XML zur Verfügung, weshalb die Portierbarkeit als hoch eingestuft wird. YAML ist im Vergleich weniger verbreitet. Beispielsweise bietet Microsoft optimierte Parser für JSON und XML [9], die in Verbindung mit der verwendeten Programmiersprache C# genutzt werden können, wohingegen für YAML lediglich Eigenentwicklungen von Drittanbietern zur Verfügung stehen [6]. Der native Support von XML und JSON spiegelt sich ebenfalls in der Schnelligkeit der Verarbeitung wieder. Die erstellten Konfigurationsdateien werden 200-mal deserialisiert und die Zeit wird mit dem Systemdiagnose-Tool von Microsoft gemessen [12]. Im Mittel benötigen der XML- und der JSON-Parser nahezu die gleiche Zeit, wohingegen das Parsen der YAML-Datei das Neunfache der Zeit in Anspruch nimmt.

Die Validierbarkeit bezieht sich sowohl auf die Syntax, als auch auf die Semantik der abgebildeten Informationen. Die Syntax lässt sich überprüfen, indem die Dateien geparkt werden und die ausgelösten Ausnahmen abgefangen und interpretiert werden. Die Semantik kann mit vordefinierten Schemata überprüft werden. Tests haben gezeigt, dass die Validierung von XML und JSON effizient umgesetzt werden kann. Die verschiedenen Möglichkeiten, wie Daten in eine YAML Datei geschrieben werden können, erschweren die Validierung des Formats.

Tabelle 2: Nutzwertanalyse der Konfigurationsdateiformate

Kriterium	Wichtung	JSON		XML		YAML	
		Bewertung	Gewichtet	Bewertung	Gewichtet	Bewertung	Gewichtet
Speicherbedarf	7%	4	0,28	2	0,14	5	0,35
Verständlichkeit	18%	5	0,90	3	0,54	4	0,72
Anpassbarkeit	13%	4	0,52	3	0,39	5	0,65
Umfang	18%	4	0,72	5	0,90	4	0,72
Verarbeitbarkeit	13%	5	0,65	4	0,52	2	0,26
Portierbarkeit	7%	5	0,35	5	0,35	3	0,21
Schnelligkeit	10%	4	0,40	5	0,50	1	0,10
Validierbarkeit	14%	4	0,56	5	0,70	2	0,28
Summe	100%		4,38		4,04		3,29

Die Auswahl und das Bearbeiten der Konfigurationsdateien erfolgt in einer GUI. Tabelle 3 zeigt eine Gegenüberstellung der in Frage kommenden Frameworks. Anhand jeder Bibliothek wird ein Basiseditor programmiert, mit dem die JSON-, XML- und YAML-Beispieldateien angezeigt und bearbeitet werden können. Alle betrachteten Frameworks sind frei zugänglich und bieten Steuerelemente (WinForms/ WPF: RichTextBox, UWP: RichEditBox) mit denen die Dateiinhalte formatiert angezeigt und editiert werden können. Die Komponenten der WPF und UWP sind neuer und bieten mehr Designmöglichkeiten als die WinForms-Komponente. Generell ist die Auswahl an zur Verfügung stehenden WPF- und UWP-Steuerelementen größer und sie können zudem dynamisch angeordnet werden. In Hinblick auf die Geschwindigkeit der Verarbeitung ist die WinForms-RichTextBox am effizientesten. Um diese Geschwindigkeit zu messen, wird die JSON-Datei in die verschiedenen Steuerelemente geladen und die Zeit mit dem Systemdiagnose-Tool von Microsoft gemessen [12]. Nach 200 Ladevorgängen ergibt sich bei der Verwendung der WPF und UWP im Mittel eine, um die Faktoren 156 (WPF) und 25 (UWP), längere Bearbeitungszeit als bei WinForms. Beim benötigten Prozess- und Hauptspeicher zeigt sich die gleiche Reihenfolge. Die WinForms-Anwendung benötigt den geringsten Prozessspeicher, wogegen die WPF-Anwendung den doppelten und das UWP-Programm

den dreifachen Prozessspeicher in Anspruch nehmen. Demgegenüber ist der benötigte Hauptspeicher des WPF-Programms bedingt höher verglichen mit dem WinForms-Programm. Die UWP-Oberfläche benötigt den vierfachen Hauptspeicher.

In Bezug auf die praktische Relevanz zeigt sich, dass sowohl WinForms, vor allem wegen der Geschwindigkeit, als auch die WPF weit verbreitet sind. Da die UWP lediglich auf Geräten mit Windows 10 lauffähig ist, die WPF und WinForms abwärtskompatibel sind und zudem die Umstellung bestehender Applikationen aufgrund fehlender Features erschwert wurde, hat sich die UWP nicht als führende Plattform durchgesetzt [13].

Tabelle 3: Nutzwertanalyse der GUI-Frameworks

Kriterium	Wichtung	WinForms		WPF		UWP	
		Bewertung	Gewichtet	Bewertung	Gewichtet	Bewertung	Gewichtet
Verfügbarkeit	12%	5	0,60	5	0,60	5	0,60
Anzeigbarkeit	17%	4	0,68	5	0,85	5	0,85
Lauffähigkeit	17%	5	0,85	5	0,85	1	0,17
Anpassbarkeit	10%	1	0,10	5	0,50	5	0,50
Design	17%	2	0,34	4	0,68	5	0,85
Schnelligkeit	12%	5	0,60	2	0,24	3	0,36
Prozessspeicher	6%	5	0,30	4	0,24	3	0,18
Hauptspeicher	3%	5	0,15	4	0,12	2	0,06
Relevanz	6%	4	0,24	5	0,30	2	0,12
Summe	100%		3,86		4,38		3,69

Werden beide Nutzwertanalysen betrachtet, lässt sich festhalten, dass sich für das Abbilden der programmrelevanten Informationen das JSON-Format am besten eignet. Für die Anzeige und das Editieren der Dateien kann die WPF genutzt werden. Um den Nachteil der verhältnismäßig langsamen Verarbeitung einer JSON-Datei in der WPF-RichTextBox zu kompensieren, kann die WinForms-RichTextBox in der WPF-Oberfläche implementiert werden. Dadurch können die Vorteile beider Frameworks vereint werden, um den größten Nutzen für den Anwender zu generieren.

5 Exemplarische Implementierung

Im Folgenden ist auf Basis der zuvor getroffenen Auswahl, eine exemplarische Oberfläche auf Basis der WPF für die geführte Auswahl und die Bearbeitung der JSON-Konfigurationsdateien vorgestellt. Zusätzlich dient die Oberfläche für die Definition der Anweisungen und die Ergebnisanzeige.

Grundsätzlich können die Elemente einer WPF-GUI frei platziert werden. Das zugrunde gelegte Layout und die Farbgebung orientieren sich an den validierten Entwürfen von

Microsoft und der DIN ISO 9241-12 („Ergonomische Anforderungen für Bürotätigkeiten mit Bildschirmgeräten – Teil 12: Informationsdarstellung“) [14] [15].

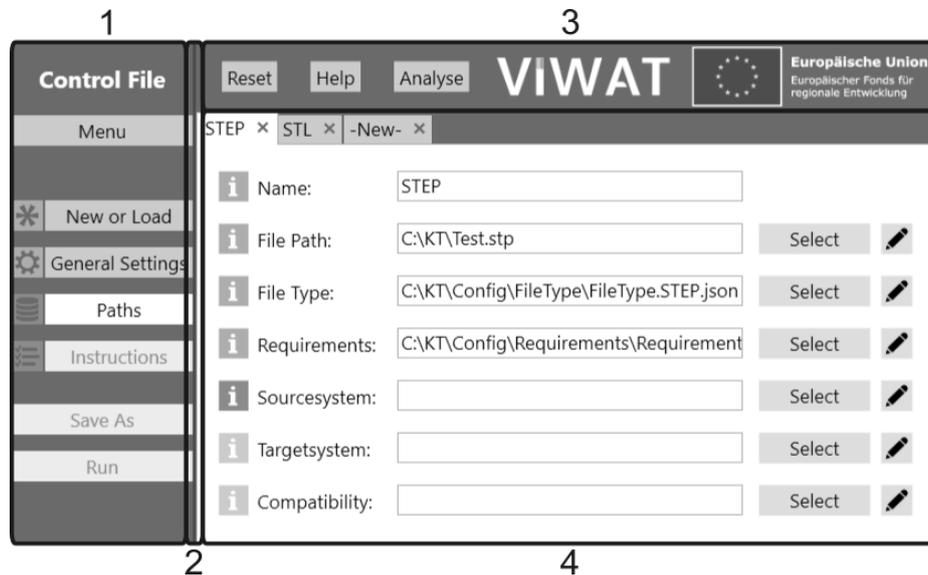


Bild 2: GUI für die geführte Auswahl der Konfigurationsdateien (1: Navigationsleiste, 2: Trennelement, 3: Optionsleiste, 4: Inhalt)

Bild 2 zeigt die Oberfläche für die geführte Auswahl der Konfigurationsdateien. Die GUI ist in verschiedene Bereiche unterteilt (siehe Bild 2). Der Erste dient als Navigationsleiste. Neben einem Menü-Button und die Möglichkeit die getroffenen Einstellungen zu speichern, können verschiedene aufeinanderfolgende Aufgaben angewählt werden. Jedem Schritt ist ein farbiges Quadrat vorangestellt, dass den jeweiligen Status widerspiegelt. Als Statusfarben werden Rot, Gelb und Grün gewählt. Nutzer mit einer Rot-Grün-Schwäche können die Farbgestaltung über das Menü anpassen. Icons erhöhen die Wiedererkennbarkeit. Der Anwender wird zusätzlich unterstützt, indem er durch das Programm geführt wird. Dementsprechend kann ein Button erst dann angewählt werden, wenn alle zuvor benötigten Informationen korrekt angegeben sind.

Das Trennelement im Bereich 2 kann genutzt werden, um die Navigationsleiste in ihrer Größe zu ändern oder komplett auszublenden. Analog passen sich sämtliche Steuerelemente automatisch an, sobald die Größe des Fensters geändert wird.

In der Optionsleiste (Bereich 3) sind verschiedene Funktionen, unabhängig von dem gewählten Schritt in der Navigationsleiste, hinterlegt.

Im Bereich 4 wird der Inhalt des gewählten Schritts in der Navigationsleiste angezeigt. In Bild 2 werden exemplarisch die Konfigurationsdateien gewählt, die vom Hauptprogramm zur Aufbereitung einer STEP-Austauschdatei benötigt werden. Analog können über das Reitersystem weitere Konfigurationsdateien für das Analysieren und Optimieren anderer

Austauschdateien hinterlegt werden. Auch hier werden farbige Quadrate eingesetzt, die den jeweiligen Status wiedergeben. Wird der Cursor über einem Quadrat platziert, wird zudem ein individueller Informationstext angezeigt. Rechts neben den Auswahlbuttons (Select) kann direkt der native Editor aufgerufen werden. Ist kein Pfad zu einer Konfigurationsdatei angegeben, wird eine neue Datei erstellt und zur Bearbeitung im Editor geöffnet. Der Editor ist in Bild 3 dargestellt.

