



Rebound – Die Achillesferse der Energieeffizienz

Inhalt

Vorwort	5
Der Cluster EnergieForschung.NRW als Treiber eines nachhaltigen Energiesystems	6
Vermeidung von Rebound als zentrale Herausforderung	
Prof. Dr. Reinhard Madlener	8
Kurze Einführung in die Rebound-Begrifflichkeiten	
Prof. Dr. Reinhard Madlener	10
Projektüberblick	12
Heterogene Rebound-Effekte im Individualverkehr	
Prof. Dr. Colin Vance, Prof. Dr. Manuel Frondel	13
Rebound-Effekte beim Stromverbrauch privater Haushalte	
Hendrik Schmitz	17
Handel mit Elektro-Altgeräten und globaler Energieverbrauch	
Hanna Krings	19
Energieeffizienz im Informationszeitalter: IKT-Einsatz und der Rebound-Effekt	
Tugba Atasoy	20
Wirtschaftswachstum und Energieverbrauch: Verhindert der Rebound-Effekt eine Entkoppelung?	
Julius Frieling	23
Energieverbrauch und IKT: Eine neuartige Sicht auf den Rebound-Effekt	
Dr. Ray Galvin	25
Neuartige Rebound-Effekte bei E-Autos – Gleiten statt Hetzen!	
Dr. Ray Galvin	28
Geschlechtsspezifische Unterschiede der Pendlerstrecken in NRW: Rebound-Effekt, CO₂ Emissionen und Gemeinwohl	
Dr. Ray Galvin	30
Literaturverzeichnis	34

Liebe Leserin, lieber Leser,

die Energiewende basiert auf zwei Säulen: dem Ausbau der erneuerbaren Energien und der Senkung des Energieverbrauchs. In beiden Bereichen hat es in den vergangenen Jahren erhebliche Fortschritte gegeben. So lag der Anteil der erneuerbaren Energien im Stromsektor in Deutschland im Jahr 2015 bereits über 30 Prozent. Das ist ein guter Erfolg für die klima- und energiepolitischen Ziele Deutschlands. Trotzdem ist die Energiewende alles andere als ein Selbstläufer. Im Gegenteil: Technologischer Fortschritt für mehr Energieeffizienz und mehr erneuerbare Energien ist nur die eine Seite der Medaille. Auf der anderen Seite stehen die Verbraucherinnen und Verbraucher mit ihrem Konsum- und Nutzungsverhalten. Sie kaufen beispielsweise einen neuen Fernseher, der pro Quadratzentimeter Bildschirmfläche deutlich weniger Energie verbraucht als ihr altes Gerät. Häufig wählen sie dann aber ein deutlich größeres Gerät und das alte läuft in einem anderen Raum weiter, wodurch der Energieverbrauch nicht unbedingt geringer ausfällt als vorher oder insgesamt sogar steigt.

Dieser „Rebound-Effekt“ hat zur Folge, dass trotz einer kontinuierlichen Steigerung der Energieeffizienz Treibhausgasreduktionen niedriger ausfallen als erwartet, was die anvisierten Klimaschutzziele gefährdet. Neben der Politik, die den entsprechenden Rahmen setzen muss, ist hier auch die Wissenschaft gefragt.

Forschung für eine nachhaltige Entwicklung auf den Feldern der großen gesellschaftlichen Herausforderungen zählt deshalb zu den wesentlichen Bausteinen unserer Wissenschaftspolitik in Nordrhein-Westfalen. Mit unserer Forschungsstrategie Fortschritt NRW stellen wir den Menschen in den Mittelpunkt, setzen auf Vorbeugung und auf eine sozial, ökonomisch und ökologisch langfristig orientierte Entwicklung. Ziel ist es, die Grundlagen des gesellschaftlichen Wohlstands und Wohlergehens so zu bewahren und zu entwickeln, dass damit zugleich nachfolgenden Generationen ein intaktes Gefüge hinterlassen wird. Vor diesem Hintergrund ist es dringend notwendig, künftig Rebound-Effekte in wissenschaftlichen Szenarien und im politischen Handeln zu berücksichtigen.



Zum besseren Verständnis des Rebound-Effekts und seiner Auswirkungen für Nordrhein-Westfalen hat das Wissenschaftsministerium daher eine Studie mit dem Titel „Rebound-Effekte in NRW“ gefördert, deren Ergebnisse in dieser Broschüre vorgestellt werden. Mit der Veröffentlichung dieser Forschungsergebnisse leistet das Ministerium für Innovation, Wissenschaft und Forschung des Landes Nordrhein-Westfalen einen Beitrag zur gesellschaftlichen Diskussion dieses Phänomens und seiner Auswirkungen auf das Erreichen unserer ambitionierten Klimaschutzziele.

Ich wünsche Ihnen eine anregende Lektüre.

A handwritten signature in black ink that reads "Svenja Schulze". The signature is written in a cursive, flowing style.

Svenja Schulze
Ministerin für Innovation, Wissenschaft und Forschung
des Landes Nordrhein-Westfalen

Der Cluster EnergieForschung.NRW als Treiber eines nachhaltigen Energiesystems

Der von der EnergieAgentur.NRW gemanagte Cluster EnergieForschung.NRW (CEF.NRW) arbeitet im Auftrag des Ministeriums für Innovation, Wissenschaft und Forschung des Landes Nordrhein-Westfalen an der Umsetzung der energiewirtschaftlichen und klimapolitischen Zielvorgaben der Landesregierung im Bereich der Energieforschung. Dabei stellt CEF.NRW das komplexe Energieversorgungssystem als Ganzes in den Fokus seiner inter- und transdisziplinären Aktivitäten. Aufbauend auf den für die Energiewende relevanten Prozessen der Primärenergiekonversion im erneuerbaren und fossilen Bereich werden Energienetze, Flexibilitätsoptionen sowie Speichertechnologien als Tätigkeitsfeld gesehen. Die zum Klimaschutz zwingend notwendige Dekarbonisierung unseres heutigen Wirtschaftssystems bzw. den bereits eingeleiteten Transformationsprozess des Energieversorgungssystems in Richtung Nachhaltigkeit gilt

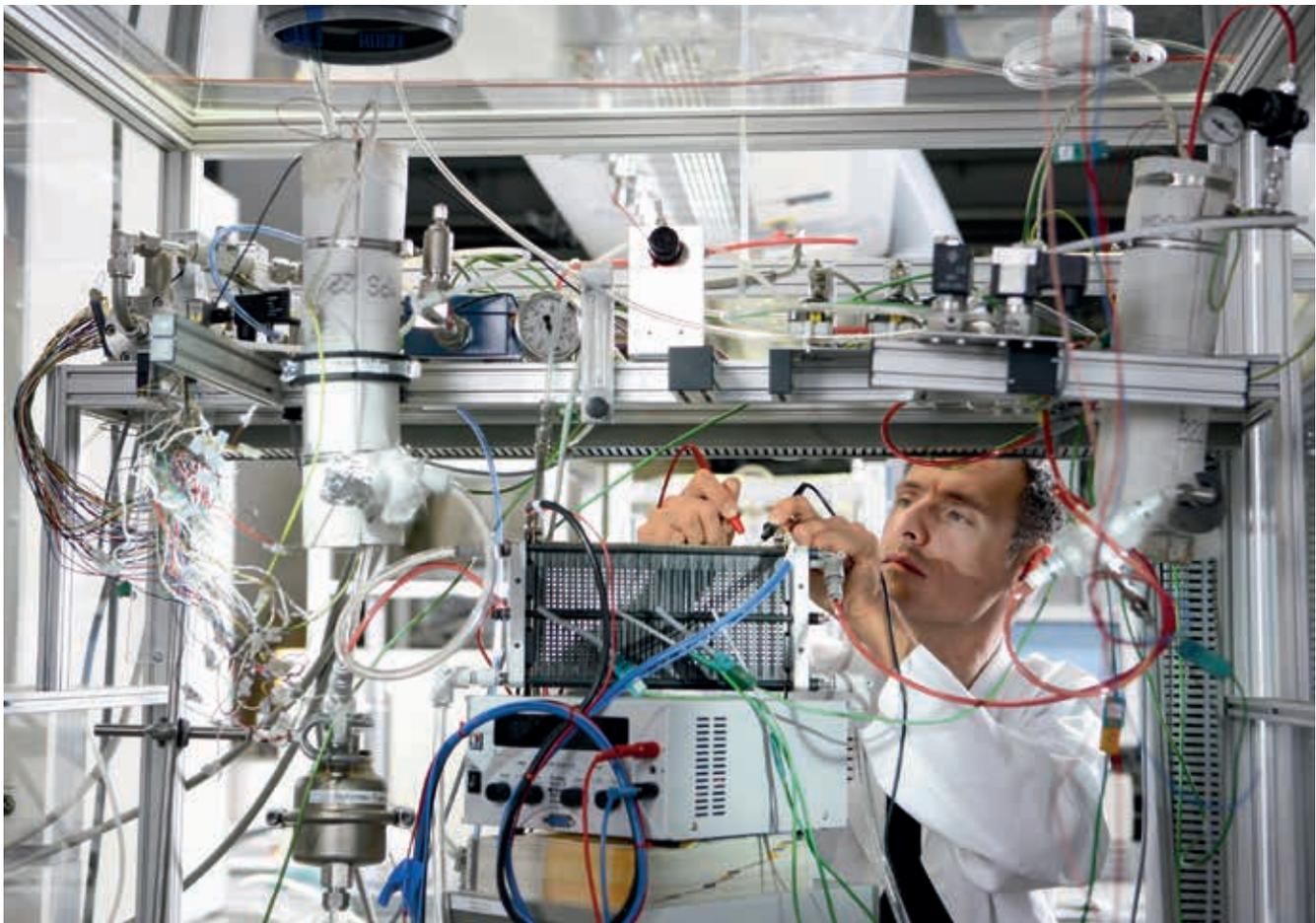
es wissenschaftlich zu begleiten. Hier setzt CEF.NRW mit dem Ziel an, technologische und sozio-ökonomische Erkenntnisfortschritte zu entwickeln und schneller als bisher auf den Weg in die Anwendung zu bringen. Dazu initiiert der Cluster Forschungs- und Entwicklungsprojekte in der koordinierten Zusammenarbeit von Forschungseinrichtungen mit Wirtschaft und Gesellschaft. Neben den rein technologischen Aspekten stellt die Energiewende eine neuartige Herausforderung für die Transformation einer Industriegesellschaft zu einem nachhaltigen Wirtschaftssystem dar. Aufgrund der Komplexität des Umbaus des Energieversorgungssystems braucht die Energiewende ein neues Systemverständnis. Denn neben technologischen Innovationen werden zukünftig insbesondere soziale Innovationen eine zunehmende Basis für einen nachhaltigen Wohlstand darstellen und gleichzeitig zum gesellschaftlichen Fortschritt beitragen. Vor dem



Hintergrund der großen gesellschaftlichen Herausforderungen wie z.B. Klimawandel, Ressourcenverknappung, Wassermangel und Urbanisierung spielen soziale Innovationen dementsprechend eine immer größere Rolle, insbesondere in Anlehnung an das Leitbild einer nachhaltigen Entwicklung.

Die Energiewende erfordert daher ein Umdenken in allen Gesellschafts- und Wirtschaftsbereichen – sie muss im Kopf jedes Menschen stattfinden. Hier setzt die Rebound-Forschung an, die in der Diskussion in der Energiewende zunehmend an Bedeutung gewinnt. Daher freuen wir uns, Ihnen mit dieser Broschüre die zentralen Ergebnisse einer Studie zum sog. „Rebound-Effekt“ unter

Leitung des Institute for Future Energy Consumer Needs and Behavior (FCN) am E.ON Energy Research Center der RWTH Aachen mit den Partnern des Rheinisch-Westfälischen Instituts für Wirtschaftsforschung, Essen (RWI) und dem Lehrstuhl für Internationale Wirtschaftsbeziehungen (IW) an der RWTH Aachen zu präsentieren. Bisher gibt es im Bereich der Relevanz von Rebound-Effekten und deren Auswirkungen auf die Verringerung von Effizienzsteigerungen noch große Unsicherheiten. Die Ergebnisse der Studie sollen dementsprechend zu einer weiteren gesellschaftlichen und wissenschaftlichen Diskussion des Phänomens beitragen und einen Beitrag zur erfolgreichen Umsetzung der Energiewende leisten.



Ansprechpartner:

Dr. Frank-Michael Baumann, Clustermanager

Georg Unger, M.A. & MBA & M.Sc.
Fossile Energieumwandlung und
Transformationsforschung

**Dr. Stefan Rabe, Konversionstechnologien
und Energienetze und -speicher**

Dr. Benedikt Rösen, Erneuerbare Energien

Sabine Michelatsch, Kommunikation

www.cef.nrw.de

Vermeidung von Rebound als zentrale Herausforderung

Prof. Dr. Reinhard Madlener
RWTH Aachen



Die Rebound-Forschung ist, wenn man vom Frühwerk „The Coal Question“ (1865) des britischen Ökonomen William Stanley Jevons mal großzügig absieht, inzwischen etwa 35 Jahre alt. Dennoch sind sich die Experten nach wie vor uneins darüber, ob die Steigerung der Energieeffizienz durch technologische Innovation etwas Positives (im Sinne von „No Regret“) darstellt und man Rebound-Effekte daher konsequent vermindern bzw. vermeiden sollte, um die Ressourceneinspar-Potentiale durch Energieeffizienz zu maximieren. Dabei hat diese Uneinigkeit nur teilweise damit zu tun, dass die Rebound-Forscher nicht völlig ausschließen können, dass „Backfire“ (Rebound > 100 %) in der Realität tatsächlich vorkommt. Sie können auch nicht sagen, ob Reboundeffekte von beispielsweise 50 % - gleichbedeutend mit einer Halbierung der tatsächlichen Energieeinsparung im Vergleich zur (aus Ingenieurs-sicht) erwarteten Einsparung - noch akzeptabel sind. Neben der Frage nach der tatsächlichen Höhe von Rebound-Effekten in den verschiedenen Bereichen der Wirtschaft und Gesellschaft und insgesamt stellt sich auch die Frage nach der optimalen Höhe und dem optimalen Mix der Rebound-Effekte.

Rationales ökonomisches Verhalten bedeutet: wenn eine Energiedienstleistung (Mobilität, Beleuchtung, Beheizung) günstiger zu haben ist – beispielsweise durch energie(kosten-)sparende technologische Innovation – dann wird diese normalerweise auch stärker nachgefragt. Im Sinne eines funktionierenden Marktes und der ökonomischen Effizienz (optimale Allokation knapper Ressourcen) ist das durchaus wünschenswert. Im Sinne der ökologischen Nachhaltigkeit und der Ressour-

„Es ist höchste Zeit gesellschaftsfähige und mas-sentaugliche Auswege aus der enormen Abhängig-keit von fossilen Energiequellen zu suchen. Die Stei-gerung der Energieeffizienz durch technologische Innovation stellt für sich kein Allheilmittel zur Lö-sung von Umwelt- und anderen Ressourcenproble-men dar, ist aber – gekoppelt mit weniger energiein-tensiven Lebensstilen und ökonomisch sinnvoller Energie- und Klimapolitik – dennoch ein wichtiges Element einer nachhaltigen Entwicklung.“

Prof. Dr. Reinhard Madlener, www.fcen.eonerc.rwth-aachen.de

censchonung ist es aber mitunter desaströs, da wir als Menschheit, die den Wohlstand ganz wesentlich den fossilen Energieträgern verdankt, die Tragfähigkeit des Planeten längst überschritten haben. Daher müssen wir dringend nach Auswegen aus diesem Dilemma der materialistischen und energiehungrigen Wachstumsgesellschaft suchen – für ein langfristig nachhaltiges Energiesystem.

Bei der Beurteilung der ökonomischen Effizienz und der Sinnhaftigkeit der Minimierung von Rebound-Effekten sollte man wohlfahrtsökonomische Betrachtungen mit einschließen. Wenn wir mit einem energieeffizienteren Auto mehr fahren und die Umwelt durch diese Verhaltensänderung stärker belasten als unbedingt nötig, können dadurch zusätzliche externe Kosten entstehen.

Die Interessen von Umwelt- und Energiepolitik („Wir sind im Anthropozän angelangt, aber nach wie vor sehr weit entfernt von ökologischer Nachhaltigkeit“) stehen den Interessen der Wirtschafts- bzw. Wachstumspolitik („Innovation und Wachstum sind gut, da dies den Fortschritt und die Arbeitsplätze sichert“) gegenüber. Dieser Zielkonflikt besteht, obwohl eine nachhaltige Energieversorgung ja auch ein Ziel der Wirtschaft sein müsste, umgekehrt aber eine leistbare, hinreichende und sichere Energieversorgung ebenfalls ein klassisches energiepolitisches Ziel(-bündel) darstellt.