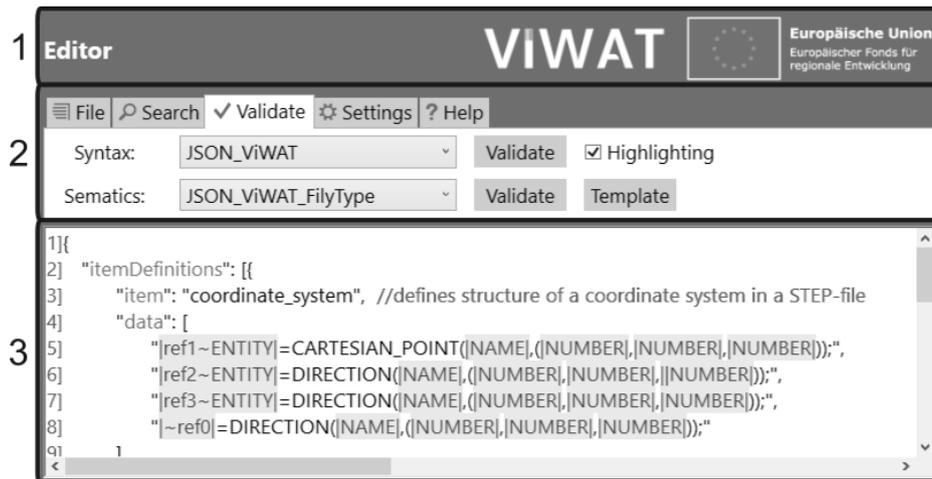


Bild 3: Angepasster Editor zum Erstellen und Bearbeiten der Konfigurationsdateien (1: Titelleiste, 2: Einstellungen, 3: RichTextBox)

Aufgrund der genannten Leistungsvorteile wird zum Anzeigen des Textes die WinForms-RichTextBox verwendet. Durch die Einbettung in WPF kann die GUI dynamisch variiert werden. Beispielsweise kann die Größe des Fensters, der adaptiven Steuerelemente und des angezeigten Textes kontinuierlich verändert werden.

Der Editor ist in verschiedene Bereiche unterteilt. Der Oberste stellt eine Titelleiste für Beschriftungen und Logos dar. Für eine übersichtliche Strukturierung können die Einstellungen über das Reitersystem im zweiten Bereich ausgewählt werden. Neben einer Suchfunktion für Schlagwörter oder Suchmuster (Reguläre Ausdrücke) und Hilfestellungen, bietet der Editor verschiedene Funktionen, die speziell an den Kontext angepasst sind. Beispielsweise können die Syntax und Semantik einer Konfigurationsdatei überprüft werden (siehe Bild 3). Tritt ein Fehler auf, wird unmittelbar eine Fehlermeldung durch den Parser angezeigt und explizit auf die inkorrekte Zeile verwiesen. Zusätzlich wird der Text im Bereich 3 nach der Bedeutung farblich hervorgehoben (Syntax Highlighting). Dabei werden nicht nur JSON typische Muster, wie zum Beispiel Schlüssel oder Werte, hervorgehoben, sondern zusätzlich spezifische Daten in Bezug auf den Kontext des Programms. Ein falsch formatierter Text lässt auf eine mangelhafte Eingabe schließen. Außerdem ist es möglich

eine Vorlage (Template) für eine Konfigurationsdatei erstellen zu lassen, die individuell angepasst werden kann.

6 Ergebnis und Ausblick

Im vorliegenden Beitrag wurden etablierte Konfigurationsdateiformate und GUI-Frameworks für Programme zur Aufbereitung von Austauschdateien verglichen und die jeweils optimale Alternative gesucht. Als Methode für die Entscheidungsfindung wurde die Nutzwertwertanalyse verwendet. Am höchsten bewertet wurden das JSON-Format und das WPF-Framework. Anhand einer exemplarischen Implementierung wurde zudem eine praktische Umsetzung der Ergebnisse beschrieben.

Die gewonnenen Erkenntnisse stammen aus dem Projekt ViWAT (Virtueller Werkzeugdaten Austausch Transformator), das durch den Europäischen Fonds für regionale Entwicklung gefördert wird [16]. Im Rahmen des Projekts wird die angesprochene Software zur Aufbereitung von Austauschdateien umgesetzt. Erste Befragungen zeigen, dass die getroffene Auswahl dazu geeignet ist, den Anforderungen gerecht zu werden. Es fehlen jedoch detaillierte Untersuchungen. Ein erster Ansatz bietet der verifizierte Fragebogen ISONORM 9241/110-S [17], anhand dessen gezielt die Benutzungsfreundlichkeit des Programms getestet und verglichen werden kann. Auch in Zukunft wird die Nachfrage an hochwertigen Daten steigen. Eine angepasste und validierte Softwarelösung bietet großes Potential, die Qualität von Austauschdateien zu verbessern.

Literatur

- [1] ROTH, Armin: Industrie 4.0 - Hype oder Revolution? In: ROTH, Armin (Hrsg.): *Einführung und Umsetzung von Industrie 4.0: Grundlagen, Vorgehensmodell und Use Cases aus der Praxis*. o. Aufl. Berlin Heidelberg: Springer, 2016, S. 1–15
- [2] KLEINSCHRODT, Claudia: *Analyse und Optimierung des Datenaustauschs von 3D-Modellen: am Beispiel der Übertragung von Werkzeugmodellen mittels STEP*. Bayreuth, Universität Bayreuth. 2019
- [3] DIN-NORMENAUSSCHUSS WERKZEUGE UND SPANNZEUGE: *DIN 26100: Container-Datei - Zusammenfassung verschiedener Produktdateien für den Datenaustausch*. o. Aufl. Berlin: DIN, 2017
- [4] KLEINSCHRODT, Claudia; MOHR, Johannes; ZIMMERMANN, Markus; RIEG, Frank: Konzeptionelles Design zur softwaregestützten Analyse und Modifikation von Produktdaten, Bd. 16. In: BRÖKEL, Klaus; NAGARAJAH, Arun; RIEG, Frank; SCHARR, Gerhard; STELZER, Ralph (Hrsg.): *Digitalisierung und Produktentwicklung*. o. Aufl. Bayreuth: Universität Bayreuth, 2018, S. 156–167

- [5] W3C: *Extensible Markup Language (XML) 1.0*. URL <https://www.w3.org/TR/1998/REC-xml-19980210> – Überprüfungsdatum 2020-05-26
- [6] YAML: *YAML Ain't a Markup Language*. URL <https://yaml.org/> – Überprüfungsdatum 2020-05-26
- [7] ECMA: *Standard ECMA-404: The JSON Data Interchange Syntax*. Genf: Ecma International, 2017
- [8] MOHR, Johannes; KLEINSCHRODT, Claudia; SIEGEL, Tobias; RIEG, Frank: Entwicklung einer Beschreibungssprache zur Analyse und Behebung von Datenaustauschproblemen, Bd. 19. In: CORVES, Burkhard; GERICKE, Kilian; GROTE, Karl-Heinrich; LOHRENGEL, Armin; MÜLLER, Norbert; NAGARAJAH, Arun; RIEG, Frank; SCHARR, Gerhard; STELZER, Ralph (Hrsg.): *Agilge Entwicklung physischer Produkte*. o. Aufl. Aachen: RWTH Aachen, 2019, S. 74–85
- [9] MICROSOFT: *Serialisierung (C#)*. URL <https://docs.microsoft.com/de-de/dotnet/csharp/programming-guide/concepts/serialization/> – Überprüfungsdatum 2020-05-26
- [10] MICROSOFT: *Auswählen Ihrer App-Plattform*. URL <https://docs.microsoft.com/de-de/windows/apps/desktop/choose-your-platform> – Überprüfungsdatum 2020-05-26
- [11] SCHLINK, Haiko: *Wirtschaftlichkeitsrechnung für Ingenieure: Grundlagen für die Entwicklung technischer Produkte*. 3. Auflage: Springer Gabler, 2019
- [12] MICROSOFT: *System.Diagnostics Namespace*. URL <https://docs.microsoft.com/de-de/dotnet/api/system.diagnostics?view=netcore-3.1> – Überprüfungsdatum 2020-05-27
- [13] FOLEY, Mary Jo: *Microsoft wants to close the UWP, Win32 divide with 'Windows Apps'*. URL <https://www.zdnet.com/article/microsoft-wants-to-close-the-uwp-win32-divide-with-windows-apps/> – Überprüfungsdatum 2020-05-20
- [14] MICROSOFT: *Seitenlayout*. URL <https://docs.microsoft.com/de-de/windows/uwp/design/layout/page-layout> – Überprüfungsdatum 2020-05-26
- [15] ISO: *Ergonomische Anforderungen für Bürotätigkeiten mit Bildschirmgeräten (DIN EN ISO 9241): Teil 12: Informationsdarstellung*. o. Aufl. Schweiz : ISO, 1998
- [16] LSCAD: *ViWAT: Virtueller Werkzeugdaten Austausch Transformator*. URL www.viwat.lscad.de – Überprüfungsdatum 2020-05-25
- [17] PRÜMPER, Jochen: Der Benutzungsfragebogen ISONORM 9241/10: Ergebnisse zur Reliabilität und Validität. In: LISKOWSKY, Rüdiger; VELICHKOVSKY, Boris M.; WÜNSCHMANN, Wolfgang (Hrsg.): *Software-Ergonomie '97: Usability Engineering: Integration von Mensch-Computer-Interaktion und Software-Entwicklung*. o. Aufl. Stuttgart: Teubner, 1997, S. 253–262

Nachhaltigkeit messbar machen – eine neue Kennzahl für Repurpose-Prozesse

Franz Wieck¹, Norina Schmidtseifer², Philipp Kronenberg³, Friederike Deuerler²,
Manuel Löwer¹

Bergische Universität Wuppertal (Gaußstr. 20, 42119 Wuppertal)

¹Fachgebiet Produktsicherheit und Qualität,

psq.uni-wuppertal.de

²Fachgebiet Werkstofftechnik,

lwt.uni-wuppertal.de

³Lehrstuhl für Neue Fertigungstechnologien und Werkstoffe

fuw.uni-wuppertal.de

Email: {wieck, schmidtseifer, pkronenberg, deuerler, loewer} @uni-wuppertal.de

Inhalt: Die Kreislaufwirtschaft bietet das Potenzial die ökologischen, sozialen und wirtschaftlichen Herausforderungen auf eine nachhaltigere Art und Weise zu lösen. Aktuell existierende Strategien und Ansätze helfen Maßnahmen und Möglichkeiten für einen Ausbau der Kreislaufwirtschaft zu entwickeln und zu identifizieren. Aktuell fehlen Methoden, die diese innovativen Ideen und Konzepte im Kontext der Nachhaltigkeit bewerten. Diese Arbeit untersucht die Möglichkeit, die strategischen Ziele der Kreislaufwirtschaft zu quantifizieren. Die Untersuchung wird theoretisch für den Repurpose-Prozess hergeleitet und anschließend anhand eines praktischen Beispiels validiert. Die Ergebnisse zeigen, dass sowohl der entwickelte Parameter als auch die verwendete Methode geeignet sind, den Repurpose-Prozess zu bewerten.

Stichwörter: Kreislaufwirtschaft, Nachhaltigkeit, Repurpose, Kennwert, Methode

Making sustainability measurable - a new parameter for repurposing processes

Abstract: The circular economy offers the potential to solve the ecological, social and economic challenges in a more sustainable way. Currently existing strategies and approaches help to develop and identify measures and opportunities for the expansion of the circular economy. Currently, there is a lack of methods to evaluate these innovative ideas and concepts in the context of sustainability. The paper examines the possibility of quantifying the strategic goals of the circular economy. The investigation is derived theoretically for the repurpose-process and subsequently validated by means of a practical example. The results show that both the parameter developed and the method used are suitable for evaluating the repurpose-process.

Keywords: Circular economy, Sustainability, Repurpose, Closed-loop economy, Value, Method

1 Einleitung

Der nachhaltige Umgang mit begrenzt vorhandenen Ressourcen ist gegenwärtig eine der größten Herausforderungen in Wissenschaft, Wirtschaft, Gesellschaft und Politik. Der

Ressourcenverbrauch wird durch die Zunahme der Weltbevölkerung weiter steigen. Im Jahr 2017 sind 90 Milliarden Tonnen Rohstoffe, dreimal mehr als im Jahr 1970, der Natur entnommen worden [1]. Dieser Anstieg verursacht weltweite Umweltprobleme wie den Klimawandel, Bodendegradation und den Verlust an biologischer Vielfalt. Eine wesentliche Strategie, den Rohstoff- und Ressourcenverbrauch wirksam zu reduzieren, stellt das Konzept der Kreislaufwirtschaft (engl. Circular Economy CE) dar. Aktuell fehlt es an übergreifenden Methoden zur Bewertung der ökologischen, sozialen und wirtschaftlichen Nachhaltigkeit von zirkulären Produkten und Geschäftsmodellen [2]. Einzelne Faktoren können bspw. durch eine Lebenszyklusanalyse bewertet werden. Um eine gesamtheitliche Nachhaltigkeitsbewertung von Wertschöpfungsketten durchführen zu können, müssen die sozialen, ökonomischen und ökologischen Auswirkungen betrachtet werden. Der hier vorgestellte Bewertungsansatz soll eine Möglichkeit aufzeigen, die ökologische Nachhaltigkeit eines Repurpose-Prozesses bewerten zu können.

2 Stand der Technik

Die **Kreislaufwirtschaft** ist ein Wirtschaftssystem, das auf der Werterhaltung von Produkten, Bauteilen oder Materialien beruht. Dieses Konzept scheint vielversprechend zu sein, um die globalen ökologischen, sozialen und wirtschaftlichen Herausforderungen auf eine nachhaltigere Art und Weise zu bewältigen. Es existieren eine Vielzahl an unterschiedlichen Strategien, um die Kreislaufwirtschaft umzusetzen. Reike et al. (2018) kategorisieren existierende Strategien in die Gruppen von 3 bis 10 R Strategien [3]. Dabei stehen die R's für *reduce*, *reuse*, *recycle* (reduzieren, wiederverwenden und recyceln) [4]. Eine feingliedrigere Unterteilung der Strategien (9-R oder 10-R) beschreiben [5–8].

Potting et al. (2017) definieren die 10-Rs wie folgt: *refuse*, *rethink*, *reduce*, *reuse*, *repair*, *refurbish*, *remanufacturing*, *repurpose*, *recycle* und *recover*. Und deren Ziele: ersetzende Services, weniger Stillstand, weniger Nutzung, Erhöhung der Lebensdauer, Wiederverwendung und Verwertung [8].

Reike et al. (2018) analysieren die historische Entwicklung in Wissenschaft und Technik zu Strategien der Kreislaufwirtschaft [3]. Sie kommen zu dem Ergebnis, dass es an geeigneten Methoden und Kennzahlen fehlt, um die Maßnahmen miteinander zu vergleichen. Darüber hinaus zeigt ihre Recherche, dass Repurpose im Vergleich zu den anderen Prozessen im wissenschaftlichen Diskurs kaum betrachtet wird und hauptsächlich von Künstlern und Designern angewandt wird.

Das Ziel des Repurpose-Prozesses ist es, aus verschlissenen oder defekten Produkten, Bauteile für neue Produkte bzw. Anwendungen zu verwenden. Laut Definition muss damit ein Funktionswechsel vom Ausgangsprodukt/-bauteil zum Endprodukt/-bauteil erfolgen. Der Repurpose-Prozess kann in Upcycling und Downcycling eingeteilt werden. Diese Einteilung soll an den folgenden Beispielen veranschaulicht werden.

1. **Upcycling:** Alte LKW-Planen werden zu Taschen und Rucksäcken verarbeitet [9].
2. **Downcycling:** Altkleider werden zu Putzlappen verarbeitet [10].

Das größte Potenzial und die wesentliche Herausforderung von Repurpose liegt in branchenübergreifenden Lösungen. Die Stärke begründet sich darin, dass es möglich ist, Industriebereiche mit viel Abfall- oder Verschleißprodukten zu nutzen, um die Branche wettbewerbsfähiger und nachhaltiger zu machen.

Die Herausforderung bei der Entwicklung von branchenübergreifenden Lösungen sind die unterschiedlichen Perspektiven auf das Produkt (Begriffe, Funktionsbeschreibung, Detaillierungsgrad) und die fehlenden Produktinformationen, um verschiedene Industriepartner zu vernetzen [11].

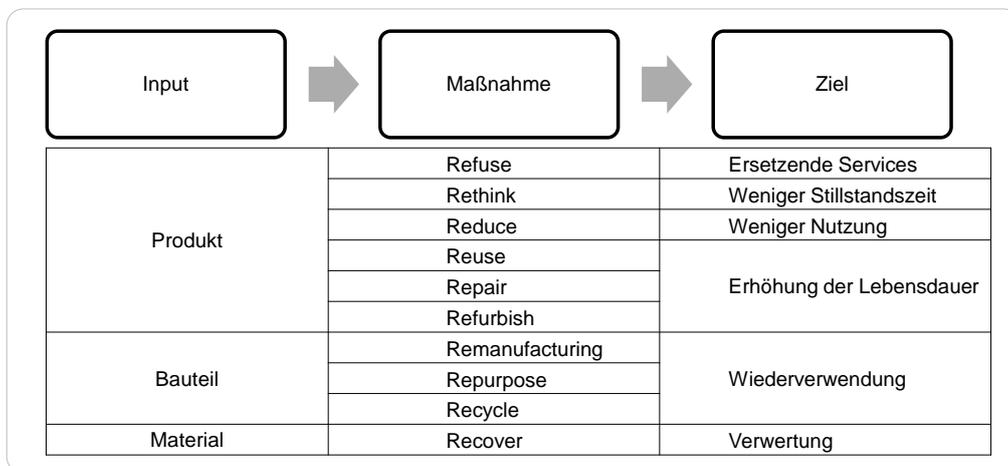


Abbildung 1: Prozessbeschreibung der 10R-Strategien durch Input, Maßnahme und Ziel

10R-Strategien: Prozessbeschreibung

Kennzahlen sind charakteristische Zahlenwerte, die Vorgänge, Zustände, Produkte o.ä. abstrahiert beschreiben und dadurch einen Vergleich ermöglichen [12]. Für die Ermittlung von Kennzahlen eignet sich eine Prozessbeschreibung aus Input, Maßnahme und Ziel oder Output. Auf Basis der Definition und der Beschreibung der 10R-Strategien können die Prozessbeschreibungen abgeleitet werden (Abbildung 1).

In Analogie zu dieser Übersicht stellt die nachfolgende Abbildung 2 den Repurpose-Prozess im Detail dar. Dabei ist der Input ein *altes Bauteil*, dann folgt die *Repurpose-Maßnahme* und das Ziel oder Output sind *neue Bauteile*. Damit aus einem bestehenden Bauteil neue Bauteile produziert werden können, müssen die neuen Bauteile in dem alten Bauteil (digital) *positioniert* und anschließend *herausgetrennt* sowie *nachbearbeitet* werden (Abbildung 2 unten). (Anmerkung: Es werden hier vereinfacht nur Bauteile und keine Fluide oder Gase betrachtet.)

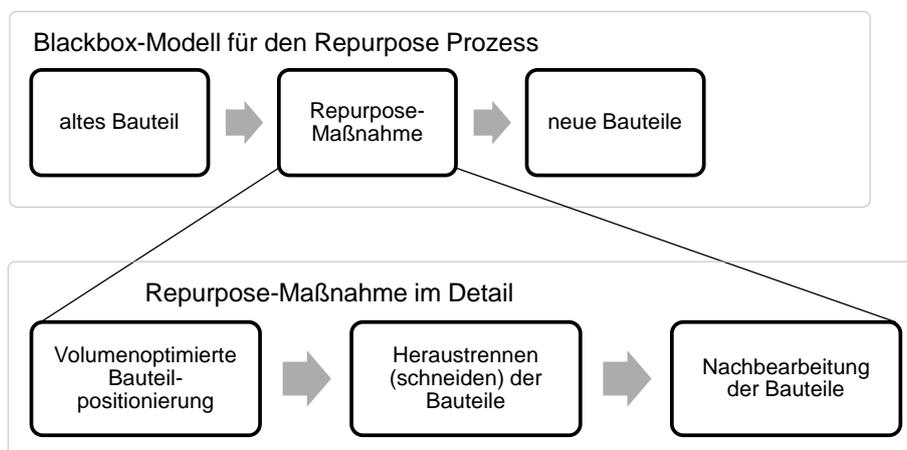


Abbildung 2: Beschreibung Repurpose-Prozess (Blackbox und Detail)

Für eine Energie- und Ressourceneffizienzbewertung reicht es nicht aus, den In- und Output zu betrachten.

Diese Aussage soll für den Repurpose-Prozess anhand der zwei Prozessbeschreibungen verdeutlicht werden. Die erste Prozessbeschreibung ist ein Black-Box-Modell, welches nur den In- und Output berücksichtigt [13]. Die Repurpose-Maßnahme wird nicht im Detail einbezogen und der damit einhergehende Aufwand (Energie) nicht berücksichtigt. Wird die Repurpose-Maßnahme im Detail betrachtet, so können die Teilschritte in *Bauteilpositionierung*, *Heraustrennen* und *Nachbearbeiten* aufgeteilt werden. Der damit verbundene Aufwand - im Besonderen durch die Prozessschritte *Heraustrennen* und *Nachbearbeiten* - muss in einer ökologischen Nachhaltigkeitsbewertung mitberücksichtigt werden.