Rebound-Effekte sind per se nicht notwendigerweise (nur) schlecht. Bedeuten sie doch, dass die Energiekonsumenten auf Preissignale reagieren und ihren Nutzen entsprechend maximieren - gleichbedeutend mit der effizienten Allokation knapper Ressourcen entsprechend von Preissignalen (hier: der Preis einer kostengünstiger gewordenen Energiedienstleistung). Wichtig dabei ist, externe Effekte in der Analyse mit zu berücksichtigen und Rebound nicht nur auf den direkten Rebound (also den Preiseffekt) zu reduzieren, sondern gesamthaft aus einer wohlfahrtstheoretischen Perspektive zu betrachten. Denn zumindest theoretisch, empirisch ist das viel schwieriger nachzuweisen, gibt es ein optimales Rebound-Niveau, welches erreicht bzw. gehalten werden sollte. Ein Rebound von Null wäre daher genauso unsinnig wie eine Umweltverschmutzung von Null, da die Grenzkosten der Rebound-Vermeidung vermutlich deutlich höher wären als der Grenznutzen, der aus einer weiteren Einheit Effizienzsteigerung generiert würde. Andersherum müssen sich die für die Energiepolitik Verantwortlichen aber auch bewusst sein, dass eine auf Energieeffizienz basierende Politik zum Zweck der Res-

sourceenschonung weniger effektiv und damit auch weniger kosteneffizient ist, wenn die Reboundeffekte entsprechend hoch sind.

Es geht also letztlich darum, eine vernünftige Balance zwischen der Verminderung von Rebound-Effekten und resultierenden Einbußen bei den durch Energieeffizienzsteigerungen induzierten individuellen, sektoralen und auch makroökonomischen Effekten (inklusive externer Kosten und Nutzen) zu erreichen. Dafür bedarf es einer Weiterentwicklung der theoretischen und empirischen Rebound-Forschung auf der Mikro-, Meso- und Makroebene, um für Politik, Wirtschaft und Gesellschaft verbesserte Handlungsempfehlungen in einer zunehmend komplexeren Welt ableiten zu können. Es bedarf aber auch – aus Sicht jedes Einzelnen und auch der Gesellschaft – einer kritischen Reflexion darüber, wie wir uns den Gesundheitszustand unseres Planeten in 100 Jahren wünschen, was die Nachwelt über uns denken soll, und welche materiellen Konsumbedürfnisse wir getrost zurückfahren können ohne deswegen notwendigerweise gleich unglücklicher sein zu müssen.

Bedarf es einiger Beispiele? Der neue Tesla SUV in der Variante PSOD leistet 773 PS, hat ein Leergewicht von 2,4 Tonnen und beschleunigt in weniger als 3,5 Sekunden von 0 auf 100 km/h; die Höchstgeschwindigkeit beträgt stattliche 250 km/h. In den USA (und nicht nur dort) steigt der Absatz konventioneller Sport Utility Vehicles (SUV) wieder drastisch an, seit die Ölpreise im Keller sind, und es wird wieder mehr gefahren. In Großbritannien wurden hohe Reboundeffekte bei der effizienten Beleuchtung durch Sparlampen festgestellt - trotz starker Bemühungen seitens der Politik den Strombedarf für Beleuchtung zu senken. Es bleibt noch abzuwarten, wie hoch die Reboundeffekte der LED-Technologie sein werden, aber meines Erachtens werden diese sehr beträchtlich sein.

Die Rebound-Forschung befasst sich aktuell mit der Weiterentwicklung der (mikroökonomischen) Theorie, der Verbesserung der angewandten Methoden und der Verbreiterung der empirischen Basis, z.B. durch die Aktualisierung von Ergebnissen unter Verwendung neuerer oder besserer Daten, aber auch durch Studien über weitere Länder und neue Aspekte wie etwa die zweiseitige Rolle der Informations- und Kommunikationstechnologien. Die Verknüpfung bzw. Berücksichtigung verschiedener Disziplinen aber auch die kritische Reflexion der Rebound-Forschung und –Debatte sind weitere Bestandteile der aktuellen Forschungsansätze.

Kurze Einführung in die Rebound-Begrifflichkeiten

Prof. Dr. Reinhard Madlener
RWTH Aachen

Energie-Rebound ist ein Phänomen, welches besagt, dass verbesserte Energieeffizienz, oder auch Energiesparen durch Änderung des Verbrauchs- oder Entscheidungsverhaltens (privater Haushalte oder Unternehmen), zusätzlichen Energieverbrauch erzeugt, sodass der Nettoeffekt bzgl. der Entwicklung des Energieverbrauches über die Zeit letztlich unsicher ist.

Rebound infolge von Energieeffizienz-Verbesserungen (und nicht etwa anderen Arten des Energiesparens) kann als ein kombiniertes technisch-verhaltensökonomisches Phänomen aufgefasst werden. Das Energiesparen erfolgt aufgrund von technischen Verbesserungen der energieverbrauchenden Geräte und Anlagen (d.h. der Ausstattung). Diese Einsparung verursacht bzw. initiiert sodann ökonomisch motivierte Reaktionen und sonstige Verhaltenseffekte – bspw. die intensivere Nutzung energieeffizienterer Geräte (Preiseffekt), die Verausgabung eingesparter Finanzmittel (Einkommenseffekt) sowie die Diffusion effizienterer und damit attraktiverer Technologien – welche allesamt den Energieverbrauch beeinflussen.

Technische Energieeffizienz-Verbesserungen sind nicht der einzige mögliche Ausgangspunkt. Energiesparen kann auch durch Änderung des Verhaltens entstehen (Veränderung der Energiedienstleistungsnachfrage, bspw. durch weniger Autofahren, Einstellen niedrigerer Raumtemperaturen), was in der Folge verhaltensökonomische Änderungen stimulieren kann, welche die ursprünglichen Einsparungen teilweise oder sogar gänzlich wieder zunichtemachen können. Wohingegen mit Effizienzsteigerungen dieselben Funktionen oder Dienstleistungen mit geringerem Energie- (bzw. Exergie-) Einsatz erfüllt werden können, werden beim Energiesparen ohne Effizienzsteigerung die Energiekosten pro Einheit Energiedienstleistung nicht reduziert (typischerweise ändern sich die Funktionen oder Energiedienstleistungen, d.h. diese werden in ihrer Größe und/oder Anzahl geringer). Energieeffizienz-Verbesserungen werden daher sehr wahrscheinlich grössere Rebound-Effekte hervorrufen als andere Arten des Energiesparens.

Rebound ist ein Phänomen, welches auf mehreren Ebenen auftritt. Um Rebound wirksam zu bekämpfen ist letztlich immer eine Lösung auf der Systemebene erforderlich; letztlich sollte die politische Aufmerksamkeit daher immer auch dem Rebound auf globaler Ebene gelten. Wenn private Haushalte oder Unternehmen Energiesparaktivitäten betreiben, können diese im eigenen Subsystem (bewusst oder unbewusst) zusätzliche Energieverbräuche hervorrufen. Eine Möglichkeit wäre es da-

her, die Akteure auf Rebound-Effekte aufmerksam zu machen, die im eigenen persönlichen Umfeld („own realm“) auftreten. Rebound tritt auch auf höheren Aggregationsebenen als dem privaten Haushalt oder dem Unternehmen (bspw. Industriepark, Kreis, Stadt, Region, Land, Staatengruppen, globale Ebene) auf. Eine Einschätzung der Rebound-Mechanismen und Höhe der Effekte ist umso schwieriger, je höher die Aggregationsebene ist (sowohl theoretisch als auch empirisch), da es sowohl komplexere Interaktionen und Feedback-Mechanismen als auch eine zunehmende Anzahl an Akteuren und Aktivitäten zu berücksichtigen gilt (van den Bergh 2011). Dies spricht letztlich für das Zulassen von Unsicherheit in den Rebound-Schätzungen bzw. die Anwendung des Vorsichtsprinzips.

Graue Energie – d.h. alle zur Produktion von Gütern und Dienstleistungen benötigten direkten und indirekten Energieinputs – werden oft vergessen oder vernachlässigt, obwohl diese gerade für weit verbreitete Technologien sehr bedeutsam sein können. Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT) werden in diesem Zusammenhang oft ins Spiel gebracht, um Umweltressourcen zu schonen (papierloses Büro usw.). Der Rebound-Effekt von IKT kann jedoch aufgrund der grauen Energie (bei der Herstellung von Komponenten) als auch der Verwendung der IKT-Geräte beachtlich sein. Technologiediffusion, in Kombination mit Präferenzänderungen, kann ebenfalls sehr bedeutsam sein, insbesondere wenn

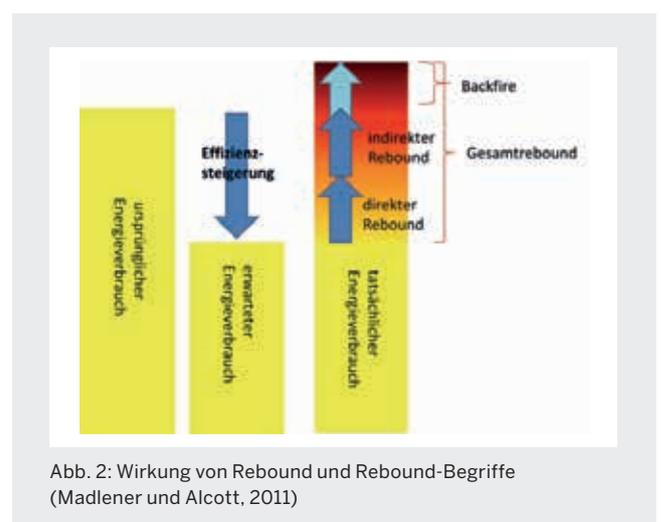


Abb. 2: Wirkung von Rebound und Rebound-Begriffe (Madlener und Alcott, 2011)

es sich um die Diffusion von Allzwecktechnologien (sog. „General Purpose Technologies“) handelt. Komplexe Netze von Unternehmensinteraktionen, lange Produktions- bzw. Wertschöpfungsketten und internationale Logistik/Transportsysteme können für ein umfassendes Verständnis der auftretenden

den Reboundeffekte sehr wichtig sein. Insgesamt stellt sich die Situation als ein komplexes Bild von Rebound-Pfaden dar. (van den Bergh 2011, S. 48) Daraus lässt sich schlussfolgern, dass auch wenn nicht jeder einzelne Rebound-Mechanismus in jeder Situation eine Rolle spielt und die relevanten Mechanismen jeweils nur ein paar Prozente betragen, insgesamt dennoch ein beachtlicher Rebound-Effekt entstehen kann (Anm.: Wie sowohl Turner, 2013, als auch Borenstein, 2015, ausführen, ist der Gesamt-Rebound-Effekt aufgrund der verschiedenen Komponenten mit positiven und manchmal auch negativen Vorzeichen sehr schwer abzuschätzen und daher auch nicht ohne weiteres verallgemeinerbar).

Rebound wird auch durch die Zeiteffekte energieeffizienterer Technologien beeinflusst: Wird etwa durch den Einsatz energieeffizienterer Technologie Zeit eingebüsst, so fällt der Rebound vermutlich geringer ausfallen als wenn damit Zeit eingespart werden kann.

Rebound ist ein Sub-Thema des Energieverbrauchs-Verhaltens. Wird eine wirtschaftliche Energieeffizienz-Investition getätigt, ergeben sich ceteris paribus Einsparungen über die Lebensdauer des Investitionsgutes. Wie solche monetären Einsparungen dann allerdings konkret verwendet werden, hat zu einer langen Debatte in der energieökonomischen und -politischen Literatur geführt, obwohl der zugrunde liegende Mechanismus relativ einleuchtend ist: die effizientere Energiedienstleistungs-Produktion setzt Mittel frei, die für andere Zwecke genutzt werden können, welche jeweils wiederum mit einem gewissen Energieverbrauch verbunden sind, wodurch Rebound entsteht.

Die Rebound-Debatte wird vor allem über die privaten Haushalte geführt, möglicherweise wegen der grösseren Zahl empirischer Studien zum direkten Rebound-Effekt auf der Konsumseite (dies, obwohl William Stanley Jevons – quasi der „Vater“

der Rebound-Debatte – 1865 in seinem Werk „The Coal Question“ die Inputfaktoren für die Produktion und nicht den Haushaltskonsum im Visier hatte!) und auch wegen der stärkeren Betonung in den meisten Literaturübersichten. Eine ähnliche Logik wie für partialanalytische Rebound-Untersuchungen der privaten Haushalte kann (und sollte!) jedoch auch bezüglich Energieeffizienz-Steigerungen in Unternehmen angewandt werden.

Die Zahl der empirischen Rebound-Studien auf der gesamtwirtschaftlichen Ebene ist in den letzten Jahren zwar angestiegen, aber nach wie vor vergleichsweise gering. Wie Turner (2013, S. 31) anmerkt, dürften die grundlegenden Energie-spar-Strategien für private Haushalte und Unternehmen ähnlich sein, nicht notwendigerweise jedoch die Übertragungsmechanismen, welche die systemanalytisch weiter gefassten Rebound-Effekte bestimmen. Unterschiede in der Natur gesamtwirtschaftlicher Reaktionsmechanismen, je nachdem ob Energieeffizienzsteigerungen auf der Produktionsseite oder auf Seite der Endverbraucher auftreten, haben bisher hingegen erstaunlich wenig Aufmerksamkeit erhalten (vermutlich wegen des Mangels einer umfassenden theoretischen Fundierung), scheint jedoch ein fundamentales Problem bzw. ein blinder Fleck der heutigen Rebound-Literatur zu sein.

Was ist kein Rebound? Manchmal wird der mit Wirtschaftswachstum induzierte höhere Energieverbrauch auch mit Rebound in Verbindung gebracht. Korrekter scheint es zu argumentieren, dass viele der Rebound-Mechanismen zu Wirtschaftswachstum beitragen, sodass das Wirtschaftswachstum kein separater zusätzlicher Effekt ist, sondern vielmehr eine Aggregation verschiedener Effekte (vgl. van den Bergh 2011, S. 48). Anders ausgedrückt: eine effizienzbedingte Reduktion des Ressourceneinsatzes ermöglicht eine alternative (zusätzliche) Verwendung der freigesetzten Ressourcen, was wachstumsfördernd wirkt.

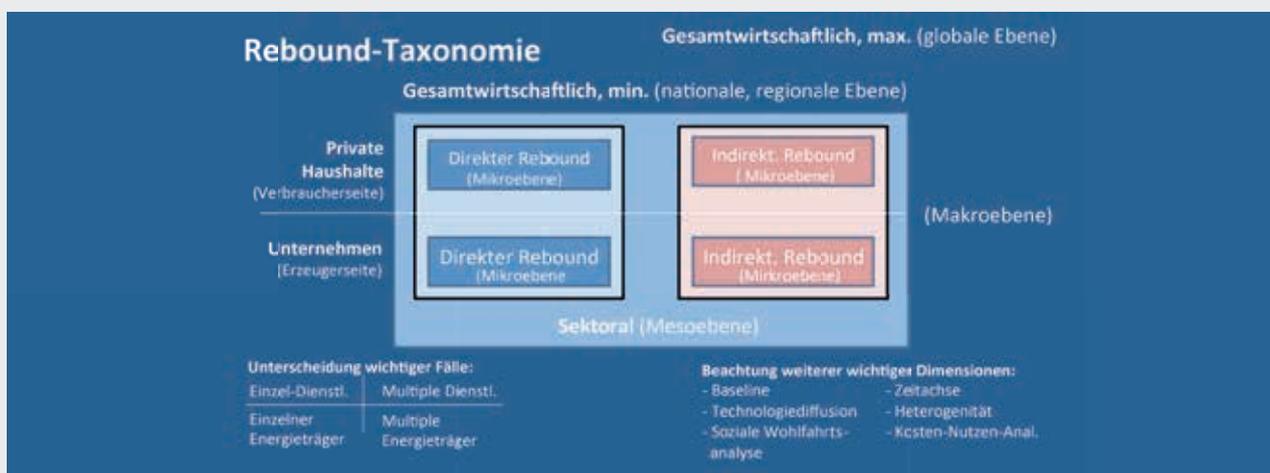


Abb. 3: Rebound-Begriffe und wichtige Fälle und Dimensionen, die es zu beachten gilt (Madlener und Turner, 2016)

Projektüberblick

	
Projekttitle	Rebound-Effekte in NRW mit besonderer Berücksichtigung von Effizienzsteigerungen in der Elektrizitätsnutzung sowie im Individualverkehr
Projektlaufzeit	1. Oktober 2013 – 31. Juli 2016
Budget	420.000 €
Projektmitarbeiter	<p>Institute for Future Energy Consumer Needs and Behavior (FCN), E.ON Energy Research Center, RWTH Aachen University Prof. Dr. Reinhard Madlener</p> <ul style="list-style-type: none"> • Mitarbeiter FCN: Tugba Atasoy, Julius Frieling, Dr. Ray Galvin, Hendrik Schmitz <p>Lehrstuhl für Internationale Wirtschaftsbeziehungen (IW), RWTH Aachen University Prof. Dr. Oliver Lorz</p> <ul style="list-style-type: none"> • Mitarbeiter IW: Hanna Krings <p>Rheinisch-Westfälisches Institut für Wirtschaftsforschung, Essen (RWI), Prof. Dr. Manuel Frondel, Prof. Dr. Colin Vance</p> <ul style="list-style-type: none"> • Mitarbeiter RWI: Fernanda Martinez-Flores
6 Arbeitspakete, parallel bearbeitet	<ul style="list-style-type: none"> • AP 1. Direkte und indirekte Rebound-Effekte bei IKT und E-Geräten in NRW (FCN) • AP 2. Rebound-Effekte im Individualverkehr und Stromverbrauch privater Haushalte in NRW (FCN, RWI) • AP 3. Rebound-Effekte in NRW infolge Tertiarisierung und technologischem Fortschritt (FCN) • AP 4. Wirtschaftliche Verflechtung von NRW und ihr Einfluss auf gesamtwirtschaftliche Rebound-Effekte (FCN, IW) • AP 5. Simulation der Umweltauswirkungen durch Energie-Rebound-Effekte in NRW (FCN) • AP 6. Projektmanagement, Workshops und Öffentlichkeitsarbeit (FCN, IW, RWI)
Projektträger	Gefördert durch den Projektträger Energie, Technologie – Nachhaltigkeit (ETN) im Auftrag des Landes Nordrhein-Westfalen, Fördernummer W029. Das Projektteam bedankt sich für die Unterstützung und stets sehr angenehme Zusammenarbeit.