Lösungsansatz

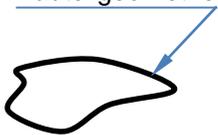
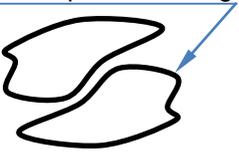
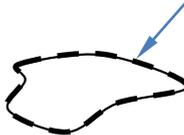
Für eine ökologische Nachhaltigkeitsbewertung für den Repurpose-Prozess müssen beide Prozesse (Black-Box und Detail-Prozess) betrachtet werden. Aktuell existieren nur mathematische Modelle die eine optimierte Bauteilpositionierung vornehmen

(Blechbearbeitung [14], Logistik [15], 3D-Druck [16,17]). Es fehlen demnach mathematische Modelle, die Einflussfaktoren (Energienmengen zum Heraustrennen und Nachbearbeiten) in Bezug zum Input (vorhandene Energiemenge) und Output (neue Bauteile, Verschnitt) berücksichtigen. Darüber hinaus müssen für die Modellierung die produktspezifischen Merkmale (Geometrie, Werkstoff etc.) einbezogen werden.

3 Neuentwickelte ökologische Nachhaltigkeitsbewertung

Der ökologische Bewertungsansatz beinhaltet eine Methode, die in anforderungsgerechter Weise die einzelnen Prozessschritte aus den Maßnahmen in Bezug zu den produktspezifischen Merkmalen beschreibt. Aus diesen Merkmalen wird anschließend eine neuartige Kennzahl berechnet, um die Nachhaltigkeit des gesamten Repurpose-Prozesses bewerten zu können.

Tabelle 1: Bauteile und prozessspezifische Kenngrößen für den Repurpose-Prozess

Bauteile und prozessspezifische Kenngrößen				
	Bauteilgeometrie	Bauteilpositionierung	Heraustrennen	Nachbearbeiten
				
Kennwerte				
3D	Energie/Volumen	Stückzahl/Volumen	Energie/Fläche	Energie/Fläche
2D	Energie/Volumen	Anzahl/Fläche	Energie/Länge	Energie/Länge

Der in Kapitel 2 beschriebene Gesamtprozess beinhaltet folgende Elemente: *altes* Bauteil, volumenoptimierte Bauteilpositionierung, Heraustrennen der Bauteile, Nachbearbeitung und *neue* Bauteile. Den Zusammenhang zwischen den bauteil- und prozessspezifischen Merkmalen stellt Tabelle 1 dar.

Das *alte* Bauteil und die *neuen* Bauteile werden über die in der Abbildung 3 dargestellten Energiemengen beschrieben. Die volumen- oder flächenoptimierte Positionierung der verschiedenen Bauteile, wird im Rahmen dieser Untersuchung vereinfacht auf die Stückzahl reduziert. Die notwendigen Energiemengen werden für das Heraustrennen und das

Nachbearbeiten pro Fläche (3D) bzw. pro Länge (2D) angegeben. Die spezifischen Energiemengen sind abhängig von den gewählten Fertigungsverfahren.

Ausgangspunkt ist, dass die zusätzlich aufgewendeten Energien des Prozesses mitberücksichtigt werden und in Relation zu der vorhandenen Energie, die bereits in einem verschlissenen Bauteil enthalten ist (Urformen, Umformen, etc.), gesetzt werden. Bezieht man in die Bewertung der Nachhaltigkeit alle Energiebedarfe mit ein, wird deutlich, dass es das Ziel eines Repurpose-Prozesses sein muss, die Summe der Energien aus Nacharbeit, Trennen und Verschnitt zu minimieren.

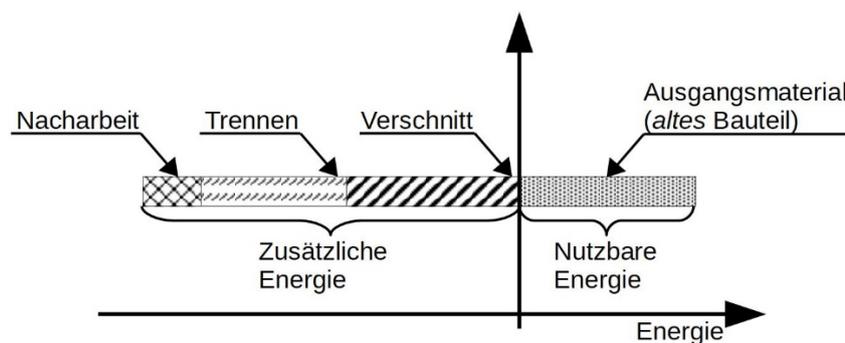


Abbildung 3: Energiemengen des Repurpose-Prozesses (schematische Darstellung)

Auf Basis der Prozessbeschreibung und der bauteil- und prozessspezifischen Merkmale wird nachfolgend ein Parameter definiert. Zunächst werden die einzelnen Energien, die produktspezifisch sind, in einen Zusammenhang überführt werden. Damit ergibt sich der Produktfaktor ∇_P [J*mm] nach Gleichung (1) zu:

$$\nabla_P = \sum_{n=1} (a_n * (k_{\text{aus}} * U_n + k_{\text{nach}} * F_n)) \quad (1)$$

Dabei wird der Prozessschritt Heraustrennen durch die Energiemenge k_{aus} mit der Gesamtschnittlänge U pro Bauteil n und mit der Gesamtanzahl a berechnet. Die Energiemenge für den Prozessschritt Nachbearbeiten ergibt sich aus der Energiemenge k_{nach} und der Länge der nachzubearbeiten Länge F_n (im Weiteren als Funktionsseite bezeichnet).

Der zweite Faktor berücksichtigt die Menge an Restmaterial. Damit ergibt sich der Flächenfaktor ∇_F [J*mm²] aus der Differenz von Ausgangsmaterial zum wieder genutzten Material, vgl. Gleichung 2.

$$\nabla_F = (A_{\text{ges}} - \sum_{i=1} A_i) \quad (2)$$

mit dem Ausgangsmaterial A_{ges} und der Summe an Einzelflächen A . Es sei darauf hingewiesen, dass die Fläche nicht ausschließlich als geometrische Kennzahl verwendet wird, sondern die Größen A_{ges} und A wiederum alle Energiebeträge des Ausgangswerkstoffes enthalten, hierzu zählen Grundressourcen, Urformen, Umformen etc. Unter Beachtung der beiden oben dargestellten Größen ∇_P und ∇_F ergibt sich damit der Faktor für die Nachhaltigkeitsbewertung ∇_N [$\text{J}^2 \cdot \text{mm}^3$] nach Gleichung 3 zu:

$$\nabla_N = \nabla_P * \nabla_F \quad (3)$$

Dieser Faktor ∇_N berücksichtigt für einen Repurpose-Prozess alle notwendigen Einflussgrößen und ermöglicht die Berechnung einer Kennzahl für die ökologische Nachhaltigkeit. Wenn das Ziel das Einsparen von Ressourcen ist, so muss dieser Faktor minimiert werden.

4 Anwendungsbeispiel

Der im vorherigen Kapitel vorgestellte Bewertungsansatz für die ökologische Nachhaltigkeit wird im Folgenden anhand eines Praxisbeispiels dargestellt. In der Werkzeug- und Schneidwarenindustrie fallen große Werkstücke aus vergütetem Werkzeugstahl an, die durch Verschleiß nicht mehr genutzt werden können. Da der Verschleiß aber oftmals an den Rändern der Bauteile (bspw. Messerschneiden) auftritt, können diese für den Repurpose-Prozess genutzt werden. Dafür soll hier angenommen werden, dass die Materialeigenschaften des Ausgangswerkstoffes eine weitere Nutzung als handgeführte Holzbearbeitungswerkzeuge für Endnutzer ermöglichen. Da die Holzbearbeitungswerkzeuge viel kleiner als die verschlissenen Werkstücke sind, besteht hier ein großes Potenzial für die Weiterverarbeitung. Die einzelnen Nachbearbeitungsschritte umfassen am Beispiel der Holzbearbeitungswerkzeuge mindestens die Schritte des Schleifens und der Wärmebehandlung der Funktionsseiten. Des Weiteren können noch Arbeitsschritte wie das Beschichten hinzukommen. In der Literatur werden für die verschiedenen Prozesse eine große Spanne von Energiebedarfen angegeben. So beträgt die spezifische Energie beim Schleifen 10 bis 200 J/mm^3 , beim Fräsen hingegen nur 1 bis 10 J/mm^3 [18]. Nach Raab ist der Energiebedarf für eine Zerspanung (vergleichbar mit dem Trennen) eines Chromstahls mit 1 MJ/kg angegeben [19]. Abtragende Fertigungsverfahren benötigen im Durchschnitt 47 MJ/kg (ebd.). Für das

vorliegende Anwendungsbeispiel werden im Nachfolgenden für abtragende Fertigungsverfahren 70 % der durchschnittlichen Energiemengen angenommen. Bezogen auf die in dieser Arbeit untersuchten Prozessschritte "Heraustrennen" und "Nachbearbeiten" (Zusammenfassung der Prozesse Wärmebehandlung, Schleifen etc.) ergibt sich ein Verhältnis der benötigten Energiemengen von 1/33.

Für das Praxisbeispiel werden daher folgende Annahmen getroffen: die zur Verfügung stehende Gesamtfläche des Ausgangsmaterials beträgt 19.000 mm². Für das Trennen von einem Millimeter wird 1 Energie benötigt. Hier und im Weiteren wird der Begriff Energie verwendet, der verallgemeinert alle benötigten Energieaufwendungen und Ressourcen zusammenfasst. Für das Nachbearbeiten wird eine Energiemenge von 33 Energie/1mm angenommen. Es gibt vier verschiedene Bauteile. Alle besitzen eine Länge von 200 mm und unterscheiden sich in der Breite sowie der nachzubearbeitenden Länge (Tabelle 2).

Tabelle 2: Übersicht der Bauteile und berechneten Kennwerte

Bauteil (Symbol)	Breite [mm]	Anzahl der Funktionsseiten	Gesamtlänge der Funktionsseiten [mm]	Stückzahl	Verschnitt [mm ²]	$\nabla_{N,h}^*$ [10 ⁶]
Bauteil 1 ●	2	1	2	47	200	4,42
Bauteil 2 ■	20	3	220	4	3000	92,4
Bauteil 3 ◆	35	1	35	2	5000	16,25
Bauteil 4 ▲	35	3	235	2	5000	82,25

Für die erste Analyse wird für jedes Bauteil einzeln die Kennzahl ermittelt. Dafür wird berechnet, wie viele Bauteile aus einem verschlissenen Bauteil produziert werden können (Flächenoptimierung ohne Berücksichtigung der Energien). Anschließend wird die Kennzahl (unter Berücksichtigung der Nachbearbeitung und des Heraustrennens) für die ermittelte Stückzahl berechnet. Für die zweite Analyse wird die Kombination der Bauteile untersucht; mit dem Ziel die Kennzahl zu minimieren. Das Ergebnis der ersten Analyse ist in Tabelle 2 dargestellt. Den höchsten und somit schlechtesten Kennwert - mit $\nabla_{N,h} = 92,4 \cdot 10^6$ [J²·mm³] - erreicht Bauteil 2. Begründet ist dieser Wert durch den großen Verschnitt und den großen Energiebedarf in der Nachbearbeitung. Den besten Kennwert - mit $\nabla_{N,h} = 4,42 \cdot 10^6$ [J²·mm³] - erreicht Bauteil 1.

Bei der zweiten Analyse wurden die vier Bauteile unterschiedlich miteinander kombiniert und die Kennzahlen ermittelt. Grafisch ist dieser Zusammenhang in Abbildung 4 gezeigt. Durch den Vergleich von ∇_N ist ersichtlich, dass Variante 1 die beste (nachhaltigste) Lösung ist. Die Variante ergibt sich aus der Kombination aus Bauteil 1 (12 Stück) und Bauteil 3 (2

Stück). Der berechnete Kennwert ist $\nabla_{N,h} = 1,78 \cdot 10^6 \text{ [J}^2 \cdot \text{mm}^3\text{]}$. Der ermittelte Kennwert aus der zweiten Untersuchung ist geringer als der Kennwert aus der ersten Untersuchung. Daraus lässt sich für das Beispiel ableiten, dass die Kombination verschiedener Bauteile ökologisch nachhaltiger ist als die Verwendung eines einzelnen Bauteils.

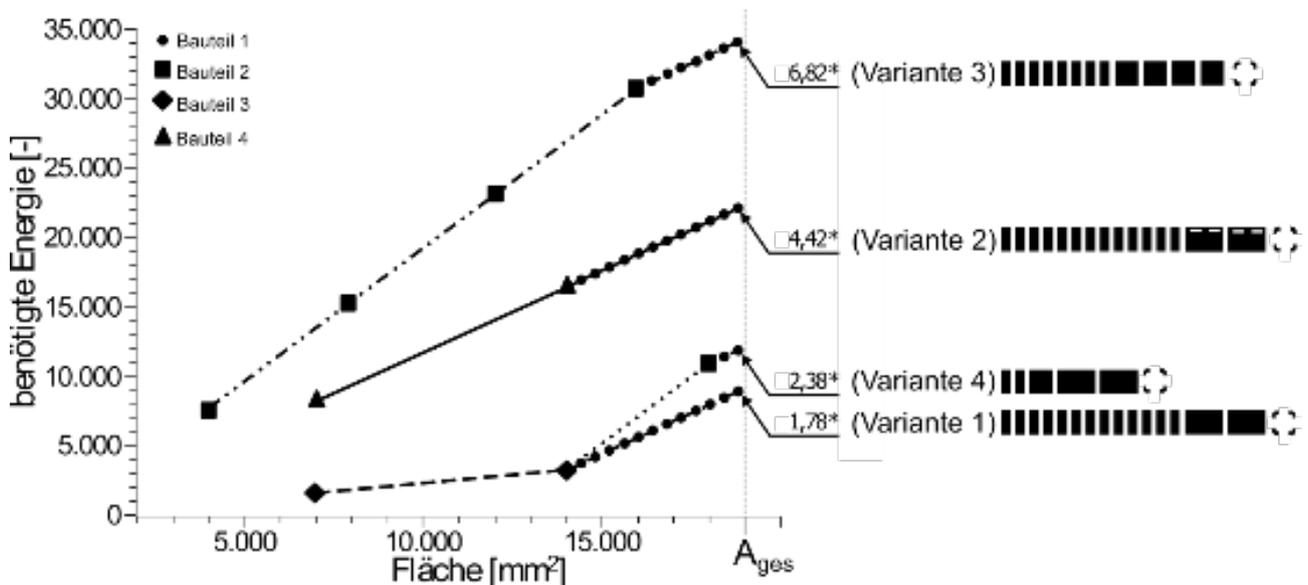


Abbildung 4: Auftragung der benötigten Energien für verschiedene Bauteilkombinationen (* $\nabla_N \times 10^6$).

Rechts: Schematische Darstellungen der Geometrien (Bauteile schwarz und Verschnitt)

5 Ergebnis und Diskussion

In dieser Arbeit wurde der Frage nachgegangen, welche Merkmale notwendig sind, um den Repurpose-Prozess zu quantifizieren. Dazu wurde das Konzept der Kreislaufwirtschaft und die verschiedenen Maßnahmen beschrieben und argumentiert, warum Kennzahlen zur Bewertung dieser Maßnahmen notwendig sind. Für den Repurpose-Prozess wurde dann anhand eines Beispiels verdeutlicht, dass je nach Betrachtungsperspektive unterschiedliche Bewertungen möglich sind. Um dieses Problem zu lösen, wurden in einem zweiten Schritt für den Repurpose-Prozess eine methodische Vorgehensweise zur Quantifizierung des Prozesses entwickelt und ein neuer Kennwert vorgestellt. Der Kennwert berücksichtigt produktspezifische Merkmale (Geometrie, Prozess und Material) und ermöglicht somit eine objektive Bewertung des Prozesses. Anhand eines fiktiven Praxisbeispiels aus dem Bereich der Werkzeugindustrie wurde die entwickelte Methode validiert. Auf Basis der Kennzahlen konnte gezeigt werden, welche der Varianten die nachhaltigste ist (lokales Optimum). Durch eine weitere Analyse war es zusätzlich möglich, dieses Optimum durch eine

Bauteilkombination zu verbessern. Die dargestellten Ergebnisse zeigen, dass sowohl die Methode als auch die ermittelten Kennwerte geeignet sind, um den Repurpose-Prozess unter Berücksichtigung produktspezifischer Merkmale zu quantifizieren.

6 Ausblick

Die Arbeitsergebnisse dienen als Grundlage für weitere Untersuchungen. Es müssen die realen Kennwerte (Verarbeitungsprozesse und Materialien) ermittelt werden. Aufbauend auf den neuen Erkenntnissen, werden weitere Forschungsfelder und Maßnahmen abgeleitet:

1. Die Modellerweiterung um reale Energiewerte für die Prozessschritte, Integration vorhandener volumen- oder flächenoptimierter Algorithmen.
2. Überprüfen, ob der beschriebene Ansatz für weitere Strategien (10R) anwendbar ist.

Sollten die Untersuchungen zielführend sein, können diese Erkenntnisse genutzt werden, um eine Online-Plattform für Nachhaltigkeit aufzubauen. Dadurch kann besonders der branchenübergreifende Synergieeffekt des Repurpose-Ansatzes erhöht werden. Des Weiteren soll durch Digitalisierung das Marktvolumen im Bereich der CE um 2 Mrd. Euro steigen [20].

Literatur

- [1] Stephan Lutter, Stefan Giljum, Burcu Gözet, Hanspeter Wieland, Christopher Manstein. 2018. Die Nutzung natürlicher Ressourcen. Bericht für Deutschland 2018. Fachgebiet 1.1 "Grundsatzfragen, Nachhaltigkeitsstrategie und -szenarien, Ressourcenschonung".
- [2] Bocken, N. M. P., Pauw, I. de, Bakker, C., and van der Grinten, B. 2016. Product design and business model strategies for a circular economy. *Journal of Industrial and Production Engineering* 33, 5, 308–320.
- [3] Reike, D., Vermeulen, W. J.V., and Witjes, S. 2018. The circular economy: New or Refurbished as CE 3.0? — Exploring Controversies in the Conceptualization of the Circular Economy through a Focus on History and Resource Value Retention Options. *Resources, Conservation and Recycling* 135, 246–264.
- [4] Yoshida, H., Shimamura, K., and Aizawa, H. 2007. 3R strategies for the establishment of an international sound material-cycle society. *J Mater Cycles Waste Manag* 9, 2, 101–111.
- [5] van Buren, N., Demmers, M., van der Heijden, R., and Witlox, F. 2016. Towards a Circular Economy: The Role of Dutch Logistics Industries and Governments. *Sustainability* 8, 7, 647.
- [6] Thierry, M., Salomon, M., van Nunen, J., and van Wassenhove, L. 1995. Strategic Issues in Product Recovery Management. *California Management Review* 37, 2, 114–136.

-
- [7] Sihvonen, S. and Ritola, T. 2015. Conceptualizing ReX for Aggregating End-of-life Strategies in Product Development. *Procedia CIRP* 29, 639–644.
- [8] Potting, J., Hekkert, M. P., Worrell, E., and Hanemaaijer, A. 2017. Circular Economy: Measuring innovation in the product chain.
- [9] Hollerweger, E. 2014. Umnutzung als Weg aus der Umweltkrise? *Diagonal* 35, 1, 71–86.
- [10] Böschen, M. 2016. Nachhaltiges Textilrecycling – eine globale Herausforderung. In *Chefsache Nachhaltigkeit*, P. Buchenau, M. Geßner, C. Geßner and A. Kölle, Eds. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 255–268. DOI=10.1007/978-3-658-11072-7_16.
- [11] Brissaud, D. and Zwolinski, P. 2017. The Scientific Challenges for a Sustainable Consumption and Production Scenario: The Circular Reuse of Materials for the Upgrading and Repurposing of Components. *Procedia CIRP* 61, 663–666.
- [12] Feldhusen, J. and Grote, K.-H. 2013. *Pahl/Beitz Konstruktionslehre*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- [13] Gottschalk, G., Kaiser, R., Malissa, H., Schwarz-Bergkampff, E., Simon, W., Spitz, H., ... & Zettler, H. 1971. Systemtheorie in der Analytik. *Fresenius' Zeitschrift für analytische Chemie* 256, 4, 257--270.
- [14] Sherif, S. U., Jawahar, N., and Balamurali, M. 2014. Sequential optimization approach for nesting and cutting sequence in laser cutting. *Journal of Manufacturing Systems* 33, 4, 624–638.
- [15] Martello, S., Pisinger, D., and Vigo, D. 2000. The Three-Dimensional Bin Packing Problem. *Operations Research* 48, 2, 256–267.
- [16] Chergui, A., Hadj-Hamou, K., and Vignat, F. 2018. Production scheduling and nesting in additive manufacturing. *Computers & Industrial Engineering* 126, 292–301.
- [17] Lutters, E., Dam, D. ten, and Faneker, T. 2012. 3D Nesting of Complex Shapes. *Procedia CIRP* 3, 26–31.
- [18] Hauff, M. von and Nguyen, T. 2018. *Fortschritte in der Nachhaltigkeitsforschung*. Nomos Verlagsgesellschaft mbH & Co. KG.
- [19] Raab, H. H. 1984. *Wirtschaftliche Fertigungstechnik*. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden.
- [20] Büchele, R. and Andrä, P. 2016. *Die Digitalisierung in der GreenTech-Branche. Handlungsbedarfe für Unternehmen der Umwelttechnik und Ressourceneffizienz in Deutschland. Think act : beyond mainstream*. Roland Berger, München.