Beidem Projekt „Rebound-Effekte in NRW mit besonderer Berücksichtigung von Effizienzsteigerungen in der Elektrizitätsnutzung sowie im Individualverkehr“, oder kurz: Rebound-E. NRW, handelt es sich um ein umfassendes und langfristiges Forschungsprojekt dessen Ziel ein besseres Verständnis für die Konsequenzen von Effizienzsteigerungen ist. Schon lange ist bekannt, dass Verbesserungen der Energieeffizienz nicht zwangsläufig zu einer gleich großen Reduktion des Energieverbrauchs führen. Um diesen sogenannten Rebound-Effekt im Detail besser zu quantifizieren und seine Auswirkungen auf die Energiewende und Klimaziele zu verstehen, wurde vom Institute for Future Energy Consumer Needs and Behavior (FCN) der RWTH Aachen in Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl für Internationale Wirtschaftsbeziehungen (IW)

an der RWTH und dem Rheinisch-Westfälischen Institut für Wirtschaftsforschung (RWI) in Essen dieses Projekt durchgeführt. Hierbei wurden fünf inhaltliche Arbeitspakete parallel von den Forschern bearbeitet, welche Kernthemen der Rebound-Problematik abdecken. Insbesondere mit Hinblick auf politische Initiativen zur Förderung einer verbesserten Energieeffizienz bei Haushalten und bei der Sanierung und dem Bauen von Wohnraum, wurde ein großes Augenmerk auf das Verbrauchsverhalten von Haushalten gelegt. Doch auch andere wichtige Bereiche, wie der Einfluss von Handel, die Veränderungen des Pendlerverhaltens, die Entwicklung des gesamtwirtschaftlichen Energieverbrauchs, oder auch der Einfluss neuer Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT) auf die Energieeffizienz wurden untersucht.

Die hierbei gewonnenen Erkenntnisse konnten erfolgreich bei einem Expertenworkshop vor einem internationalen Fachpublikum an der RWTH am 6.3.2015 präsentiert werden. Die geladenen internationalen Wissenschaftler und das Forscherteam konnten sich hier mit Vorträgen und im Gespräch über die neuesten Forschungsmethoden und Ergebnisse austauschen. Doch auch die Öffentlichkeit sollte von den Ergebnissen des Projektes profitieren können: Am 26.11.2015 fand in Düsseldorf bei der Akademie der Wissenschaften deswegen ein öffentlicher Workshop statt, bei dem ein interessiertes Publikum aus Wissenschaftlern, Interessenvertretern, Entscheidungsträgern aus Politik, Verwaltung, und Wirtschaft, sowie interessierte Bürger mit dem Thema Rebound vertraut gemacht wurden. Die angeregten Diskussionen während des Workshops sowie auch danach in informellen Gesprächen zeigten, dass im Zuge der Energiewende und der Problematik

des Klimawandels ein großes Interesse besteht, Energieeffizienz und ihre Implikationen genauer zu verstehen.

Diesem Zweck die öffentliche Debatte anzustoßen und über das Thema Rebound zu informieren dient auch diese Broschüre. Auf den folgenden Seiten finden Sie klar und verständlich aufbereitete Aufsätze welche an konkreten Beispielen aufzeigen, dass Energieeffizienz und Energieersparnis leider nicht immer Hand in Hand gehen. Daher gilt es zur Energieeinsparung einen ganzheitlichen Ansatz zu verfolgen, wo technischer Fortschritt gepaart mit ökonomischer Weitsicht gezielt politisch gefördert werden kann. Nur so können die gesellschaftlichen Fragen des Klimawandels und der Energiewende effektiv und effizient beantwortet werden.

Heterogene Rebound-Effekte im Individualverkehr

**Prof. Dr. Colin Vance, Prof. Dr. Manuel Frondel
RWI**

PKWs scheinen heutzutage nahezu unverzichtbar zu sein: das Auto ist das von der überwältigenden Mehrheit der Bevölkerung bevorzugte individuelle Mobilitätsmittel. Auch wenn die Anschaffung eines Autos in der Regel mit hohen Kosten verbunden ist, die von den Käufern häufig als unvermeidbar angesehen werden und die nach dem Kauf meist in Vergessenheit geraten, wird bei Nutzung des PKWs zumeist sehr genau auf die zugehörigen Kosten geachtet. Es gibt wenige Güter, deren Preis der Mehrheit der Bürger so gut bekannt ist, wie der Benzinpreis. Viele Autofahrer achten in ihrem Tankverhalten tatsächlich sehr genau darauf, möglichst kostengünstig zu tanken.

Entsprechend legen sich viele Bürger auch einen energieeffizienten Diesel-PKW zu, um die Fahrtkosten möglichst niedrig zu halten. Kurzum: Die Kosten für individuelle Mobilität spielen im Nutzungsverhalten von Autos in der Regel eine nicht unerhebliche Rolle. Tatsächlich reagieren die Bürger in Bezug auf die Fahrtkosten und die Kraftstoffpreise sehr sensibel, wie Schätzungen von Benzinpreiselastizitäten in Höhe von -0,7 bis -0,4 auf Basis des Deutschen Mobilitätspanels (MOP), einer bundesweiten, jährlichen Erhebung des Mobilitätsverhaltens deutscher Haushalte, nahelegen. Demnach reduziert sich die Fahrleistung bei einer Erhöhung des Benzinpreises um 10 % um bis zu 7 %.

Umgekehrt ist aber auch zu erwarten, dass die Fahrleistung steigt, wenn die Fahrtkosten sinken, etwa durch die Anschaffung eines Neuwagens mit höherer Energieeffi-

zienz, d.h. mit einem geringeren Kraftstoffverbrauch pro 100 km. Infolge der dadurch tendenziell steigenden Fahrleistung wird die aufgrund der höheren Effizienz mögliche Kraftstoffeinsparung zumindest teilweise wieder zunichte gemacht. Das Ausmaß dieser Verhaltensreaktion auf die Verbesserung der Energieeffizienz, die in der energieökonomischen Literatur als Rebound-Effekt bezeichnet wird, ist von zentraler Bedeutung für die Effektivität einer jeglichen Energieeffizienzmaßnahme, welche nicht selten aus Klimaschutzgründen ergriffen wird. Hohe Rebound-Effekte würden die durch Effizienz- bzw. Klimaschutzmaßnahmen potentiell mögliche Emissionsreduktion stark schmälern.

Daher sind erhebliche Zweifel angebracht, ob die von einer EU-Direktive aus dem Jahre 2009 vorgeschriebene Reduzierung der spezifischen Emissionen neu zugelassener Autos von im Mittel 160 auf 130 gCO₂ je km tatsächlich zu einem 19-prozentigen Rückgang der Kohlendioxid-Emissionen im PKW-Verkehr führt, wie es die EU-Kommission erwartet. Empirische Schätzungen des Rebound-Effektes im Individualverkehr auf Basis des Deutschen Mobilitätspanels von bis zu 70 % lassen erwarten, dass ein guter Teil der als Folge der Direktive theoretisch möglichen Emissionsreduktionen aufgrund einer um bis zu 70 % höheren Fahrleistung wieder zunichte gemacht wird. Auch wenn wir selbst skeptisch sind, ob die Rebound-Effekte tatsächlich so hoch sind und deutsche Autofahrer mit effizienteren Fahrzeugen wirklich ihre Fahrleistung in einem derarti-

gen Umfang erhöhen, sind solche Verhaltensänderungen nicht gänzlich von der Hand zu weisen.

Darauf deuten jedenfalls zahllose empirische Studien hin, die für andere Länder, hauptsächlich die USA, vorliegen. Während Studien aus Europa üblicherweise höhere Rebound-Effekte von bis zu 80 % aufweisen, tendieren Studien aus Nordamerika zu niedrigeren Rebound-Effekten von bis zu 30 %. Ein Grund für diese Differenzen ist die unterschiedliche Verfügbarkeit von öffentlichen Verkehrsmitteln. So reagieren Autofahrer aus ländlichen Gebieten der USA, wo öffentliche Verkehrsmittel nur beschränkt vorhanden sind, relativ wenig auf Kostenänderungen bezüglich des Autofahrens, da sie wenig Alternativen haben. Die Rebound-Effekte fallen entsprechend klein aus.

Ganz anders stellt sich die Situation für NRW dar, wo das öffentliche Verkehrsnetz vergleichsweise gut ausgebaut ist, vor allem in städtischen, häufig aber auch ländlichen Gebieten. Um herauszufinden, ob sich das Mobilitätsverhalten in NRW deutlich von dem der Bürger anderer Bundesländer unterscheidet, haben wir die Daten des Deutschen Mobilitätspanels für die Jahre von 2000 bis 2013 herangezogen und ein (ökonometrisches) Modell entwickelt, mit dem insbesondere das Ausmaß des Rebound-Effektes geschätzt werden sollte. Neben den Kraftstoffpreisen und der Effizienz der PKW wurden in diesem Modell soziodemographische Größen berücksichtigt, welche die Fahrleistung beeinflussen, etwa die Haushaltsgröße oder der Beschäftigungsstatus der Haushaltsmitglieder.

Es liegt unmittelbar nahe, dass zur Schätzung des Rebounds die Beziehung zwischen Fahrleistung und Effizienz von PKWs zu ergründen ist. Allerdings ist bei dieser Herangehensweise höchste Vorsicht geboten, da Haushalte, die viel fahren, sich häufiger für effiziente Autos entscheiden als Haushalte, die wenig fahren. Bei diesen Haushalten ist die Fahrleistung eine wichtige Determinante der Kraftstoffeffizienz des Autos, während mit dem Begriff des Rebounds die umgekehrte Vorstellung verbunden ist: die Effizienz des Autos beeinflusst maßgeblich die Fahrleistung.

Würde man dieser Möglichkeit einer umgekehrten Kausalitätsrichtung nicht Rechnung tragen, würden der Effekt von Effizienz auf die Fahrleistung und somit der Rebound-Effekt überschätzt werden. Um diese Verzerrung zu vermeiden, beruht der bislang in der Literatur üblicherweise gewählte Ansatz zur Schätzung des Rebound-Effektes auf der Quantifizierung der (negativen) Beziehung zwischen Kraftstoffpreisen und Fahrleistung: Höhere Preise führen tendenziell zur Verringerung der Fahrleistung, niedrigere Preise zu einer Erhöhung.

Die der Identifizierung des Rebounds anhand von Preiseffekten implizit zugrunde liegende Annahme ist, dass eine Senkung der Kraftstoffpreise denselben Effekt auf die Fahrleistung hat, wie eine im Ausmaß vergleichbare Erhöhung der Effizienz des Autos. Für diese auf den ersten Blick sehr plausible theoretische Annahme, hinter der die Vorstellung steckt, dass es einem vollkommen rationalen Autofahrer gleich ist, wie die Fahrtkosten gesenkt werden, ob durch einen Rückgang der Kraftstoffpreise oder durch eine vergleichbare Verbesserung der Energieeffizienz, findet sich in der Literatur häufig auch empirische Evidenz.

In unserer aktuellsten Studie haben wir diesen Weg ebenfalls beschritten und den Rebound-Effekt mittels der Preiselastizität der Fahrleistung ermittelt, welche die relative Änderung der Fahrleistung infolge einer Erhöhung der Kraftstoffpreise um ein Prozent angibt. Dieser Weg spiegelt die Tatsache wieder, dass der Rebound-Effekt von Effizienzverbesserungen bei der individuellen Mobilität im Grunde einen Preis- bzw. Kosteneffekt darstellt: Der Rebound beschreibt die Reaktion der Autofahrer in Bezug auf ihre Fahrleistung bei einer Verringerung der Fahrtkosten, die durch eine Effizienzverbesserung ausgelöst wird.

Die Identifizierung des Rebound-Effektes mittels Preiselastizitäten und die damit verbundene Verwendung der Kraftstoffpreise bringen einige Vorteile im Hinblick auf die Durchführung und Qualität der Schätzung mit sich. Erstens können Autofahrer die Kraftstoffpreise im Gegensatz zur Effizienz des Fahrzeugs nicht beeinflussen, denn sie haben die Preise an den Tankstellen weitgehend zu akzeptieren: durch die Wahl der Tankstelle können die Autofahrer das Preisniveau nur in begrenztem Maße frei wählen. Im Gegensatz zur Effizienz stellen Kraftstoffpreise für die Autofahrer daher weitgehend exogen vorgegebene Größen dar, wohingegen sie die Energieeffizienz durch die eigene Fahrweise und beim Kauf des Autos selbst bestimmen können (die Exogenität der erklärenden Variablen ist eine entscheidende Voraussetzung für die unverzerrte Schätzung von ökonometrischen Modellen).

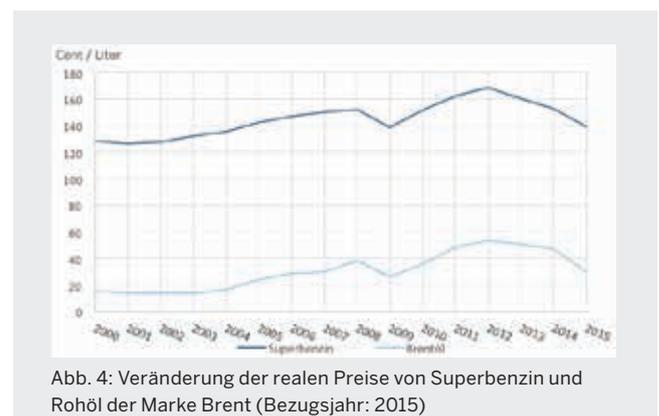


Abb. 4: Veränderung der realen Preise von Superbenzin und Rohöl der Marke Brent (Bezugsjahr: 2015)

Zweitens ist eine starke Variation in den Werten der erklärenden Variablen vorteilhaft für die Qualität der Schätzung. Tatsächlich variieren Kraftstoffpreise zeitlich und räumlich in starker Weise. So ist der jahresdurchschnittliche reale (d.h. inflationsbereinigte) Preis für Superbenzin zwischen dem Jahr 2000 und dem Jahr 2008 um knapp 19 % gestiegen, auf einen Wert von ca. 1,52 € pro Liter (in Preisen des Jahres 2015). Nach einem Rückgang im Zuge der globalen Wirtschaftskrise wurde mit ca. 1,69 € pro Liter der bislang höchste Preis im Jahr 2012 erreicht, bevor im Jahr 2015 der Preis von Superbenzin um gut 17 % auf ca. 1,39 € pro Liter zurückging. Diese Preisentwicklung wird entscheidend durch die Veränderung der Rohölpreise bestimmt: Wie Abb. 4 veranschaulicht, gibt es einen sehr starken Zusammenhang zwischen dem Rohöl- und dem Benzinpreis.

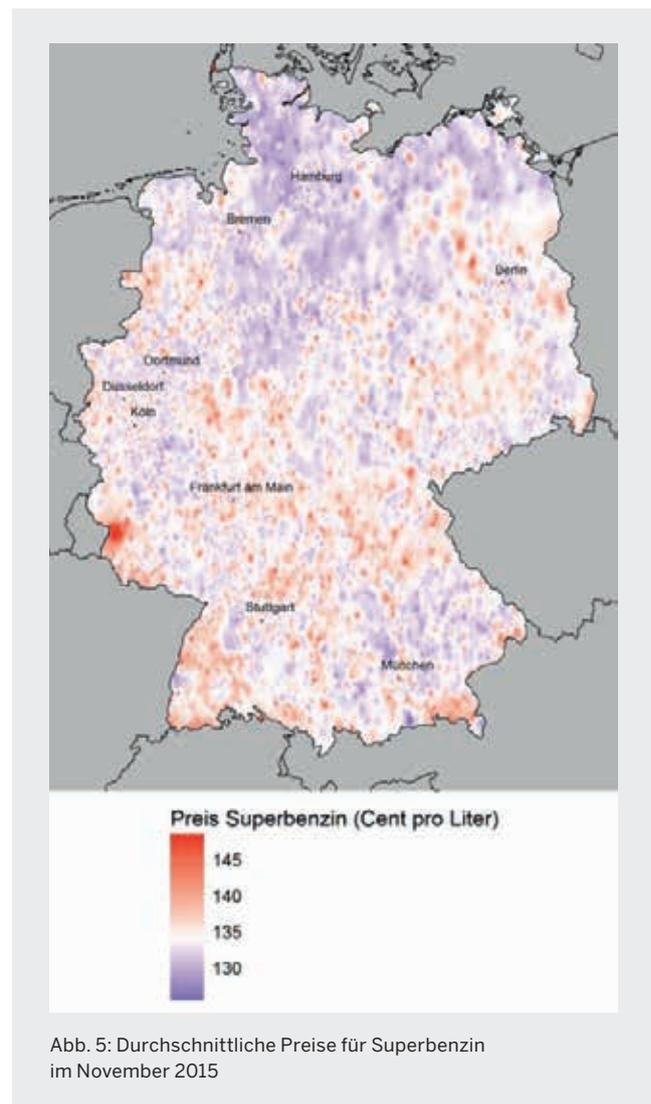
Auch regional variieren die Benzinpreise in starkem Maße (Abb. 5). So unterscheiden sich die Tagesdurchschnittspreise in Deutschland für den November 2015 je nach Region um bis zu 15 Cent und liegen zwischen 1,30 und 1,45 € pro Liter. Der Tagesdurchschnittspreis für NRW entspricht etwa dem Mittelwert dieses Intervalls und beträgt 1,34 € pro Liter. Abb. 5 zeigt, dass es auch innerhalb NRW große Unterschiede bei den Benzinpreisen gibt.

Daneben hängt die mit einem PKW zurückgelegte Fahrleistung nach unseren Forschungsergebnissen in starkem Maße vom Wohnort und von den soziodemographischen Charakteristika eines Haushaltes ab, nicht zuletzt vom Einkommen. Darüber hinaus sollte es deutliche Unterschiede in der Fahrleistung eines Haushaltes geben, wenn dieser mehrere Autos besitzt. Es ist zu erwarten, dass sich die Preisreagibilität von Haushalten, die im Besitz mehrerer Autos sind, von der Preisreaktion von Haushalten mit nur einem PKW deutlich unterscheidet, denn bei Haushalten mit mehreren Autos besteht die Möglichkeit, bei steigenden Kraftstoffpreisen auf das effizienteste Auto zu wechseln und so die ursprüngliche Fahrleistung beizubehalten, anstatt wegen gestiegener Kraftstoffpreise auf Fahrten zu verzichten. Aus den MOP-Daten geht hervor, dass im Jahr 2013 14 % der Haushalte in Deutschland kein Auto besaßen, 55 % hatten ein Auto und 31 % nannten zwei oder mehr Autos ihr Eigen.

In ähnlicher Weise ist zu erwarten, dass sich die Höhe der Rebound-Effekte für Haushalte mit nur einem Auto von der mit mehreren PKW unterscheidet. Dem haben wir bei unseren Schätzungen Rechnung getragen, indem wir die Rebound-Effekte jeweils getrennt für Haushalte mit nur einem PKW bzw. mit mehreren Autos geschätzt haben (Abb. 6a und 6b). Statistische Tests haben ergeben, dass

es keinerlei Unterschiede in der Preisreagibilität – und damit in der Höhe der Rebound-Effekte – zwischen Haushalten aus NRW und anderen Bundesländern gibt. Wir haben daher auf eine getrennte Darstellung der Ergebnisse für NRW verzichtet und zeigen im Folgenden die Resultate für ganz Deutschland.

Der mittlere Rebound-Effekt liegt bei Haushalten mit nur einem Auto bei rund 45 %. Die Effekte variieren zwischen diesen Haushalten stark und bewegen sich zwischen 27 % und 62 % (Abb. 6a). Das bedeutet, dass bis zu 62 % der Energieersparnisse, die aufgrund von Effizienzverbesserungen realisierbar wären, durch vermehrtes Fahren verloren gehen. Der durchschnittliche Rebound-Effekt von Haushalten mit mehr als einem Auto ist mit einem Wert von 47 % geringfügig höher. Die Variation der Rebound-Effekte ist bei diesen Haushalten jedoch erwartungsgemäß stärker als bei Haushalten mit nur einem Auto: die Rebound-Effekte liegen in einem Intervall von 25 % bis 82 % (Abb. 6b).



Zusammenfassend bleibt festzuhalten, dass der Rebound-Effekt im Bereich der individuellen Mobilität deutscher Haushalte mit im Mittel 45-47 % von erheblicher Größenordnung ist. Damit werden die Ergebnisse unserer früheren Studien, in denen wir Rebound-Effekte von 57-67 % und 57-62 % finden, weitgehend bestätigt. Unseren Rebound-Forschungen zufolge wird daher der von der Europäischen Kommission bei der Einführung der Emissionsstandards für Neuwagen im Jahr 2009 genannte 19-prozentige Emissionsrückgang nur zu etwa der Hälfte tatsächlich erreicht. Denn die Emissionsreduktionen, die mittels dieser Emissionsstandards erzielt werden sollen, realisieren sich deshalb nur teilweise, weil sie beim Fahrer eine Verhaltensreaktion (Rebound) auslösen, die zu einer mehr oder weniger großen Erhöhung der Fahrleistung führen kann, wie die erhebliche Variation unserer Rebound-Schätzwerte zeigt.

Unsere Schätzungen zeigen zudem, dass die Erhöhung von Kraftstoffsteuern eine effektive Maßnahme zur Senkung des Kraftstoffverbrauchs sein könnte. Eine solche Maßnahme hätte direkte und indirekte Wirkungen: Zum einen hätte sie einen unmittelbaren Effekt auf das Fahrverhalten und die Fahrleistung, da dadurch die Mobilitätskosten erhöht werden. Zum anderen haben Steuern einen mittelbaren Effekt, wenn deswegen beim Kauf eines neuen Fahrzeugs ein effizientes Fahrzeug ausgewählt wird.

Würden die Mineralölsteuern Jahr für Jahr um einen lange im Voraus bekannten Betrag gesteigert, wie das in Deutschland in den Jahren 1999 bis 2003 der Fall war, würden für Käufer noch höhere Anreize gesetzt werden, in effiziente Autos zu investieren, als es durch die im internationalen Vergleich bereits ohnehin hohen Mineralölsteuersätze geschieht. Ob eine solche Maßnahme jedoch

aus politischer und gesellschaftlicher Sicht durchsetzbar wäre und noch einmal akzeptiert würde, ist jedoch fraglich, da die damit verbundenen Kosten für jedermann sehr transparent wären.

Die Kosten der von der EU-Kommission im Jahr 2009 eingeführten Emissionsstandards für Neuwagen, die nichts anderes als Effizienzvorgaben für den spezifischen Kraftstoffverbrauch darstellen, sind hingegen alles andere als transparent. Dies mag ein entscheidender Vorteil gegenüber der Erhöhung von Benzinsteuern sein, obwohl diese Standards den Kaufpreis für Neuwagen erheblich in die Höhe treiben können.

Um den damit verbundenen gesellschaftlichen Nutzen besser einschätzen zu können und um insbesondere eine realistische Einschätzung der dadurch möglichen Kraftstoff- und Emissionseinsparungen zu bekommen, muss der Rebound-Effekt jedoch unbedingt berücksichtigt werden. Dies hat die USA Europa voraus: Bei der Beurteilung der Wirkung der US-Standards für den Kraftstoffverbrauch von Neuwagen (CAFE, Corporate Average Fuel Economy) wird von offizieller Seite ein Rebound-Effekt in Höhe von 10 % einberechnet.

Da der Rebound-Effekt nach unseren Schätzungen für Deutschland und den bestehenden empirischen Studien für andere europäische Staaten eher höher ausfällt, sollte die europäische Kommission die Existenz des Rebound-Effektes bei der Beurteilung der Emissionsstandards nicht weiter ignorieren. Vielmehr sollte anerkannt werden, dass die europäischen Emissionsstandards für PKW die Effektivität der Besteuerung von Kraftstoffen unterminieren, da dadurch die Mobilitätskosten pro Kilometer gesenkt werden, wohingegen sie mit Mineralölsteuern verteuert werden sollen.

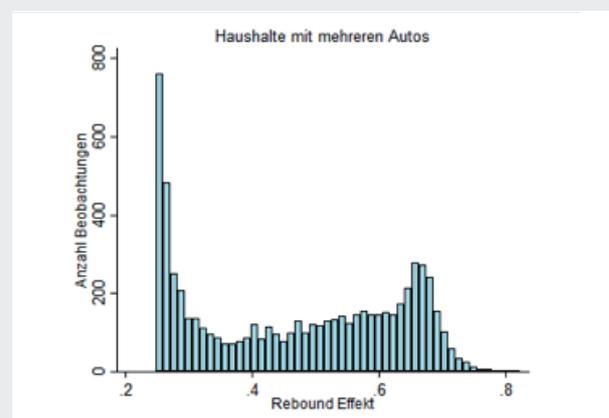
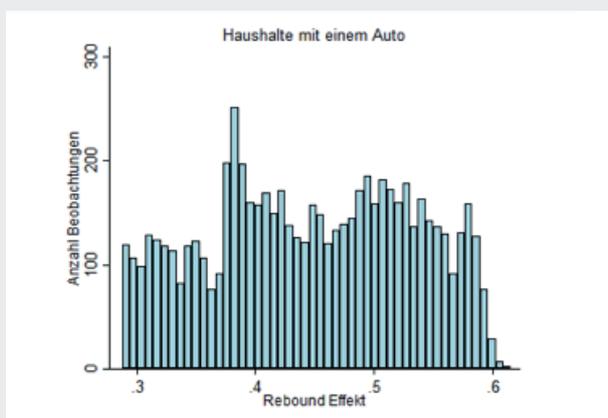


Abb. 6: Variation der Rebound-Effekte

Rebound-Effekte beim Stromverbrauch privater Haushalte

Hendrik Schmitz
FCN, RWTH Aachen

Neben dem privaten Pkw-Verkehr gehört der Stromverbrauch privater Haushalte zu den wichtigsten Faktoren im Energieverbrauch und spielt daher eine herausragende Rolle im Rahmen der Energiewende. Im Jahr 2014 entfielen 21,1% des Endenergieverbrauchs der privaten Haushalte in Deutschland auf den Energieträger Strom, während es im Jahr 1990 noch 17,7% waren. Auch absolut hat sich der Stromverbrauch privater Haushalte in diesem Zeitraum um 45 Petajoule (PJ) erhöht, was einem Anstieg von 10,7% entspricht. Gleichzeitig werden Elektrogeräte jedoch immer effizienter, teils durch staatliche Regulierung, teils durch technologischen Fortschritt. Wie ist dieser scheinbare Widerspruch von höherer Effizienz bei gleichzeitig höherem Verbrauch zu erklären? Der Rebound-Effekt kann einen Teil der Antwort darauf liefern. Als bevölkerungsreichstes Bundesland spielt NRW dabei eine zentrale Rolle. Hier wird mehr als 20% der in Deutschlands Haushalten genutzten Energie verbraucht.

Eine Steigerung der Energieeffizienz erscheint auf den ersten Blick als ideales Instrument zur Senkung des Energieverbrauchs, da sie eine Einsparung von Primärenergie bei identischem Nutzerverhalten – d.h. ohne Einschränkung der Lebensqualität von Verbrauchern – verspricht. Diese Betrachtungsweise ist jedoch aus mehreren Gründen unvollständig: zum einen sind Steigerungen der Energieeffizienz in der Regel nicht kostenfrei, sondern werden durch aufwändige Forschung und Entwicklung erreicht, die letztlich an die Käufer der entsprechenden Geräte weitergegeben werden; Effizienzsteigerungen werden also unter Umständen mit einem höheren Anschaffungspreis erkaufte. Zum anderen entstehen auch beim Stromverbrauch Rebound-Effekte, d.h. das Nutzerverhalten ändert sich derart, dass die (technisch mögliche) Einsparung an Energie durch Effizienzgewinne ganz oder teilweise wieder zunichte gemacht wird.

Dies gilt insbesondere, da durch die Vielseitigkeit des Energieträgers Elektrizität Effizienzgewinne auch völlig neue (Haushalts-)Geräte ermöglichen, die nur durch entsprechend hohe Effizienz überhaupt erst sinnvoll nutzbar und somit marktfähig sind. Somit werden zwar stromverbrauchende Geräte im Haushalt immer effizienter, gleichzeitig erhöhen sich aber Anzahl, Leistung und möglicherweise auch Nutzungsintensität der Geräte.

Die direkte Messung von Rebound-Effekten gestaltet sich dabei in der Praxis als Herausforderung, da in vielen sta-



tistischen Erhebungen auf Haushaltsebene zwar Daten zum gesamten Stromverbrauch erhoben werden, nicht jedoch zur Effizienz einzelner Geräte. Diese hängt zudem noch vom konkreten Nutzerverhalten ab, welches ebenfalls in der Regel nicht abgefragt wird. Daher machen sich Ökonomen häufig zunutze, dass eine Effizienzsteigerung auch als effektive Preissenkung interpretiert werden kann. Denn entscheidend ist aus ökonomischer Sicht für den Verbraucher nicht der spezifische Energieverbrauch, sondern der Preis, den man für eine Energiedienstleistung – z.B. ein Waschgang oder eine Stunde PC-Nutzung – zahlt. Somit führt eine Steigerung der Effizienz ebenso zu einer Senkung der Kosten, wie dies bei einer Senkung des Strompreises der Fall wäre. Da Änderungen im Strompreis deutlich leichter beobachtet werden können als Veränderungen der Energieeffizienz, betrachten Ökonomen in der Regel die Reaktion auf Preisveränderungen und nehmen diese als äquivalent zur Reaktion auf eine (theoretische) Effizienzsteigerung an.

Im Rahmen des Projekts wurde vom Forscherteam des FCN auf Basis dieser Methode eine repräsentative Erhebung ausgewertet, die von forsa gemeinsam mit dem Projektpartner RWI in regelmäßigen Abständen durchgeführt wird. Dabei werden Haushalte aus ganz Deutschland befragt, was im Vergleich zu einer Beschränkung auf NRW den Vorteil einer größeren Stichprobe mit sich bringt. Der Haushaltsenergieverbrauch pro Kopf entspricht in NRW nahezu dem Bundesdurchschnitt, was eine Übertragbarkeit der Ergebnisse auf NRW ermöglicht. Die Untersuchung des Datensatzes mit Hilfe von statistischen und ökonometrischen Methoden erlaubt dabei eine Ermittlung des Effekts, den eine Preisänderung auf die Verbrauchs-

menge hat. Die Größe dieses Effekts kann wiederum als Schätzung für den direkten Rebound-Effekt des entsprechenden Energieträgers, in diesem Fall Strom, betrachtet werden. Die Aufnahme weiterer technischer und sozio-demografischer Merkmale und Einflussgrößen in das Modell ermöglicht es zudem, die Signifikanz und Höhe des Effekts dieser zusätzlichen Variablen auf den Stromverbrauch zu schätzen. So führt ein höheres Einkommen zu einem höheren Stromverbrauch, ein höherer Bildungsgrad geht jedoch mit einem geringeren Verbrauch einher.

Im Rahmen der ökonometrischen Analyse wurde ein direkter Rebound-Effekt von 40,05 % geschätzt. Das bedeutet beispielsweise, dass eine Steigerung der Energieeffizienz um 10 % den Stromverbrauch nur um ca. 6,0 % senken würde. Der Mehrverbrauch, der die Einsparung teilweise zunichtemacht, kann sich dabei je nach Energiedienstleistung unterschiedlich manifestieren. So kann es z.B. passieren, dass die Waschmaschine häufiger genutzt und dabei weniger voll beladen wird. Ein Kühlschrank ist dagegen in der Regel dauerhaft in Betrieb, wird aber möglicherweise bei höherer Effizienz als Folge technologischer Entwicklung durch ein größeres Gerät ersetzt oder permanent auf eine kältere Temperatur eingestellt.