Reverse-Engineering Vorgehen zur Analyse von Systemarchitekturen

Robin Pluhnau, Jan Lübke, Arun Nagarajah

Institut für Produkt Engineering, Universität Duisburg-Essen

Lotharstr. 1, 47057 Duisburg

Email: robin.pluhnau@uni-due.de; Internet: <https://www.uni-due.de/pep>

Inhalt: Das Systems Engineering gilt als Ansatz, mit dem die steigende Komplexität von interdisziplinären Produktentwicklungsprozessen unter stringenter Anwendung der Philosophie des Systemdenkes händelbar bleiben soll. Das frühzeitige Durchdenken des Gesamtsystems trägt dafür Sorge, dass alle an der Entwicklung beteiligten Domänen in der Lage sind, ein gemeinsames Verständnis für das zu entwickelnde Gesamtsystem aufzubauen. Voraussetzung hierfür ist eine abstrakte, übergeordnete Betrachtung und Beschreibung des zu entwickelnden Gesamtsystems und seiner Gesamtzusammenhänge. Übergreifende Abhängigkeiten werden dadurch schon vor der disziplinspezifischen Entwicklung erkannt und können systematisch berücksichtigt werden. Eine mögliche Beschreibungsform dafür stellen Systemarchitekturen dar. Sie beschreiben die Struktur eines Systems aus Elementen der konzeptionellen Phase (Funktionen, Wirkprinzipien) als auch aus Lösungselementen wie Komponenten und Modulen. Im Hinblick auf den großen Anteil an Varianten- und Anpassungskonstruktionen bieten Sie sich als wertvolle Referenz für die Weiterentwicklung an. In der Praxis kommt der Aufbau solcher Architekturen einem Reverse-Prozess nah. Ein Ansatz zum Aufbau von Systemarchitekturen für bestehende Produktfamilien wird in diesem Paper vorgestellt

Stichwörter: Systemarchitekturen, Model based Systems Engineering, Variantenentwicklung

Reverse-Architecting Approach for System Architecture Models

Abstract: Systems engineering is an approach that aims to keep the increasing complexity of interdisciplinary product development processes manageable while strictly applying the philosophy of systems thinking. By thinking through the overall system at an early stage, it is ensured that all domains involved in the development are able to build a common understanding of the overall system to be developed. This requires an abstract, superordinate consideration and description of the overall system to be developed and its overall relations. Dependencies are thus recognized even before the discipline-specific development and can be systematically considered. System architectures are a possible way of describing this. They describe the structure of a system from elements of the conceptual phase (functions, effect principles) as well as from solution elements such as components and modules. In relation to the large number of variants and adaptation constructions they offer themselves as valuable reference for the advancement. In practice, the construction of such architectures comes close to a reverse process. An approach to building system architectures for existing product families is presented in this paper

Keywords: System architectures, Model based Systems Engineering, Variant development

1 Einleitung

Moderne Produkte sind durch eine steigende Anzahl an Produkthanforderungen sowie durch mehr und komplexer werdende Funktionen gekennzeichnet, die sich in einer gesteigerten Produkt- und Prozesskomplexität äußern. Die Fähigkeit marktgerecht zu innovieren, hängt daher von der unternehmerischen Beherrschung der steigenden Komplexität durch eine effektive Kollaboration der unterschiedlichen Disziplinen eines Entwicklungsprozesses ab. In der klassischen Produktentwicklung erfolgt die Komponentenentwicklung auf die systematische Erfassung der Anforderungen in unabhängig voneinander agierenden Fachabteilungen, die ihre Lösungen in der Integrationsphase zu einem Gesamtsystem zusammenführen und hinsichtlich der gestellten Anforderungen validieren. Interdisziplinäre Produktentwicklungsprozesse sind jedoch durch eine Vielzahl an Schnittstellen und eine dementsprechend große Menge an auszutauschenden Informationen charakterisiert, die eine hohe Konsistenz erfordern. In der Produktentwicklung nutzt jedoch jede Disziplin ihre eigenen Entwicklungsmethoden und -modelle. Auswirkungen auf die Komponenten anderer Disziplinen werden deshalb erst spät identifiziert und verursachen zeitintensive Iterationsschleifen. Das Systems Engineering gilt als Ansatz, mit dem die steigende Komplexität von interdisziplinären Produktentwicklungsprozessen unter stringenter Anwendung der Philosophie des Systemdenkes händelbar bleiben soll. Das frühzeitige Durchdenken des Gesamtsystems, seiner Elemente ihrer Relationen zueinander trägt dafür Sorge, dass alle an der Entwicklung beteiligten Domänen in der Lage sind, ein gemeinsames Verständnis für das zu entwickelnde Gesamtsystem aufzubauen. Voraussetzung hierfür ist eine abstrakte, übergeordnete Betrachtung und Beschreibung des zu entwickelnden Gesamtsystems und seiner Gesamtzusammenhänge. Übergreifende Abhängigkeiten werden dadurch schon vor der disziplinspezifischen Entwicklung erkannt und können systematisch berücksichtigt werden. Eine mögliche Beschreibungsform dafür stellen Systemarchitekturen dar. Sie beschreiben die Struktur eines Systems aus Elementen der konzeptionellen Phase (Funktionen, Wirkprinzipien) als auch aus Lösungselemente wie Komponenten und Modulen. Im Rahmen des Papers wird ein Ansatz zum Aufbau von Systemarchitekturen für bestehende Produktfamilien vorgestellt.[1] [2]

2 Problemstellung und Zielsetzung

Produktentwicklung beginnt selten auf einem weißen Blatt Papier - der Großteil der Aktivitäten von Entwicklungsabteilungen fällt auf Anpassung- oder Variantenkonstruktionen ab [3]. Durch Gestalt- und Prinzipvariation oder durch die Erweiterung des Funktionsumfangs entstehen neue Varianten und Generationen von Produkten, die einen definierten Kundennutzen erfüllen. Sie sind durch eine hohe Wiederverwendung von bestehenden Lösungen charakterisiert, die in einer Architektur mit neukonzeptionierten oder an die Anforderungen angepassten Elementen zusammenspielen müssen. Wird die Auswirkung einer Variation oder Erweiterung nicht frühzeitig erfasst, steigt der Aufwand der Entwicklung solcher Varianten und Generationen schnell an. Für eine effiziente Produktfamilienentwicklung ist eine Abstraktion von den konkreten Produktvarianten notwendig, um die charakteristischen Eigenschaften einer Variante zu erkennen und systematisch zu beschreiben. Existieren Abhängigkeiten zwischen den Elementen eines Systems, kann die konkrete Ausprägung einer Variante anhand der geforderten Eigenschaften bestimmt werden. Systemarchitekturen bieten sich aufgrund der Tatsache, dass sie verschiedene Abstraktionsstufen eines Produktes abbilden, als eine sinnvolle Referenz für die übergeordnete Beschreibung an. Korrelationen zwischen den Elementen funktionaler Struktur und Baustruktur eines Systems können unter Zuhilfenahme logischer Elemente hergestellt werden. Je nach Bedarf können auf Basis der Architektur konzeptionelle Änderungen, also neue Funktionen oder veränderte Prinzipien zur Realisierung der Funktionen oder auch rein gestalterische Änderungen aufgrund offenbar gewordener Grenzen vorgenommen werden. Die Architekturentwicklung gilt deshalb als wesentliche Disziplin für die erfolgreiche Anwendung von Systems Engineering [4]. Existierende Ansätze fokussieren die Architekturbeschreibung für Neuentwicklungen. Berücksichtigt man die Erkenntnis, dass der Großteil auf Weiterentwicklungen abfällt, ist der Aufbau von Architekturen bestehender Produkte zu untersuchen - mit dem Zweck, sie für die Familienentwicklung zu verwenden. In der industriellen Praxis kommt die Architekturbeschreibung demnach einem Reverse-Engineering Prozess nah, in dem Produkte auf ihre Strukturen analysiert und an geänderte Randbedingungen angepasst werden müssen. Das Paper beschreibt eine Vorgehensweise, um Produktfamilien systematisch hinsichtlich ihrer Architektur zu analysieren. Das Vorgehen soll als Basis für die Architekturmodellierung dienen, in der eine effektive Informationsverknüpfung von

Funktionen über Wirkprinzipien hin zu Komponenten möglich ist. Zu beachtenden Auswirkungen einer Variation können dadurch aufgezeigt und damit verbundene und notwendige Anpassungen im Modell ausführbar gemacht werden.

3 Grundlagen und Stand der Wissenschaft

3.1 Systemarchitekturen

Die Systemarchitektur beschreibt nach INCOSE "die grundlegende Organisation eines Systems, repräsentiert durch seine Komponenten, deren Beziehungen zueinander und zu ihrer Umwelt sowie die Prinzipien für seine Entwicklung und Gestaltung" [16]. Die Definition ist aus Sicht der Produktentwicklung nicht neu. Ulrich definierte zuvor die Produktarchitektur als die "Anordnung der Funktionselemente", die "Zuordnung von funktionalen Elementen zu physikalischen Elementen" sowie die "Spezifikation der Schnittstellen zwischen interagierenden physikalischen Komponenten" [14]. Die Systemarchitektur beschreibt also den Zusammenhang von Funktion, also dem Zweck eines Systems und der zur Erfüllung der Funktion gewählten Lösung, den Komponenten. Hierzu wird die Funktionsstruktur, also die lösungsneutrale Beschreibung des Systems anhand seiner verknüpften Teilfunktionen, mit der Baustruktur, also dem hierarchischen Aufbau des Systems aus seinen Komponenten verknüpft. Abbildung 1 zeigt diese Verknüpfung in der Systemarchitektur modellhaft.

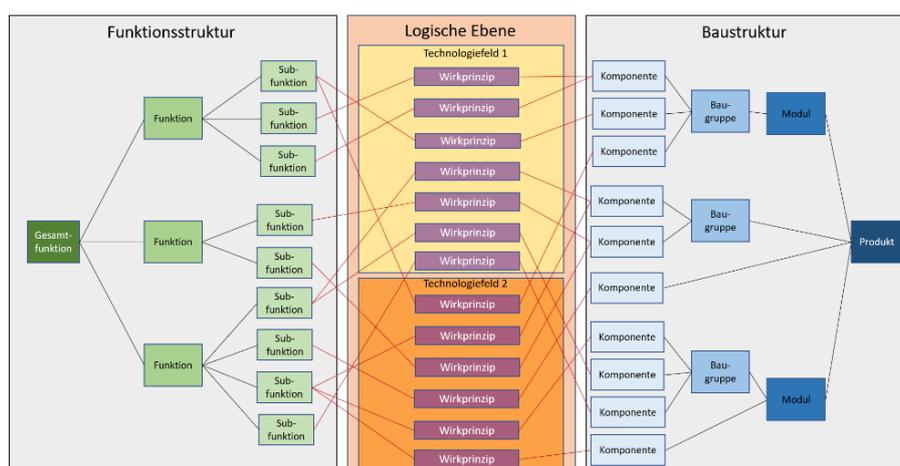


Abbildung 1: Schematischer Aufbau einer Systemarchitektur

Die logische Ebene beschreibt dabei, welche Komponenten oder Module für die Erfüllung welcher Funktionen des Systems verantwortlich sind. Dieser logische Zusammenhang kann