Der ermittelte Wert muss jedoch aus verschiedenen methodischen Gründen als Approximation verstanden werden. Der Strompreis, dessen Veränderung die Schätzung zugrunde liegt, kann steigen oder fallen, eine Effizienzsteigerung entspricht jedoch immer einer Preissenkung. Wenn Haushalte also auf Preissenkungen stärker oder schwächer reagieren als auf Preiserhöhungen, so wäre der ermittelte Wert verzerrt, da in unsere Schätzung sowohl Preissenkungen als auch –erhöhungen eingehen. In der mikroökonomischen Theorie wird eine symmetrische Preisreaktion angenommen, jedoch ist dies empirisch, speziell im Rebound-Kontext, noch nicht hinreichend erforscht.

Weiterhin handelt es sich bei dem ermittelten Wert um einen Durchschnitt aus allen Strom verbrauchenden Geräten im Haushalt. Tatsächlich könnte aber beispielsweise der Rebound für Fernsehgeräte höher oder geringer sein als der Rebound für Beleuchtung. Dies hängt im Einzelfall davon ab, wie eine bestimmte Energiedienstleistung genutzt wird.

Bei einer Bewertung von Rebound-Effekten sollten Wohlfahrtseffekte nicht außer Acht gelassen werden, auch wenn eine rudimentäre Betrachtung zunächst eine rein negative Beurteilung von Rebound nahelegt. Rebound verringert die Effektivität von Effizienzsteigerungen, führt jedoch auch zu einem Wohlfahrtsgewinn für den einzelnen Haushalt. Selbst ein (theoretisch möglicher) Rebound in Höhe von 100 % bedeutet daher mitnichten, dass eine Steigerung der Energieeffizienz ökonomisch nutz- oder sinnlos ist. Denn auch wenn in diesem Fall keine Energie eingespart würde, so könnten Verbraucher dennoch mit identischem Energieeinsatz eine höhere Lebensqualität erreichen – ökonomisch ist dies also ein Nettogewinn, wenn der Nutzen aus der intensiveren Nutzung des Energieträgers die Kosten der Effizienzsteigerung, z.B. durch die Anschaffung eines moderneren Geräts, übersteigt. Somit sollten Rebound-Effekte zwar nicht bekämpft oder vermindert, aber zumindest berücksichtigt und zur Kenntnis genommen werden, da sie das Kosten-Nutzen-Kalkül von effizienzsteigernden Maßnahmen beeinflussen. Derartige Maßnahmen verlieren für das Ziel der Senkung des Energieverbrauchs an Effektivität, je höher der Rebound-Effekt ausfällt. Gleichzeitig deutet ein hoher Rebound-Effekt darauf hin, dass preisbasierte Maßnahmen wie z.B. eine Erhöhung der Steuern für Strom eine signifikante Senkung des Stromverbrauchs erreichen können.

Zu beachten ist, dass auch indirekte Rebound-Effekte auftreten können. Dies ist der Fall, wenn die Effizienzstei-

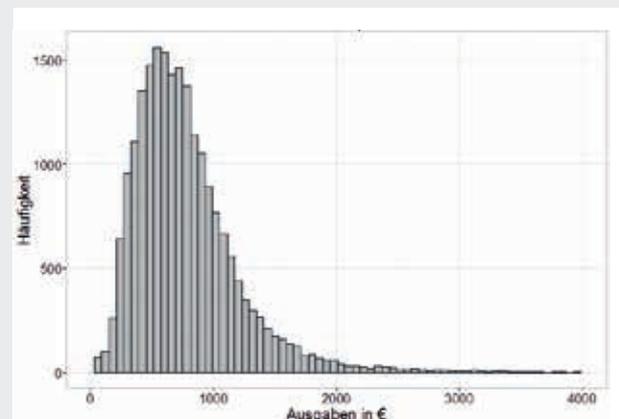
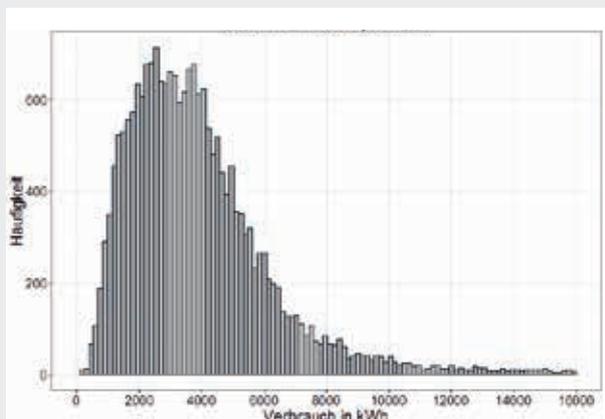


Abb. 7: Stromverbrauch pro Jahr

gerung eines Energieträgers einen Mehrverbrauch eines anderen Energieträgers hervorruft. Außerdem wird für Herstellung und Transport nahezu aller Waren Energie auf-

gewendet, beispielsweise auch für Kleidung oder Möbel, deren eigentliche Nutzung beim Endverbraucher naturgemäß keinen Energieeinsatz erfordert.

Handel mit Elektro-Altgeräten und globaler Energieverbrauch

Hanna Krings
IW, RWTH Aachen



Die stetigen Innovationen von Elektrogütern führen zu dem Wunsch, hier immer auf dem neuesten Stand der Technik zu sein. Deswegen entschließen sich Konsumenten häufig zum Austausch von funktionsfähigen Geräten gegen modernere Modelle. Die technischen Neuerungen heben unseren Lebensstandard, doch die Frage, was mit den gebrauchten Gütern passiert, wird dabei nur selten gestellt. Einige bleiben lange in der Schublade liegen, andere finden sofort den Weg zur Sammelstelle für Elektroschrott, ein großer Teil wird aber auch über Flohmärkte oder – in zunehmendem Maße – über das Internet wieder zurück in den Markt geschleust. Auf vielen verschiedenen Wegen finden die Geräte auch den Weg zu Exporteuren, die durch den Verkauf auf dem internationalen Markt die Lebensspanne der Altgeräte noch einmal verlängern.

Die Nachfrage für gebrauchte Elektrogeräte mit veralteter Technik ist hierzulande gering, in ärmeren Entwicklungsländern hingegen besitzt noch nicht jeder Haushalt einen Fernseher oder Computer, geschweige denn einen Kühlschrank oder eine Waschmaschine. Hier werden nicht nur die gebrauchten Güter aus der westlichen Welt weiter genutzt, sondern es wird auch vermeintlicher Schrott auf mögliche Reparaturen hin überprüft. Die

wichtigsten Importhäfen für ganze Container voller Elektrogeräte und Elektroschrott liegen in Accra, Ghana und Lagos, Nigeria. In vielen Ländern auf dem afrikanischen Kontinent ist von einem hohen Anteil an Gebrauchsgütern bei den importierten Elektrogütern auszugehen. Knapp zwei Drittel der Länder, die beispielsweise Computer mit einem Wert von unter 20 US-\$ pro kg importieren, liegen in Afrika – neben Nigeria und Ghana sind das Benin, Gambia, Kamerun, Madagaskar, Mauretanien, Sambia, Senegal, Sudan, Tansania und Togo. Der niedrige Durchschnittswert der Elektrogeräte weist auf einen hohen Anteil an Gebrauchsgütern unter den importierten Elektrogeräten hin. In Deutschland liegt dagegen der durchschnittliche Wert eines Computers bei knapp 47 US-\$ pro kg.

Wenn wir uns im Zusammenhang mit dem Rebound-Effekt Gedanken um den Energieverbrauch machen, dann sollten wir nicht vergessen, dass der CO₂-Austoß, der bei der Stromproduktion entsteht, keine nationalen Grenzen kennt. Die Klimaerwärmung resultiert aus den weltweiten CO₂-Emissionen – hierzu trägt der veraltete und energieineffiziente Kühlschrank weiterhin bei, auch wenn er nun z.B. in Ghana in Gebrauch ist.

Entscheidend für den globalen Rebound-Effekt ist die Frage, ob durch den Export gebrauchter Elektrogeräte in Entwicklungsländer die weltweite Anzahl an Endverbrauchern steigt oder ob gegebenenfalls noch ältere Produkte ausgetauscht werden und damit tatsächlich eine Einsparung im Energieverbrauch erzielt werden kann.

Bei drei von vier der überprüften Gruppen von Elektrogütern konnte ein Anstieg der Zahl der Endverbraucher durch den Import in afrikanischen Ländern identifiziert werden. Das heißt mit anderen Worten, dass der Import von Kühlschränken, Fernsehern und Radios (bzw. Hi-Fi-Anlagen) die Anzahl der Geräte, die dort pro Einwohner registriert sind, anhebt. Durch den Import von Computern stieg hingegen die Zahl der Endverbraucher in Afrika nicht an, demnach scheinen die importierten Computer vorrangig als Substitution für noch ältere Geräte zu dienen. Die Überprüfung weiterer Elektrogeräte war auf Grund einer fehlenden Datenbasis jedoch leider nicht möglich.

Unter Berücksichtigung des durchschnittlichen Energieverbrauchs der importierten Geräte im Vergleich zu dem gesamten Energieverbrauch der bereits genutzten Geräte, kann durch die erhöhte Anzahl der Nutzer von Elektrogeräten von einem Anstieg des Energieverbrauchs für sel-

bige von bis zu 25 % in afrikanischen Ländern ausgegangen werden. Sogar weit darüber hinaus geht der geschätzte Anstieg in Schwellenländern, also den Ländern, in denen eine Mittelschicht heranwächst, die eine besonders hohe Nachfrage nach günstiger, aber moderner Technik hat. China, Indien und Mexiko (für Computer), Nigeria (Kühlschränke) und Indonesien, Kolumbien, Brasilien, Südafrika und die Türkei (Radios) weisen Anstiege des Energieverbrauchs von bis zu 100 % bei dem Gebrauch der jeweiligen Elektrogeräte auf. Insgesamt wird der Anstieg des Energiebedarfs durch den Handel mit gebrauchten Elektrogeräten auf 62 TWh weltweit geschätzt.

Global betrachtet hat sich der Energieverbrauch in den letzten dreißig Jahren mehr als verdoppelt und wird auch voraussichtlich in den nächsten zwanzig Jahren noch weiter ansteigen. Besonders die Entwicklungsländer werden hierzu bei steigenden Einkommen und einer Anpassung ihrer Lebensstile an die „westliche Welt“ einen großen Teil beitragen. Die stetig wachsende Nachfrage nach Elektrogeräten wird dort – nach derzeitigem Stand – vor allem durch Importe gedeckt, wobei der Schwerpunkt auch weiterhin auf günstigen Produkten liegen wird. Die Frage nach dem Energieverbrauch der importierten Geräte sollte in diesem Zusammenhang unbedingt mitberücksichtigt werden.

Energieeffizienz im Informationszeitalter: IKT-Einsatz und der Rebound-Effekt

Tugba Atasoy
FCN, RWTH Aachen

Die Bedeutung von Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT) hat in den letzten Jahrzehnten immer weiter zugenommen. Die weite Verbreitung von IKT lässt sich im alltäglichen Leben überall beobachten und die verschiedenen Auswirkungen auf die Wirtschaft haben auch in der Wissenschaft viel Aufmerksamkeit erhalten. Vor allem die Erforschung der Beziehung zwischen Produktivitätsraten und die erhöhte Nachfrage von Arbeitskräften sind hier von Interesse, da es durch IKT teilweise zu massiven Umwälzungen in einzelnen Wirtschaftssektoren gekommen ist. Viele Studien untersuchen daher die Auswirkungen von IKT auf den Arbeitsmarkt und insbesondere die Rolle von IKT bei der Schaffung (oder Vernichtung) von Arbeitsplätzen. Neben diesem etablierten Forschungsbereich ist ein neues Forschungsfeld entstanden, nämlich die Erforschung wie und in welchem Ausmaß IKT dabei helfen können natürliche Ressourcen zu schonen und Energie effizienter einzusetzen.

In diesem Zusammenhang gibt es zwei Effekte die unterschieden werden können; zum einen ist da der direkte Effekt,

der entsteht wenn eine stärkere IKT-Nutzung zusätzlichen Energiekonsum nach sich zieht, und zwar nicht nur beim Betrieb von einzelnen Computern, sondern auch beim Betrieb der gesamten erforderlichen Infrastruktur und insbesondere der Rechen- und Datenzentren. Zum anderen gibt es aber auch einen indirekten Effekt, der daraus resultiert, dass der Einsatz von IKT eine größere Energieeffizienz ermöglicht. Bisher haben erst wenige Studien diese beiden Auswirkungen IKT auf die Energienachfrage und die Energieeffizienz genauer untersucht. Ein großer Teil dieser Literatur untersucht den Einfluss von IKT auf den Energieverbrauch oder die IKT-induzierte Energieeffizienz. Es gilt daher, diese Lücke in der existierenden Literatur zu verkleinern und die Bedeutung und zeitliche Entwicklung dieser gegenläufigen Effekte gegeneinander zu halten.

Obwohl die Energieeffizienz von IKT-Produkten (zum Beispiel Computer, Mobiltelefone) in den letzten Jahrzehnten enorm zugenommen hat, steigt der IKT-bezogene Energieverbrauch munter weiter an. Diese Entwicklung legt nahe, dass durch

Entwicklungen in IKT auch Rebound-Effekte entstehen, dass also die Effizienzsteigerungen auf Grund der Ausweitung der Nutzung den Energieverbrauch insgesamt kaum bremsen. In manchen Fällen können Rebound-Effekte auch so groß sein, dass durch die Effizienzsteigerungen der Verbrauch sogar erhöht wird („backfire“). Hierbei ist zu beachten, dass die Energie, die vom einzelnen Gerät oder der Infrastruktur verbraucht wird und eine wichtige Komponente des IKT-induzierten Rebound-Effektes darstellt, meist nicht Gegenstand der Forschung ist. Zwar gibt es viele umfangreiche Studien des Rebound-Effektes, jedoch meist mit spärlichen Belegen was die IKT-induzierten Rebound-Effekte angeht. Die Erforschung derselben kann jedoch dabei helfen, das Verständnis für die mannigfaltigen Auswirkungen eines größeren IKT-Einsatzes auf den Energieverbrauch besser zu verstehen. Ein denkbarer Grund für diesen Effekt ist die systematische Reaktion der Nutzer auf die Erhöhung der Energieeffizienz.

Unsere Studie im Rahmen des Projektes Rebound-E.NRW zielt darauf ab die Größe des produktionsseitigen Rebound-Effektes, welcher durch die zunehmende Nutzung von IKT entsteht mit Hilfe eines branchenübergreifenden Paneldatensatzes für 10 OECD-Länder und 27 Branchen zwischen 1995 und 2007 von Schulte et al. (2014) zu untersuchen. IKT-bezogene Informationen wurden der EU-KLEMS Datenbank entnommen (www.eu-klems.net), welche Daten zum Kapitaleinsatz in verschiedenen Ländern nach Sektoren aufgeschlüsselt enthält. Die Datenbank liefert detaillierte Informationen über die in der Produktion eingesetzten Kapi-

talgüter. Die detaillierten Indikatoren erlauben eine genaue Unterscheidung zwischen Investitionen in IKT und anderen Investitionen.

Wir schätzen die Energie-Rebound-Effekte mit Hilfe einer flexiblen Kostenfunktion (Translog-Modell). In unserem Modell berücksichtigen wir den Einsatz von IKT- und nicht-IKT Kapital in der Produktion. Der gewählte Modellansatz mit einer Kostenfunktion ermöglicht uns (i) die Untersuchung IKT-bezogener Rebound-Effekte sowie (ii) eine detaillierte Untersuchung der unterschiedlichen Auswirkungen beim Einsatz von IKT auf die Nachfrageelastizität für Energie zwischen den Sektoren und Ländern.

Methodisch gehen wir dabei wie folgt vor: Zunächst bestimmen wir die Größe des IKT-Rebound-Effektes durch eine empirische Zeitreihenanalyse des branchenübergreifenden Paneldatensatzes. Zweitens zeigen wir empirisch wie sich direkte Rebound-Effekte auf die Angebots- und Nachfrageseite auswirken. Die Betrachtung der Produktionsseite ist bisher leider ökonometrisch noch unzureichend erfolgt. Da wir bei unseren Schätzungen die Heterogenität des Einsatzes von Kapitalgütern bei verschiedenen Sektoren explizit berücksichtigen, sind wir außerdem in der Lage festzustellen, ob bisherige Schätzungen des Rebound-Effektes eventuell durch die Intensität des IKT-Einsatzes verzerrt sein könnten.

Abb. 8 zeigt auf, dass energieintensive Wirtschaftszweige typischerweise niedrige IKT-Kapitalintensitäten aufweisen,

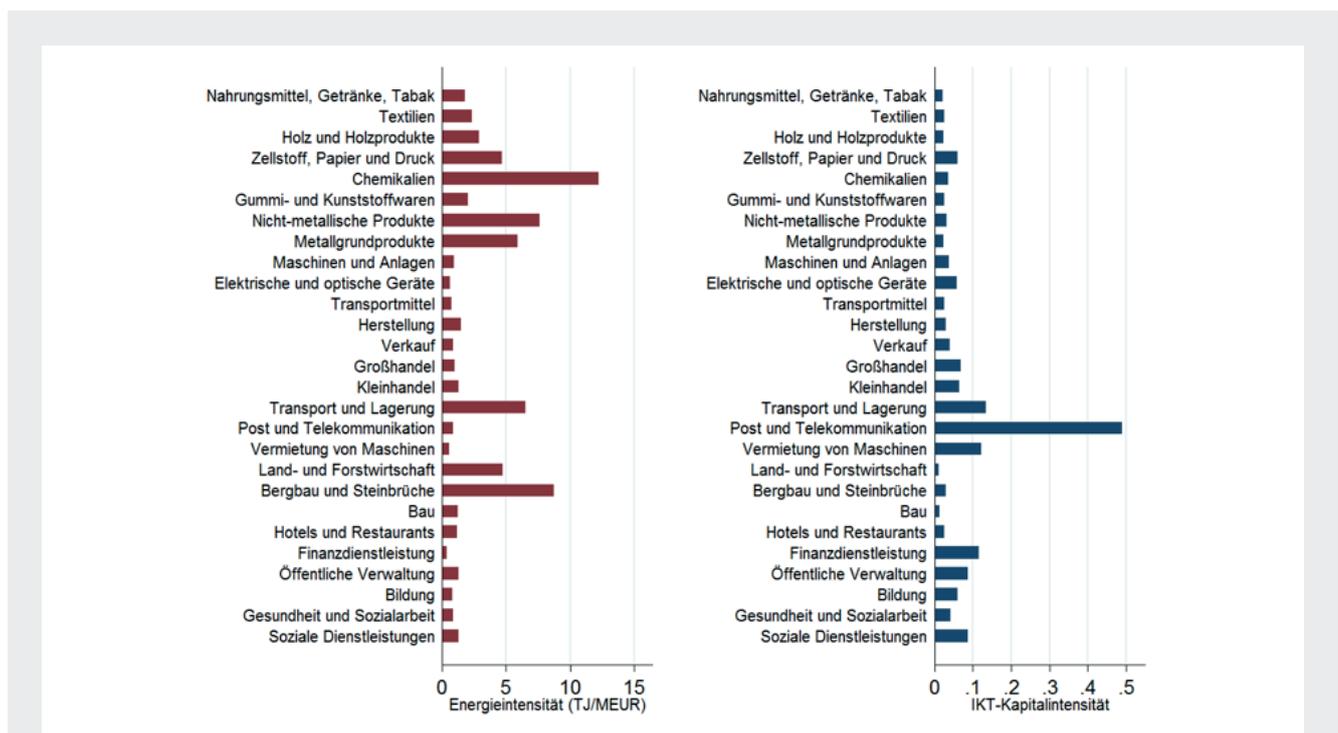


Abb. 8: Vergleich der durchschnittlichen Energie- und IKT-Kapital-Intensitäten in 27 Sektoren und 10 OECD-Ländern (1995-2007), basierend auf Daten von Schulte et al. (2014)

wie beispielsweise die „Chemische Industrie“ sowie der Sektor „Bergbau und Gewinnung von Steinen“. In ähnlicher Weise sind Branchen, die hohe IKT-Kapitalanteile haben, eher nicht energieintensiv, wie beispielsweise der Sektor „Post und Telekommunikation“. Abb. 9 illustriert die Auswirkungen des unterschiedlichen Einsatzes von IKT – gemessen an der IKT-Intensität – auf die (logarithmierte) Beziehung zwischen Energieintensität und Energieverbrauch.

Um die Veränderungen in der Energieeffizienz in den einzelnen Ländern zu vergleichen, konstruieren wir – mit Hilfe der Index-Zerlegungs-Methodik – Indikatoren für Energieeffizienz, welche es erlauben räumlich ähnliche Maßnahmen zu vergleichen. Diese Indizes zeigen, dass es beträchtliche Unterschiede zwischen den einzelnen Ländern hinsichtlich ihrer Energieeffizienz-Niveaus gibt. Da die meisten Definitionen des Rebound-Effekts auf Preiselastizitäten basieren, welche üblicherweise wiederum identische Energieeffizienz-Werte unterschiedlicher Personen unterstellen, macht diese Heterogenität eine auf Preiselastizitäten beruhende Schätzung der Rebound-Effekte nicht praktikabel. Wir lösen dieses Problem indem wir die Heterogenität bei der Energieeffizienz in der Definition explizit berücksichtigen. Dazu

berechnen wir die notwendigen Statistiken/statistischen Kennwerte anhand eines Translog-Kostenfunktions-Ansatzes. Wir schätzen unser Modell unter mehreren verschiedenen Annahmen bezüglich der Entwicklung der totalen Faktorproduktivität und kontrollieren für verschiedene Ebenen der Heterogenität der Produktionstechnologien innerhalb von und zwischen verschiedenen Branchen.

Unsere Ergebnisse suggerieren einen direkten Rebound-Effekt von insgesamt rund 25%. Des Weiteren finden wir klare Anzeichen dafür, dass eine unterschiedliche IKT-Kapitalintensität in verschiedenen Sektoren einen unterschiedlichen Einfluss auf die Größe des Rebound-Effektes hat. Wir finden einen robusten positiven Zusammenhang zwischen der IKT-Kapitalintensität und energiebezogenen Rebound-Effekten. Das heißt, dass in Sektoren mit einer höheren (geringeren) IKT-Kapitalintensität höhere (niedrigere) Rebound-Effekte identifiziert werden. Diese Beobachtung steht im Einklang mit der Erwartung, dass der Kapitalmix eine wichtige Bestimmungsgröße für die Kapitalstruktur ist und kann folglich eine Preiselastizität der Energienachfrage induzieren, die sich je nach dem wie der Kapitalmix zwischen Branchen variiert, unterscheidet.

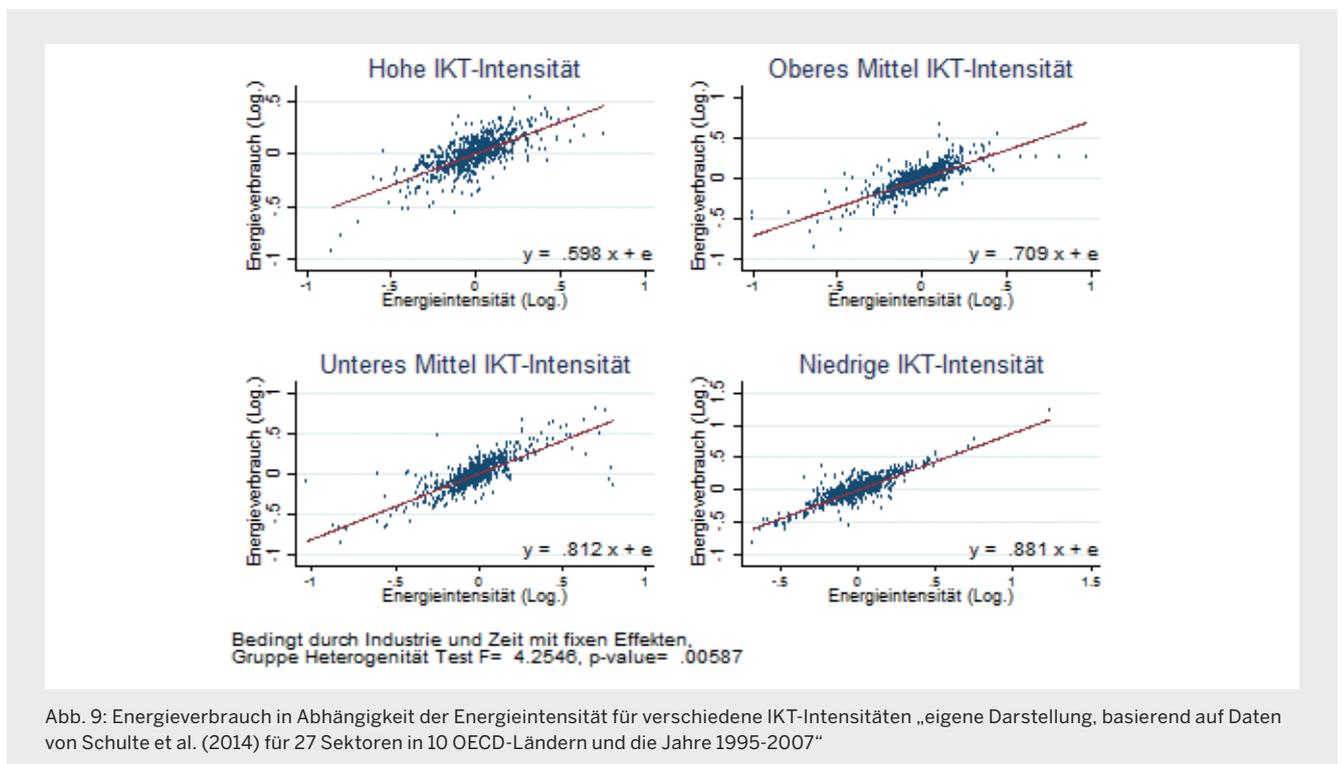


Abb. 9: Energieverbrauch in Abhängigkeit der Energieintensität für verschiedene IKT-Intensitäten „eigene Darstellung, basierend auf Daten von Schulte et al. (2014) für 27 Sektoren in 10 OECD-Ländern und die Jahre 1995-2007“

Wirtschaftswachstum und Energieverbrauch: Verhindert der Rebound-Effekt eine Entkoppelung?

Julius Frieling
FCN, RWTH Aachen

Ein dauerhaftes und nachhaltiges Wirtschaftswachstum ist nicht nur ein Indikator für eine florierende Wirtschaftslage, sondern aus ökonomischer Sicht auch das Ergebnis einer steigenden Produktivität. Insbesondere in Zeiten stagnierender Bevölkerung und einer auf innovative Produkte und Exporte ausgerichteten Wirtschaft wie in Deutschland ist eine steigende Produktivität von Faktoren wie Arbeit, Kapital und auch Energie ein Treiber für Wachstum.

Dabei können Innovationen zum einen zu Einsparungen führen, sie können zum anderen aber auch neue Anwendungsgebiete und Märkte erschließen. Hier zeigt sich auch, wie sich die Rebound-Thematik in anderen Feldern wiederfinden kann: Eine effizientere Nutzung von Energie führt nicht zwangsläufig zu einer Verringerung der Energieintensität. Gleichfalls bedeuten Effizienzsteigerungen beim Einsatz von Arbeitskräften oder Kapitalgütern nicht unbedingt, dass die Produktionsfaktoren weniger eingesetzt werden.

Zur Untersuchung der gesamtwirtschaftlichen Produktivitätsänderungen können auf der makroökonomischen Ebene Produktionsfunktionen analysiert werden, welche den Entstehungsprozess des Bruttoinlandsproduktes (BIP) abbilden. Diese sind gekennzeichnet durch die verschiedenen Produktionsfaktoren und ihre jeweilige Produktivität. Des Weiteren erlauben sie es zu analysieren wie leicht ein Faktor, wie zum Beispiel Arbeit, durch einen anderen, wie zum Beispiel Energie, ersetzt werden kann. Dies wird mit der Kenngröße Elastizität der Substitution charakterisiert. Im Gleichgewicht entspricht der Grenznutzen eines Produktionsfaktors seinem Preis. Verändert sich dieses Gleichgewicht, sei es durch eine Preisänderung oder durch eine Produktivitätsänderung, dann ist der Grad, mit dem die Nutzung der Produktionsfaktoren an diese Veränderungen angepasst werden kann, durch diese Substitutionselastizität bestimmt.

Für die Betrachtung des gesamtwirtschaftlichen Rebound-Effektes ist diese Elastizität von entscheidender Bedeutung: Der Energie-Rebound hängt nämlich direkt von der Elastizität der Substitution von Energie mit anderen Inputfaktoren ab. Der Rebound-Effekt ist dabei umso größer, je höher die Elastizität der Substitution ist. Der Grund dafür liegt darin, dass eine höhere Elastizität bedeutet, dass der Inputfaktor leichter durch einen oder

mehrere andere ersetzt werden kann. Eine Folge ist eine höhere Preissensibilität. Wenn also die Effizienz für diesen Faktor erhöht wird, dann ist dies äquivalent zu einer Preissenkung für den betreffenden Faktor. Bei einer hohen Preissensibilität ist es daher unausweichlich, dass der Rebound-Effekt hoch ist. Im Gegenzug dazu führt eine niedrige Substitutionselastizität zu einem niedrigen gesamtwirtschaftlichen Rebound-Effekt. In der vom FCN durchgeführten Analyse des Einsatzes von Energie, Arbeit und Kapital im Wertschöpfungsprozess in Deutschland zeigt sich, dass die Elastizität von Energie mit Arbeit und Kapital nur bei 0,3 liegt. Dies bedeutet, dass Energie nur zu 30 % gegen andere Produktionsfaktoren ausgetauscht werden kann um auf Veränderungen in der Preisstruktur oder der Effizienz zu reagieren. Für dieses Ergebnis wurden von der Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen, vom Statistischen Bundesamt sowie von verschiedenen Branchenverbänden die Statistiken über den gesamtwirtschaftlichen Einsatz von Primärenergieträgern, dem existierenden Kapitalstock sowie die Anzahl der Erwerbstätigen aggregiert.

Die dabei eingesetzte Methodologie erlaubt eine bisher nicht möglich gewesene Flexibilität in der Modellierung, weswegen das komplexe Zusammenspiel der drei modellierten Produktionsfaktoren bessere Rückschlüsse über die Wertschöpfungskette als bisher ermöglicht. Beispielsweise zeigt sich, dass die Produktivität des Faktors Energie vorwiegend dadurch steigt, dass flexiblere Energieträger eingesetzt werden. Primärstrom aus erneuerbaren



Abb. 10: Einsatz der Produktionsfaktoren in der Wertschöpfungskette

Energien ist wirtschaftlich leichter flexibel einzusetzen als die vergleichsweise unflexible und aufwändige Produktion von Strom aus Energieträgern wie Braunkohle. Das Modell zollt dem Umstand, dass Energie nicht gleich Energie ist, dadurch Rechnung, indem die Qualität der eingesetzten Energieträger mit in die Berechnung einfließt. Hierbei zeigt sich, dass die Verschiebung des Energiemixes in Richtung vielseitigerer Energieträger einen Großteil der Zugewinne an Energieproduktivität erklärt.

Eine Konsequenz der Ergebnisse ist, dass der gesamtwirtschaftliche Energierebound nur bei ca. 35 % liegt - ein Resultat welches auf den ersten Blick erfreulich niedrig scheint. Jedoch gibt es eine Kehrseite der Medaille, wenn man sich das Gesamtgefüge der eingesetzten Produktionsfaktoren ansieht: Eine niedrige Substitutionselastizität bedeutet nämlich auch, dass die durch Produktivitätsgewinne freigewordenen Mittel jetzt verstärkt für Energiekonsum eingesetzt werden können. Produktivitätszuwächse oder Preisänderungen beim Einsatz von Arbeit und Kapital führen dazu, dass stärker auf Energie zurückgegriffen werden kann. Dies hat zur Folge, dass ein starker sekundärer Rebound-Effekt entsteht: Effizienz- und Produktivitätssteigerungen im Einsatz anderer Faktoren führen dazu, dass mehr Energie nachgefragt wird. Die Folge niedriger Substitutionselastizität ist somit, dass

für die Gesamtwirtschaft ein effektiver Energieverzicht kaum möglich ist, da eine niedrige Elastizität bedeutet, dass für ein weiteres Wirtschaftswachstum immer ein Mindestinput an Energie notwendig ist, dieser aber nicht beliebig weit reduziert werden kann.