über eine reine Relation oder durch den zur Realisierung der Funktion genutzten physikalischen Effekt konkret beschrieben werden. Architekturmodelle bestehen nach diesem Schema aus Elementen wie Funktionen, Schnittstellen und Komponenten oder Modulen. Eigenschaften von Elementen und logische Beziehungen zu anderen Elementen sind konsistent [2]. Um unterschiedlich detaillierte Sichtweisen auf eine Architektur zu ermöglichen, beispielsweise um die funktionale Beschreibung eines Systems oder den gewählten Effekt zur Realisierung der Funktion besser zu verstehen, ist es sinnvoll, zwischen unterschiedlichen Abstraktionslevel einer Architektur zu differenzieren. Existiert beispielsweise der Bedarf, die Zusammenhänge zwischen den Eingangs- und Ausgangsgrößen von Funktionen eindeutig zu beschreiben ist eine flussorientierte Beschreibungsform (Input-Output-Methode) der Funktionsstruktur möglich, die den Umsatz von Stoff, Energie und Signal berücksichtigt. Im Rahmen der Forschungstätigkeiten ist es insbesondere von Interesse, die Eignung von Architekturen hinsichtlich ihrer Nutzbarkeit für Produktvariation zu untersuchen. Aufgrund der lösungsneutralen Beschreibung verspricht die Architektur, als Referenz für konzeptionelle als auch für gestalterische Änderung, wertvoll zu sein. [5]

3.2 Prozess der Architekturdefinition

Systemarchitekturen zielen auf eine globale Systemlösung ab, die auf Prinzipien, Konzepten und Eigenschaften basiert, die logisch und konsistent miteinander verbunden sind. Hierbei wird zwischen Architektur- und Design-Tätigkeiten unterschieden, die unterschiedlichen Denkweisen zugrunde liegen. Architektur-Tätigkeiten sind abstrakt und stark konzeptionell orientiert. Sie beschreiben die übergeordneten Konzepte, emergente Eigenschaften und charakterisieren Elemente des Systems, z.B. Funktionen, Flüsse, Schnittstellen und Daten eines Systems zu Erfüllung der spezifizierten Anforderungen. Die dabei entstehenden Architekturmodelle sind gestaltungunabhängig und ermöglichen eine maximale Flexibilität der Ausführung. Sie beschreiben das "was". Design-Tätigkeiten sind stark technologieorientiert. Sie beschreiben physikalische, strukturelle Eigenschaften des Systems. Design-Tätigkeiten greifen die ermittelten Artefakte aus den Architektur-Tätigkeiten bei der Lösungsfindung auf, um Verträglichkeit und Machbarkeit für eine Umsetzung zu untersuchen. Sie analysieren die Architektur auf mögliche Technologien zu Erfüllung der Anforderungen und beschreiben das "wie". Der Architektur- und

Designprozess gestaltet sich iterativ und die physische Architektur wird mit zunehmender Anzahl an Designentscheidungen konkreter. [6]

3.3 Ansätze zur Architekturanalyse

Der Gedanke, mit Abstraktionsebenen einer Architektur zu arbeiten, ist auf den aus der Mechatronik stammenden RFLP-Ansatz zurückzuführen, der aus standardisierten Vorgehensmodellen wie der VDI2206 (Entwicklung mechatronischer Systeme) oder der VDI2221 (Entwicklung mechanischer Produkte) hervorgeht. Er definiert die Anforderungen als Grundlage für alle Architekturprozesse, mit denen ein ständiger Abgleich stattfinden muss. Die drei darauf basierenden Phasen sind das funktionale Design, das logische Design und das physische Design. Aktivitäten des funktionalen Designs zielen auf die Ermittlung einer Funktionsstruktur ab - eine abstrakte und lösungsneutrale Beschreibung des Produktes über seine Haupt- und Teilfunktionen [11],[12]. In der hierarchischen Funktionsstruktur wird - ausgehend von der Gesamtfunktionen zur Erfüllung eines bestimmten Zwecks - auf die Teilfunktionen heruntergebrochen, wobei verschiedene Hierarchiestufen notwendig sein können [7],[8]. Für die Modellierung von hierarchischen Funktionsstrukturen wurde die SysML4Consens als Spezifizierungssprache entwickelt [9]. Die flussorientierte Beschreibung von Funktionsstrukturen kann die Lösungssuche durch Berücksichtigung von Stoff-, Energie- und Signalflüssen unterstützen. Stone beschreibt drei Heuristiken, die der Identifizierung von grundlegenden Systemflüssen, simultan ablaufender Subfunktionen, sowie der Umwandlung und Weiterleitung von Flüssen dienen [10]. Albers et al. beschreiben im Rahmen des C&C²-Ansatzes eine Möglichkeit zur Identifizierung von Funktionen und Systemflüssen durch die Betrachtung von Wirkflächen und Wirkstrukturelementen [3]. Für die Funktionsmodellierung stützten sie sich, wie auch Weilkiens, auf die Beschreibungssprache SysML. Im logischen Design wird die Wirkebene als bindendes Element zwischen funktionaler und physischer Ebene abgebildet. Sie dient der Lösungssuche und Konzeptentwicklung durch Bestimmung von Wirkprinzipien, Technologien oder anderen Lösungselementen [11],[12],[13]. Gausemeier und Albers berücksichtigen die Ebene in Ihren Ansätzen durch Integration des Wirkstrukturmodells. Sie beschreibt die zur Funktionserfüllung benötigten Elemente, Systemflüsse und Schnittstellen bzw. die Zusammenführung von Funktionsstrukturen und Wirkelementen [9],[3]. Konkrete Lösungselemente, wie Module und Komponenten, werden im physischen Design auf Basis der ermittelten Wirkstruktur gestaltet und bilden die Baustuktur des Systems ab. Albers

beschreibt die Möglichkeit zur Ableitung der physischen Struktur durch eine Matrix, in der er Komponenten und Wirkstrukturelemente in Korrelation setzt [3].

Einen vielversprechenden Ansatz zur Analyse von Produktfamilien bietet die Verwendung von Referenzproduktstrukturen nach Feldhusen. Sie beschreibt die größtmögliche Produktstruktur eines theoretischen Produktes, die alle möglichen Ausprägungen einer Produktfamilie repräsentieren kann [8]. Die Knoten der Struktur sind Platzhalter für verschiedener Varianten. Ulrich und Eppinger unterstützen die Analyse von Produkten durch die simultane Erzeugung von Schemata für Funktionen und Komponenten, das Clustern von Elementen, die Erstellung eines geometrischen Layouts sowie die Betrachtung von internen und externen Zusammenhängen [14]. Van Wie entwickelte zu diesem Zweck verschiedene Diagrammlayouts für Produktfunktionen und ihre räumliche Abgrenzung [15].

4 Reverse-Architecting Ansatz

Der nachfolgend dargelegte Ansatz unterstützt die Analyse von bestehenden Produktfamilien mit dem Ziel, eine Systemarchitektur mit generischem Charakter zu beschreiben. Die Aktivitäten beruhen auf ausgewählten Aspekten der Produktanalyse und der Architektursynthese. Hierzu werden fünf, sich im Grad der Abstraktion unterscheidende, Beschreibungen einer Produktfamilie definiert (vgl. Abbildung 2). Ausgangspunkt des Ansatzes ist die bestehende Produktfamilie. An dieser Stelle sei zu beachten, dass das Level an Abstraktion mit Bedacht zu definieren ist. Hier muss entschieden werden, wie stark abstrahiert werden kann, sodass die abstrakte Komponente noch sinnvoll nah an allen Varianten liegt. Aufwand und Nutzen von Systemarchitekturen stehen in keinem guten Verhältnis, wenn ein Auto und ein Flugzeug als Transportmittel beschrieben werden. Die erste Phase beinhaltet die Analyse der existierenden Varianten und Generationen des Produktes, in der sie auf ihre vorhandenen Eigenschaften analysiert und die von Variation betroffenen Komponenten als Variationspunkt definiert werden. An diesen Variationspunkten der Struktur können verschiedene Ausprägungen und Optionen einer Komponente vorliegen. Sie werden als Ergebnis der ersten Phase in einer Referenzproduktstruktur abgebildet und in der physischen Struktur näher betrachtet. Hier werden neben der Komposition der Komponenten auch die zur Beschreibung der Ausprägung verschiedener Varianten relevanten Eigenschaften wie Material und Gestaltparameter berücksichtigt. In der physischen Struktur abgebildete Parameter können durch Verknüpfung mit Parametern anderer Elemente wie Prinzipien, Funktionen oder

Anforderungen die automatisierte Generierung neuer Varianten und die Validierung von Anforderungen unterstützen.

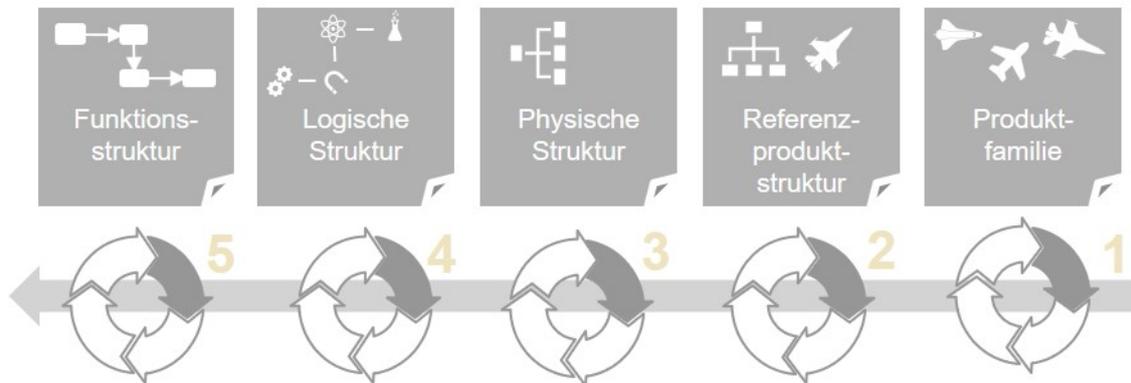


Abbildung 2: Reverse-Ansatz bei dem Aufbau von Systemarchitekturen

Die Gründe für die Gestaltvariation werden in der darauffolgenden logischen Struktur als Funktions-Gestalt-Zusammenhang genauer analysiert. Zu diesem Zweck werden die zugrundeliegenden Wirkprinzipien der Varianten untersucht und können beschrieben werden. Je nach Bedarf muss diese Transformationsbeziehung zwischen Funktion und Gestalt unterschiedlich detailliert betrachtet werden. Das können z.B. gleiche physikalische Modelle sein, welche die Grenzen der Dimensionierung bei unterschiedlichen Randbedingungen aufzeigen oder unterschiedlicher Modelle, die veränderten Lösungsprinzipien zugrunde liegen. Im Sinne einer maximalen Lösungsvariation sollte ein besonderes Augenmerk auf die Beschreibung der logischen Ebene gelegt werden. Sie bietet eine gute Möglichkeit, die kreative Gestaltfindung systematisch zu unterstützen. In seiner abstraktesten Form, der Funktionsstruktur, wird das Produkt durch seine Funktionen sowie deren Zusammenspiel durch Austausch und Umsatz von Stoff-, Energie - und Signalfluss beschrieben. Sie besitzt einen weitestgehend generischen Charakter und ist sinnvoller Ausgangspunkt, beispielweise für die Erweiterung des Funktionsumfangs.

Nachfolgend wird das Vorgehensmodell des Reverse-Architecting-Ansatzes vorgestellt. Das Vorgehen gliedert sich gemäß Abbildung 3 in 6 Phasen mit verschiedenen Aktivitäten.