Das bedeutet wiederum, dass eine Entkoppelung von Wirtschaftswachstum und Energiekonsum gesamtwirtschaftlich nicht vom Rebound-Effekt verhindert wird, sondern dass die Umstände, welche geringe Rebound-Effekte zur Folge haben ganz im Gegenteil dazu führen, dass Primärenergie nicht ersetzt werden kann. Es ist daher ratsam, dass ein verstärktes Augenmerk darauf gerichtet wird eine Veränderung des Energiemixes hin zu schadstoffärmeren und nachhaltigen Energiequellen anzustreben. Die Ergebnisse unterstreichen außerdem, dass eine enge Verzahnung von Energie- und Wirtschaftspolitik unabdingbar ist. Nur eine ganzheitliche Betrachtung der Rolle von Energie im Wirtschaftskreislauf kann proaktives Handeln zur Erreichung klimapolitischer und wirtschaftlicher Ziele ermöglichen. Für die Prognose der Entwicklung des Energiekonsums muss dem Umstand Rechnung getragen werden, dass Energie nur ein Element in der Wertschöpfungskette ist.

Ein Lichtblick ist allerdings, dass die Energieintensität (gemessen in PJ pro Mrd. € BIP) in den letzten zwanzig Jahren

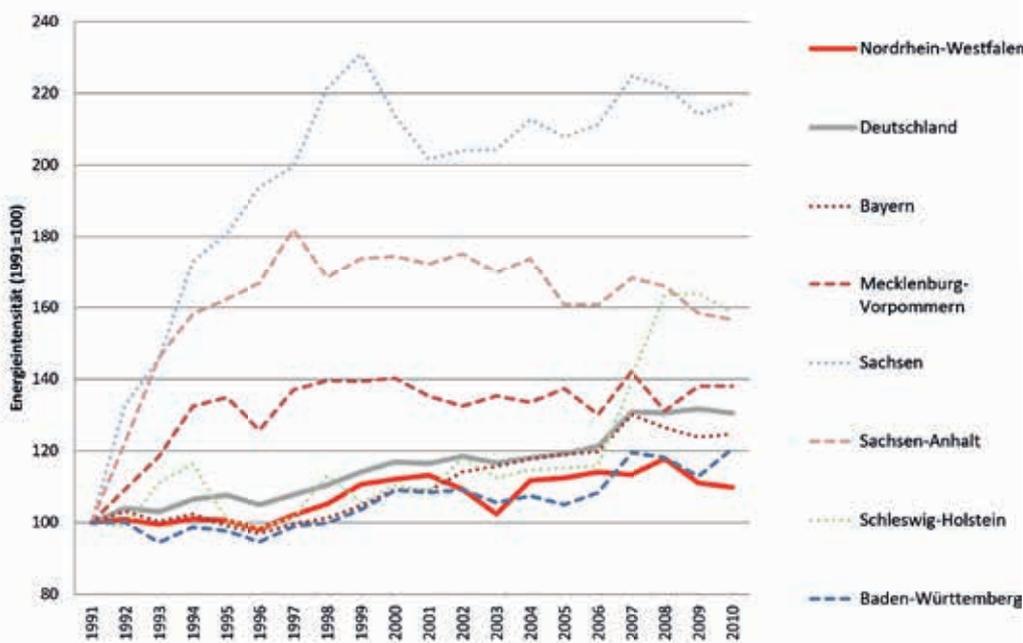


Abb. 11: Qualitätsindizierte Energieintensität über die Zeit, 1990-2013 (in PJ/Mrd. € BIP)

stetig gefallen ist. Hier zeigt sich das Resultat einer aktiven Energiepolitik, aber auch die Folge hoher Energiepreise. In den letzten zwei Jahren resultierte der Preisverfall bei Energieträgern, insbesondere bei Rohöl, in einem leichten Anstieg der Energieintensität.

Die neuen Erkenntnisse, welche im Rebound-Effekte NRW Projekt gewonnen werden konnten, können dazu beitragen, dass die langfristigen Entwicklungen besser

prognostiziert werden können. Die ganzheitliche Betrachtung des Produktionskreislaufs und die Weiterentwicklung der Methodologie der Rebound-Forschung setzen hier wichtige Impulse, nicht nur für Entscheidungsträger in Politik und Wirtschaft, sondern auch im akademischen Kontext, wo eine Verschiebung der Perspektiven die Rolle der Rebound-Effekte und der verschiedenen Produktionsfaktoren in ein neues Blickfeld rücken konnten.

Energieverbrauch und IKT: Eine neuartige Sicht auf den Rebound-Effekt

Dr. Ray Galvin
FCN, RWTH Aachen

Die Energieeffizienz der Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT) hat in den letzten fünf Jahrzehnten um rund 30 % pro Jahr zugenommen. Doch der Energieverbrauch im Bereich der IKT steigt schneller an als in fast jedem anderen Sektor, einschließlich der Luftfahrtindustrie. Dies macht sie zu einem bedeutenden Kandidaten für Studien zum Rebound-Effekt. Nicht nur liegen die Rebound-Effekte in den meisten Zweigen der IKT-Branche regelmäßig über 100 %, sondern müssen auch neue Erklärungen gefunden werden um diese hohen Werte zu erklären. Das NRW-Rebound-Forschungsteam führte eine breit angelegte, globale Studie über die Rebound-Effekte im IKT-Bereich durch sowie eine Fallstudie von IKT-Rebound-Effekten in einer Forschungseinrichtung in NRW.

In den frühen 1940er-Jahren hatte das US-Militär mit dem „ENIAC“ den zu dieser Zeit größten und leistungsfähigsten Computer der Welt gebaut. In diesem Riesenrechner, der eine Anschlussleistung exklusive Kühlsystem von stattlichen 150.000 Watt aufwies, wurden 18.000 elektronische Schaltkomponenten (die inzwischen antiquierten „Elektronenröhren“) verbaut. Er wog über 30 Tonnen und war 30 Meter lang, drei Meter hoch und einen Meter tief. Im Vergleich dazu kommen in einem typischen modernen Desktop-Computer über 4 Milliarden elektronische Schaltkomponenten (die moderne Art, „Transistoren“ genannt, mikroskopisch in einem Silizium-Chip eingraviert) zum Einsatz und so ein Gerät benötigt etwa 120 Watt einschließlich dem Kühlsystem. Dies stellt eine astronomische Steigerung der Energieeffizienz und entsprechende Steigerungen der effizienten Nutzung von Raum, Material und Kapital dar. Dazu ein kleines Gedankenexperiment: hätte ein Computer der 1940er die Fähigkeiten eines modernen Desktop-Computer gehabt, wäre dieser 5 Millionen Tonnen schwer und 5.000 km lang gewesen und hätte etwa 25 GW Anschlussleistung gehabt

(was knapp der Hälfte des heutigen durchschnittlichen Strombedarfs in Deutschland entspricht). Der preiswerte Desktop-Computer, welchen dieser Artikel als Basis nimmt, ist somit über 230 Millionen Mal energieeffizienter als der beste Computer der frühen 1940er Jahre.

Zwei wichtige Entwicklungen haben die Energieeffizienz von Computern so dramatisch und dauerhaft ansteigen lassen. Die erste war die Erfindung des Transistors in den späten 1940er Jahren, welcher den Leistungsbedarf elektronischer Schaltkomponenten um mehr als 90 % reduzierte. Die zweite war die Miniaturisierung von Transistorschaltungen auf kleinen Siliziumplättchen (den sogenannten „Mikrochips“). Dieser Miniaturisierungsprozess ist inzwischen so weit fortgeschritten, dass er fast seine natürliche Grenze erreicht hat und die Forschung zu einer dritten Entwicklung angereizt hat, dem Schritt in Richtung der sogenannten „Spintronik“. Das Ziel dieses Weges ist es jeden Transistor durch ein einzelnes Atom zu ersetzen. Jedes Atom wird als ein Ein- oder Ausschalter wirken, indem es im oder gegen den Uhrzeigersinn gedreht wird. Experimentelle Spintronik-Prozessoren sind bereits hergestellt worden, und sobald diese kommerziell verwertbar werden, werden sie eine weitere massive Steigerung der Energieeffizienz in der Computerwelt einläuten.

Seit den 1960er-Jahren hat sich die Anzahl der Transistoren in den Prozessoren von Computern alle zwei Jahre verdoppelt, ein Phänomen, welches von Gordon E. Moore im Jahr 1965 identifiziert wurde und als „Moore's Gesetz“ bekannt geworden ist. Dies entspricht einer Steigerung von stattlichen 41 % pro Jahr. Im Allgemeinen ist die Prozessor-„Rechenleistung“ – die Anzahl von Berechnungen pro Sekunde, die erreicht werden kann – proportional zur Anzahl an Transistoren, also werden Computer Jahr für Jahr um etwa 41 % leistungsfähiger. Allerdings hat die Energieeffizienz von

Computern nicht ganz mit diesem Tempo Schritt gehalten. Dies liegt an dem Gleichgewicht zwischen der Energie, die von dem Prozessor verwendet wird und sich mit der Anzahl von Berechnungen erhöht, sowie der Energie, die vom Rest des Computers verwendet wird und relativ konstant bleibt. Werden diese Faktoren in Betracht gezogen, so lässt sich ausrechnen, dass die Energieeffizienz von Computern seit den 1960er-Jahren um durchschnittlich etwa 30 % pro Jahr zugenommen hat.

Gleichzeitig hat sich jedoch der Energieverbrauch durch Computer in den meisten Bereichen erhöht und nicht verringert. Der Pro-Kopf-Stromverbrauch durch IKT beispielsweise hat sich in gewerblichen Büros in Deutschland von 2000 bis 2010 um 4,7 % pro Jahr erhöht, während der Anstieg des IKT Stromverbrauchs in deutschen Haushalten von 1996 bis 2011 mit 9,3 % pro Jahr sogar noch höher ausfiel. Global ist der Energieverbrauch von IKT von 2007 bis 2012 um 5,5 % pro Jahr angewachsen.

Das Wachstum der Anzahl an in Gebrauch stehenden Computern kann auch als Indiz für die Erhöhungen des IKT-Energieverbrauchs dienen. Eine britische Studie zeigte kürzlich auf, dass dieser Anstieg weltweit von 1994 bis 2010 12,9 % pro Jahr und für die britischen Haushalte von 2006 bis 2012 7,6 % pro Jahr betrug.

Einer der stärksten Treiber der IKT-Entwicklung seit den 1930er-Jahren war das US-Militär, wo das jährliche Wachstum des IKT-Energieverbrauchs auch besonders hoch zu sein scheint. Eine Schätzung geht in den 1990er- bis 2000er-Jahren von etwa 17 % pro Jahr aus, obwohl dies nicht direkt überprüft werden kann.

Wenn diese Entwicklungen echte Rebound-Effekte darstellen, so würde es bedeuten, dass der Rebound-Effekt bei IKT zwischen rund 118 % bis zu knapp über 160 % liegen würde (siehe Abb. 12). Dies würde implizieren, dass bei Erhöhung der Energieeffizienz der Energieverbrauch steigt anstatt sich zu verringern - ein klassischer Fall von „backfire“ (Rebound > 100 %). Daraus ergeben sich zwei wichtige Fragen: Sind dies wirklich Rebound-Effekte im klassischen Sinne; und wenn ja, was sind die Treiber für diese hohen Rebound-Effekte?

Ein echter Rebound-Effekt findet nur dann statt, wenn die Steigerung der Energieeffizienz die Ursache für die Erhöhung der von dem Gerät zur Verfügung gestellten Nutzleistung ist. Wenn zum Beispiel eine Erhöhung der Nutzleistung (z.B. durchgeführte Berechnungen pro Tag) zufällig im selben Jahr auftritt, in dem die Bürocomputer durch energieeffizientere Modelle ersetzt werden (und wäre aufgetreten egal, ob die neuen Modelle installiert wurden oder nicht), so wären die beiden Ereignisse voneinander unabhängig und man würde nicht von einem Rebound-Effekt sprechen (sondern von autonomem Fortschritt).

Allerdings zeigt eine genaue Analyse der Geschichte der IKT und ihrer Nutzung, dass es klare Verbindungen von Ursache und Wirkung von Energieeffizienzsteigerungen zu einer Erhöhung der Nutzleistung gibt. Diese unterscheiden sich von den klassischen Ursachen der Rebound-Effekte, wo eine Erhöhung der Energieeffizienz zu günstigeren Nutzleistungen führt, was Verbraucher dazu bewegt mehr Leistung zu beanspruchen. Vielmehr hat die Steigerung der Energieeffizienz in der IKT nicht nur Auswirkungen auf den Energiekonsum, es verändert sich vielmehr auch die Art der durch IKT erbrachten Leistung/en. IKT verändert sowohl soziale Strukturen und Organisationsprinzipien (d.h. die Art und Weise wie Organisationen und Gemeinden funktionieren) als auch soziale Praktiken (d.h. wie Personen und Haushalte leben und arbeiten).

Für Unternehmen tritt zum Beispiel eine Art „Wettrüsten“ auf. Wenn ein konkurrierendes Unternehmen energieeffizientere Computer installiert, so reduziert sich nicht nur der Energieverbrauch, vielmehr eröffnen sich häufig auch neue Einsatzfelder für IKT. So kann das Unternehmen (zum Beispiel) mehr Informationen über Märkte in kürzerer Zeit evaluieren, was andere Unternehmen dazu zwingt die IKT-Infrastruktur ebenfalls mit effizienteren Computern aufzurüsten um nicht den Anschluss zu verlieren bzw. wettbewerbsfähig zu bleiben. Innerhalb jedes Unternehmens kann die erhöhte Intensität der Marktanalyse und deren Ergebnisse Dominoeffekte auslösen, die zu einem Mehrbedarf an IKT-Ausstattung zur besseren Nutzung der Ergebnisse führt. Effizientere IKT bringt auch soziale Veränderungen mit sich, wie zum Beispiel mehr Vertrauen in die Cyber-Vernetzung zur sozialen Zugehörigkeit oder mehr Zeit, die mit Computerspielen verbracht wird. Beide neigen dazu, mehr Menschen und mehr ihrer Zeit in IKT-Käufe und deren Nutzung zu ziehen. Ein weiterer struktureller Effekt wird in Forschungspraktiken gesehen, vor allem bei der Datenanalyse. Je einfacher es ist Daten zu analysieren, desto mehr Daten werden gespeichert und desto mehr Daten können in immer feineren Ebenen analysiert werden, in Abhängigkeit von der Computerleistung, die wir aufbringen können („Big Data“). Wir neigen auch dazu neue Arbeitsplätze und Aufgaben oder sogar völlig neue Einrichtungen und Organisationsformen zu erzeugen, sobald neue Computerleistung zur Verfügung steht.

Daher verlaufen die Linien von Ursache und Wirkung in der Regel nicht direkt von einer Steigerung der Energieeffizienz zur Entscheidung des Einzelnen mehr Rechenleistung zu nutzen. Vielmehr führen Steigerungen der IKT-Energieeffizienz zur Entwicklung von Computereigenschaften, die Einfluss darauf nehmen wie Gruppen, Organisationen und Individuen ihr Leben führen, ihre Arbeit tun, ihr Geld verdie-

nen und ihre Völker regieren und verteidigen. Diese sozialen, strukturellen Veränderungen wären nicht möglich, ohne die stetigen, anhaltenden Zuwächse der IKT-Energieeffizienz der letzten fünf oder sechs Jahrzehnte. Wenn Computer immer noch wie der ENIAC der 1940er-Jahre gebaut würden, wir könnten uns sicher sein, dass diese Veränderungen in dieser Form und Geschwindigkeit definitiv nicht stattgefunden hätten!

Eine kleine Fallstudie in NRW gibt ein anschauliches Beispiel dieser Faktoren. Die Studie betrachtet ein relativ neues Institut an einer Universität mit Sitz in NRW, welches vor zehn Jahren gegründet wurde um Spitzenforschung im Bereich bestimmter Typen von Maschinen durchzuführen (Namen und Standort wurden in Publikationen der Studie anonymisiert). Die Geschichte des Instituts zeigte, dass als sich die Energieeffizienz des Computersystems der Abteilung erhöhte, die Detailgenauigkeit und Komplexität ihrer Forschung erhöhte; dieser Anstieg erhöhte wiederum den Bedarf nach leistungsfähigerer (also auch energieeffizienterer) IKT, und so weiter. Das Institut erstellte detaillierte und aussagekräftige Statistiken über die Energieeffizienz und den Verbrauch seiner Computer und Server, und die Trends waren deutlich zu sehen. Das Personal war sich dieser Trends bewusst und schaute ständig steigender IKT-Effizienz freudig entgegen, da diese ihre Forschung immer genauer, effektiver und zufriedenstellender machte. Rebound-Effekte von 172 % wurden für das IKT-Server-System des Instituts festgestellt und durchschnittlich 188 % für ihre PCs. Diese Zahlen waren hoch, nicht nur wegen der oben umschriebenen Effizienz-Einsatz-Spirale, sondern auch, da das Institut mit wachsendem Forschungserfolg auch

in seiner Größe wuchs. Die Zahl der PCs stieg in etwa viermal so stark an wie die Zahl der Studierenden der betreffenden Universität, während sich die Server-Leistungsbedarf um etwa das Doppelte im Vergleich zu der Studentenwachstumsrate erhöhte. Mit anderen Worten: auch wenn sich der Energiebedarf pro PC bis 2016 etwa um etwa die Hälfte seines Niveau gegenüber 2008 reduziert hat, ist der IKT-Energieverbrauch angestiegen, da mehr PCs im Einsatz waren. Das ist die Ironie des Rebound-Effekts in der IKT: Je mehr unsere IKT-Geräte energiesparend konzipiert werden, desto mehr solcher Geräte kommen tendenziell zum Einsatz und desto mehr steigt unser IKT-Energieverbrauch insgesamt an. Die Parallele zum Urvater der Rebound-Forschung, William S. Jevons (1835-1882), ist dabei nicht zu übersehen. Dieser beschrieb schon in seiner Studie über den Kohleverbrauch in England („The Coal Question“, 1865) mit Unbehagen, dass eine immer leichtere und billigere Förderung von Kohle mit Hilfe von Dampfmaschinen anscheinend nur dazu führt, dass der Kohleverbrauch massiv ansteigt.