Abbildung 3: Vorgehensmodell für die Analyse von Systemarchitekturen

Die Struktur-Phase beschäftigt sich mit dem strukturellen Aufbau der zu analysierenden Produktfamilie. Die Produktstrukturen verschiedener Varianten und Generationen werden ermittelt und anschließend abgeglichen. Dieser Abgleich deckt Variationspunkte auf, an denen durch Wechseln des Prinzips oder der Gestalt verschiedene Ausprägungen des Produktes entstehen. Hierbei lassen sich Standardkomponenten, individuelle Lösungen als auch Optionen unterschiedlicher Art von Komponenten identifizieren. Die Grundstruktur von Standardkomponenten mit verschiedenen Optionen an Variationspunkten resultiert in einer Referenzproduktstruktur für die gesamte Produktfamilie. Für die anschließende Analyse der gestaltbeschreibenden Parameter müssen Standardkomponenten nur einmalig betrachtet werden, was den Analyseaufwand reduziert. Optionen dagegen müssen hinsichtlich der Gestaltung untersucht werden. Die identifizierten Gestaltparameter sind den Komponenten der Referenzproduktarchitektur als Eigenschaft zuzuordnen. Die um die Eigenschaften erweiterte Referenzproduktstruktur stellt das Arbeitsergebnis der ersten Phase dar - die physische Architektur. In der darauffolgenden Black Box-Phase werden das Systemumfeld, In- und Output des Systems sowie die grundlegenden Schnittstellen zur Systemumgebung analysiert und beschrieben. Black Box bedeutet, dass keine systeminternen Elemente und Flüsse betrachtet werden. Im ersten Schritt werden die Systemgrenze und die Betriebszustände des Systems identifiziert. Sie beschreiben, ob grundsätzliche Zustandsänderungen des Gesamtsystems auftreten, welche In- und Outputs beeinflussen. Die Betrachtung der Betriebszustände liefert von außen auf das System und von dem System auf die Umwelt wirkende Systemflüsse materialistischer, energetischer oder informationstechnischer Art. Sie bezwecken Schnittstellen des Systems mit seiner

Umgebung, welche über die Systemgrenze in das System oder aus dem System geleitet werden (vgl. Abb. 5, links). Schnittstellen können in Verbindung mit der Art des Systemflusses bereits erste Funktionen wie Energie zuführen, Kraft aufnehmen oder Signal empfangen zugeschrieben werden. Die tatsächliche Definition einer Black Box ist an der Stelle nicht mehr korrekt - die Schnittstellen gehören zwar zum System, dennoch bietet es sich an, eine differenzierte Betrachtung vorzunehmen. Zur Betrachtung der internen Struktur der Black Box wird die Anwendungs-Phase herangezogen. Sie widmet sich dem Zweck des Systems und den damit verbundenen Haupt- und Hilfsfunktionen sowie den internen Systemflüssen.

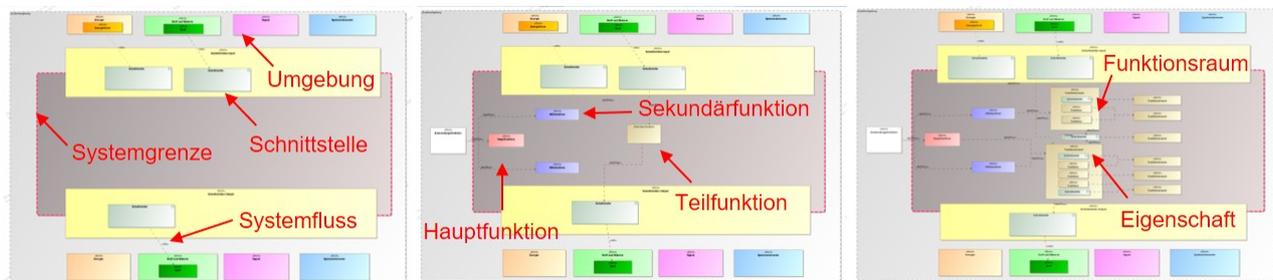


Abbildung 4: Graphisches Layout für die Architekturanalyse

Hierzu werden die im Betrieb des Systems stattfindenden Transformationen der Systemflüsse über die Systemgrenzen als auch innerhalb des Systems betrachtet und daraus die Hauptfunktionen abgeleitet. Wird ein Systemfluss in einem bestimmten Zustand über die Schnittstelle in das System geleitet und in einem anderen Zustand über eine Schnittstelle aus dem System geleitet, so ist eine Funktion zur Transformation zu definieren (vgl. Abb. 4, mitte). Hilfsfunktionen, dessen Notwendigkeit sich aus dem Betrieb ergibt, sind der Architektur zu ergänzen. Die Funktionen des Systems sind mit den zu übertragenden Systemflüssen aus den Schnittstellen zu koppeln. Zusätzliche interne Systemflüsse, die nicht von der Umgebung auf das System geführt werden, sind zu berücksichtigen und deren Verknüpfungen zum System herzustellen. Das Ergebnis der Anwendungs-Phase ist die Hauptfunktionsarchitektur. In der darauffolgenden Funktionsraum-Phase wird die physische Struktur im Hinblick darauf, wie und wodurch Funktionen realisiert werden, untersucht. Eine Kombination aus Analyse von Gestalt und Funktion soll grundlegende Funktionsräume, also Bereiche des Produktes innerhalb derer gewisse Funktionen erfüllt werden, identifizieren. Funktionsräume sind also gedachte Bauräume, in denen zunächst tendenziell Hauptfunktionen realisiert werden, weshalb sie mit den Hauptfunktionen bzw. den entsprechenden Funktionen zu verknüpfen sind. Werden innerhalb eines Funktionsraumes

Schnittstellenfunktionen, z.B. Kraft aufnehmen, realisiert, so werden diese an den Funktionsraum vererbt. Ergebnis dieser Phase ist eine modulare Funktionsarchitektur. In der Konkretisierungsphase werden diese Funktionsräume konkretisiert. Betrachtet man die Funktionsräume näher, so ergeben sich eine Reihe an Subfunktionen, die zur Erfüllung der Hauptfunktion notwendig sind. Sie sind innerhalb des Funktionsraumes zu definieren (vgl. Abb. 4, rechts). Die vorliegenden Systemflüsse aus der Anwendungs-Phase sind mit den Funktionsräumen, bzw. mit den darin enthaltenen Subfunktionen zu verknüpfen. Darüber hinaus sind Schnittstellen zwischen den verschiedenen Funktionsräumen zu definieren. Subfunktionen eines Funktionsraumes können Funktionsräume zweiter oder dritter Ebene definieren, sofern diese Form der Detaillierung erforderlich ist. Sie können aus mehreren Subfunktionen bestehen, die von einem kleiner gefassten Funktionsraum erfüllt werden. Ergebnis dieser Stage sind detaillierte Systemfluss-Architekturen. Die höchste zu erreichende Detaillierungsebene der Funktionsräume stellt die einzelne Komponente der physischen Architektur dar. In der Transformationsphase werden die Funktionsräume mit der physischen Architektur verknüpft. Im Sinne einer Informationsdurchgängigkeit sollte diese Verknüpfung quantitativ, durch modellhafte Beschreibung der Zusammenhänge zwischen Funktion- und Gestaltparametern, z.B. über physikalische Modelle, sein.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Der dargestellte Ansatz ist als Leitfaden zu verstehen, der bei der systematischen Ableitung von Systemarchitekturen bestehender Produktfamilien unterstützt. Er soll als Grundlage für die systemgestützte Modellierung von Systemarchitekturen dienen, um eine hohe Informationsdurchgängigkeit in der Entwicklung von Produktvarianten zu ermöglichen. Im Rahmen des am Institut laufenden Projektes Sys2PEP wird er für die Variantenentwicklung von mechanischen Expanderwerkzeugen validiert und verspricht Potential für eine automatisierte, anforderungsbasierte Gestalterzeugung durch Verknüpfung von Funktion und Gestalt mittels physikalischer Modelle. Er soll im Rahmen des Projektes insbesondere im Hinblick auf eine anwendungsgerechte Modellierung mit SysML weiter detailliert und um Aspekte zur Unterstützung bei der Lösungssuche erweitert werden.

Literatur

- [1] Eigner, M.; Koch, W.; Muggeo, C.: Modellbasierter Entwicklungsprozess cybertronischer Systeme Berlin: Springer, 2017

-
- [2] Weilkiens, T.; Lamm, J.G.; Roth, S.; Walker, M.: Model-based system architecture New Jersey: Wiley series in systems engineering and management, 2016
 - [3] Albers, A.; Reiss, N.; Bursac, N.; Richter, T.: iPem-Integrated Product Engineering Model in Context of Product Generation Engineering, Proceedia CIRP Vol. 50, 2016
 - [4] INCOSE: A World in Motion – Systems Engineering Vision 2025, 2014
 - [5] Phillips, C.: The Big Happy Family of System Architecture Approaches, 2018
 - [6] Walden, D.D.; Roedler, G.J.; Forsberg, K.J.; Hamelin, R.D.; Shortell, T.M.: INCOSE Systems Engineering Handbook: A Guide for System Life Cycle Processes and Activities, 2015
 - [7] Fixson, S.K.: Product architecture assessment: a tool to link product, process, and supply chain design decision”, Journal of Operations Management, 2005
 - [8] Feldhusen, J.; Grote, K.-H.: Pahl/Beitz Konstruktionslehre, Springer Berlin Heidelberg: 2013
 - [9] Gausemeier, J. et al: Modellbasierte Konzipierung eines hybriden Energiespeichersystems für ein autonomes Schienenfahrzeug, in Tag des Systems Engineering, 2011
 - [10] Stone, R.B.: A heuristic method for identifying modules for product architectures, Design Studies Vol 21, 2000
 - [11] Daniilidis, C.: Planungsleitfaden für die systematische Analyse- und Verbesserung von Produktarchitekturen, 2017
 - [12] Verein Deutscher Ingenieure: Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme (VDI 2206), 2004
 - [13] Kleiner, S.: Entwerfen und Entwickeln mit Systems Engineering auf Basis des RFLP-Ansatzes in V6, in Entwerfen, Entwickeln, Erleben, 2012
 - [14] Ulrich, K.T.; Eppinger, S.D.: Product design and development, 5. Ed., 2000
 - [15] van Wie, M.J.: Designing Product Architecture: A Systematic Method, 2002
 - [16] ISO/IEC: 42010:2007: Systems and software engineering - Recommended practice for architectural description of software-intensive systems, 2007

UNIVERSITÄT
DUISBURG
ESSEN

Offen im Denken

ISBN 978-3-940402-43-1
DOI: 10.17185/duepublico/73094

DuEPublico

Duisburg-Essen Publications online

UNIVERSITÄT
DUISBURG
ESSEN

Offen im Denken

ub | universitäts
bibliothek

Dieser Text wird über DuEPublico, dem Dokumenten- und Publikationsserver der Universität Duisburg-Essen, zur Verfügung gestellt. Die hier veröffentlichte Version der E-Publikation kann von einer eventuell ebenfalls veröffentlichten Verlagsversion abweichen.

DOI: 10.17185/duepublico/73094

URN: urn:nbn:de:hbz:464-20201204-094527-4

ISBN 978-3-940402-43-1

Alle Rechte vorbehalten.