Dieses „gemeine Problem“ der unersättlichen Nachfrage nach Nutzleistungen von IKT wird zunehmend unter den auf diesem Gebiet tätigen ForscherInnen diskutiert. Es gibt eine wachsende Erkenntnis, dass das Problem nicht gelöst werden kann, indem IKT energieeffizienter gemacht wird – dies haben wir seit den 1940er-Jahren getan. Stattdessen entsteht ein Konsens, dass der beste Weg das Setzen einer Obergrenze für die Menge an Energie sein könnte (oder zumindest Energie aus fossilen Brennstoffen), die für die Nutzung von IKT zugelassen wird. Dies kann zumindest ein Thema für weitere Forschung und Diskussionen sein.

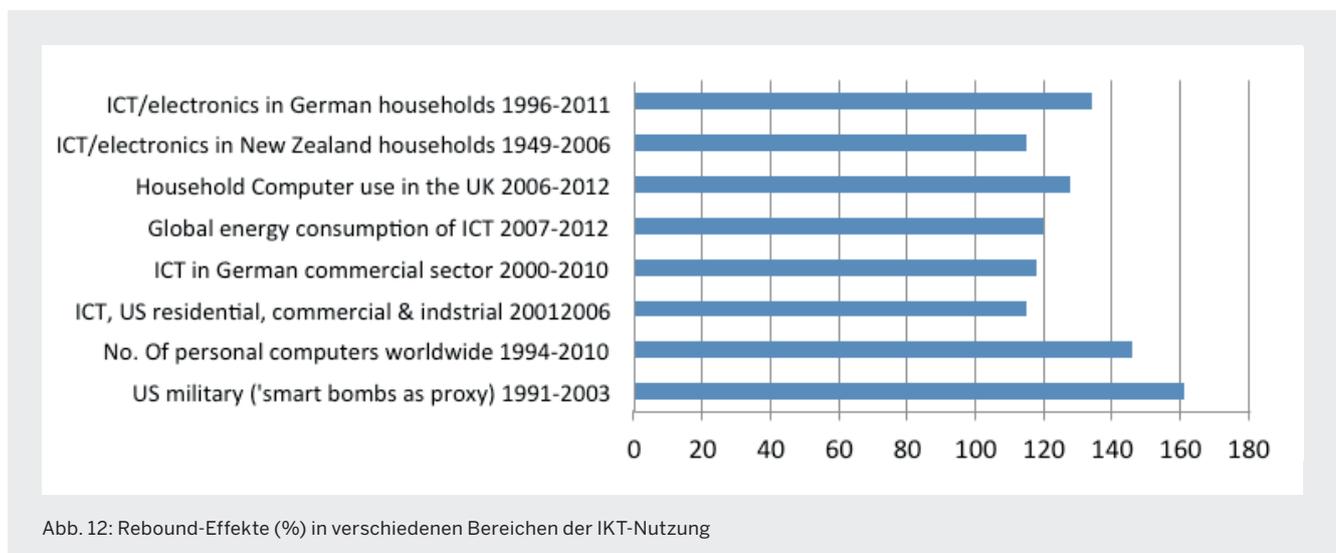


Abb. 12: Rebound-Effekte (%) in verschiedenen Bereichen der IKT-Nutzung

Neuartige Rebound-Effekte bei E-Autos – Gleiten statt Hetzen!

Dr. Ray Galvin
FCN, RWTH Aachen



Plug-in Hybrid-Elektroautos werden von der Bundesregierung gefördert, weil diese eine höhere Energieeffizienz als gewöhnlich Autos aufweisen, keine Auspuffgase oder CO₂-Emissionen verursachen und mit erneuerbaren Energie wie Wind- oder Solarkraft betrieben werden können. Sie haben auch hohe Beschleunigung, und die Hersteller nützen das oft sogar als Verkaufsargument. Generell gilt, dass der Energieverbrauch bei hoher Beschleunigung signifikant ansteigt, aber E-Fahrzeuge haben ein Energie-Rekuperationssystem (Energy Recovery System, ERS), welches Energie zurückgewinnt zu Zeiten, in denen das Fahrzeug abgebremst wird. Nichtsdestotrotz, dies kann die zusätzlich während der Beschleunigung verbrauchte Energie infolge von Reibungs- und anderen Verlusten nie vollständig kompensieren.

Weil E-Fahrzeuge an Bedeutung gewinnen, taucht für die Gesellschaft eine wichtige Frage auf: Wie viel werden Rebound-Effekte die Energieeinsparungen schmälern? Wir haben dieses Thema untersucht, indem wir Testdaten des US-amerikanischen Argonne National Laboratory analysiert haben, und zwar für acht populäre Modelle von E-Autos: den Nissan Leaf SV 2013, Kia Soul Electric 2015, Nissan Leaf 2012, BMW i3 BEV 2014, Ford Focus Electric 2013, Mitsubishi i MiEV 2012, Chevrolet Spark EV 2015, und den Smart EV 2014. Das Argonne Laboratory betreibt diese Wagen mit Dynamometer-Tests, über ganz bestimmte „Fahrzyklen“. Ein Fahrzyklus ist ein klar vordefinierte Fahrt, welcher aus geplanten Mustern in Bezug auf Geschwindigkeiten, Beschleunigungen, Starts und Stopps,

entwickelt um typische Arten von Stadt- und Überlandfahrten (oder Kombinationen davon) zu simulieren. Die Fahrt wird dabei auf Rollen vollführt welche so programmiert werden, dass der Widerstand für das E-Fahrzeug so ausfällt, wie sie das Fahrzeug das unter realen Straßenbedingungen für die betreffenden Geschwindigkeiten vorfinden würde. Sensoren liefern alle 0,1 Sekunden die Messwerte relevanter Messgrößen wie etwa Fahrzeuggeschwindigkeit, Beschleunigung, Batterielast und Position des Gas-/Beschleunigungspedals. Wir haben mehr als 50 solcher Fahrten bezüglich einer Palette an verschiedenen Fahrzyklen untersucht.

Insbesondere galt unser Interesse den Energieverbräuchen der Fahrzeuge pro zurückgelegter Distanzeinheit, und nicht so sehr pro Zeiteinheit. Ein E-Fahrzeug, welches mit hoher aber konstanter Geschwindigkeit bewegt wird verbraucht viel mehr Energie pro Sekunde als eines, welches bei niedriger Geschwindigkeit mit der gleichen Geschwindigkeit bewegt wird. Jedoch ist der Energieverbrauch pro zurückgelegter Distanz (z.B. kWh/km) oft ziemlich ähnlich für konstante Geschwindigkeiten von unter etwa 80 km/h, weil bei einem schnelleren Auto mehr Boden pro Sekunde abgefahren wird.

Was den Energieverbrauch hingegen unterschiedlich macht ist die Beschleunigung. Unterschiede entstehen dabei gleich in dreifacher Hinsicht:

Erstens, um eine Reise mit einem E-Fahrzeug bei hoher Geschwindigkeit zu beenden, muss es öfter und intensiver

abgebremst werden als wenn die Reise bei einer niedrigen Durchschnittsgeschwindigkeit durchgeführt worden wäre. Das gilt insbesondere unter innerstädtischen Fahrbedingungen, aber auch auf Autobahnen und Bundesstraßen (wegen Überholmanövern usw.). Obwohl es die Beschleunigung ist, welche zu einem erhöhten Energieverbrauch führt, kommt dies durch die höhere Durchschnittsgeschwindigkeit zum Tragen.

Zweitens beinhalten manche Fahrstile intensives Beschleunigen, Entschleunigen und Abbremsen, unabhängig von der Durchschnittsgeschwindigkeit, welche ein Fahrer bzw. eine Fahrerin erreichen möchte. Dieser Effekt wurde auch in Studien zum Energieverbrauch konventioneller Fahrzeuge festgestellt. Einige dieser Studien haben herausgefunden, dass einfaches Fahrtraining für ein entspannteres Fahren bereits bis zu 12 % des Treibstoffverbrauches einsparen helfen kann, notabene ohne dass dadurch die durchschnittliche Geschwindigkeit der betreffenden Fahrt dadurch reduziert wird.

Drittens haben wir festgestellt, dass alle der untersuchten Fahrzeugmodelle eine Eigenheit aufweisen, wenn sie aus dem Stillstand anfahren, was den Energieverbrauch stark ansteigen lassen kann. Wenn das Beschleunigungspedal durchgedrückt wird, um das Fahrzeug zu beschleunigen, so entsteht anfänglich ein großer Leistungspuls an den Motor für die ersten paar Zehntelsekunden (bevor sich das Fahrzeug tatsächlich bewegt). Je mehr das Pedal durchgedrückt wird, je höher ist auch die gelieferte Leistung. Fast die ganze Energie, die in diesen Augenblicken in den Motor fließt, ist vergeudet. Diese momentanen Energiespitzen sind erstaunlich hoch: bis zu 5000 kWh/km verglichen mit ca. 0,05 kWh/km für konstante Geschwindigkeit über 20 km/h! Mit dem Ford Focus zum Beispiel haben wir festgestellt, dass knapp über 10 % des Energieverbrauches während eines typischen innerstädtischen Fahrt während der Zeitperiode konsumiert wird zu denen das Fahrzeug mit weniger als 1 km/h bewegt wird.

Was bedeuten diese Erkenntnisse nun für den Rebound-Effekt? Wir haben dafür den Begriff des „Durchschnittsgeschwindigkeits-Rebound-Effektes“ geprägt, weil diese Effekte zusätzlich zu den Rebound-Effekten aufgrund längerer zurückgelegter Reisedistanzen (klassischer direkter Rebound-Effekt) entstehen.

Wir haben diesen „Durchschnittsgeschwindigkeits-Rebound-Effekt“ gemessen, indem wir den Energieverbrauch des Nissan Leaf für zwei wichtige Fahrzyklen verglichen haben: den NEDC (New European Drive Cycle), der 1975 eingeführt wurde als annähernde Simulation, wie die Menschen damals Auto gefahren sind. Der WLTP (Worldwide

Harmonized Light Duty Vehicles Procedure) wurde erst vor kurzem von einer UN-geführten internationale Experten-gruppe entwickelt um die Fahrstile der heutigen Menschen realitätsnah zu simulieren. Dieser beinhaltet höhere Geschwindigkeiten und Beschleunigungen als der NEDC, und ebenso mehr Starts und Stopps.

Der Energieverbrauch pro Einheit an zurückgelegter Distanz war 0,119 kWh/km beim NEDC-Zyklus und ist 0,135 kWh/km beim WLTP-Zyklus, was einem Anstieg von 13 % entspricht. Dies liefert eine nützliche Annäherung um wieviel „moderne Fahrstile“ den Energieverbrauch relativ zu entspannterer „älteren Fahrstilen“ erhöhen.

Um den Rebound-Effekt berechnen zu können benötigen wir auch noch eine Zahl für die Änderung der Energieeffizienz der Fahrzeuge. Gemäß den Statistiken der US-Agentur für Umweltschutz (US Environmental Protection Agency, EPA), war ein Durchschnittsauto im Jahre 1975 etwa 54 % so energieeffizient als das Durchschnittsauto im Jahr 2013 (vgl. Abb. 13). Also haben wir den Nissan mit dem NEDC-Fahrzyklus simuliert, so also ob das Auto nur 54 % so energieeffizient wäre. Das Ergebnis war ein Rebound-Effekt von 29 %.

Der Rebound-Effekt berücksichtigt nur die Erhöhung der Durchschnittsgeschwindigkeit und müsste zum normalen direkten Rebound-Effekt für höhere zurückgelegte Distanzen aufaddiert werden.

Was kann man tun um die „Durchschnittsgeschwindigkeits-Rebound-Effekte“ zu reduzieren? Klarerweise durch eine sachtere Beschleunigung. Fahrer müssen lernen mit ihrem Gaspedal ressourcenschonender umzugehen. Die Dynamometer-Studien ergaben Messwerte für die Stellung des Beschleunigungspedals für alle Punkte des

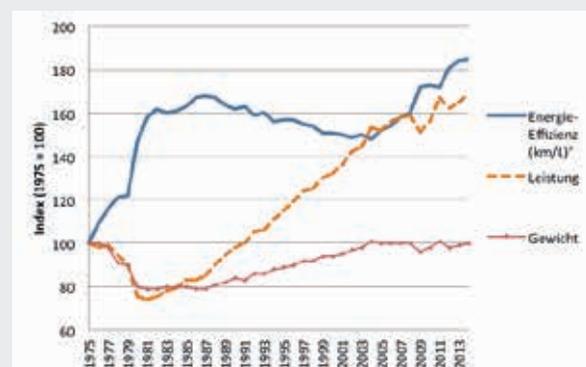
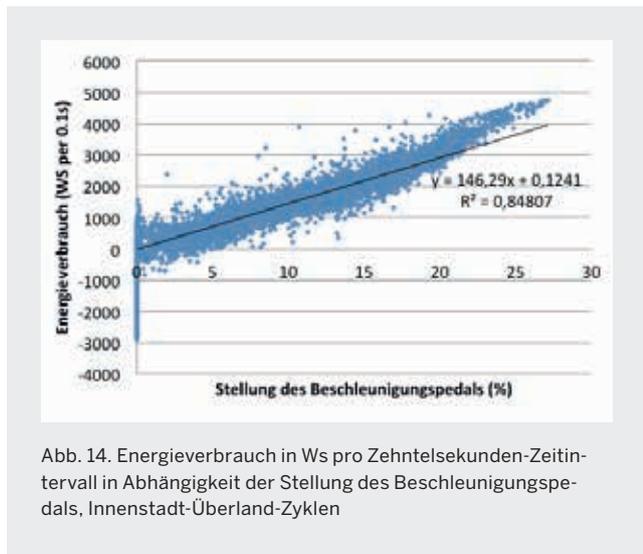


Abb. 13: Durchschnittlicher Treibstoffverbrauch, Leistung und Gewicht neuer Autos im US-amerikanischen Markt, 1975-2013. Datenquelle: US Environmental Protection Agency



Fahrzyklus. Wir haben diese gegen die momentanen Energieverbräuche für den Ford Focus und einen kombinierten Innenstadt-Überland-Fahrzyklus in einer Grafik aufgetragen. Aus Abb. 14 wird ersichtlich, dass je tiefer das Beschleunigungspedal durchgedrückt wird, umso höher ist der Energieverbrauch. Dies trifft zu egal wie schnell oder langsam das Fahrzeug unterwegs ist. Wird das Pedal beispielsweise um 27 % der möglichen Tiefe durchgedrückt, so ist der Energieverbrauch doppelt so hoch als wenn es nur 16 % durchgedrückt wird.

Insgesamt lässt sich aus dieser Untersuchung resümieren, dass es vielleicht doch nicht so eine gute Idee zu sein scheint, E-Fahrzeuge mit ihrem hohen Beschleunigungsvermögen zu bewerben!

Geschlechtsspezifische Unterschiede der Pendlerstrecken in NRW: Rebound-Effekt, CO₂ Emissionen und Gemeinwohl

Dr. Ray Galvin
FCN, RWTH Aachen

Es gibt in NRW - wie übrigens auch in anderen Bundesländern Deutschlands und vielen anderen Weltregionen mit hohem Einkommen - deutliche Unterschiede in den Distanzen, die Männer und Frauen zu ihrer Arbeit zurücklegen. Dennoch existieren einige auffällige und interessante Muster, die erkennbar werden, wenn diese Pendlerbewegungen in NRW näher analysiert werden: Pendlerinnen weisen beispielsweise höhere Rebound-Effekte auf, während männliche Pendler mehr Treibstoff verbrauchen und mehr klima- und gesundheitsschädigende Emissionen produzieren, weil sie weitere Strecken zur Arbeit zurücklegen und ihre Pendlerwege stärker steigern als die weibliche Vergleichsgruppe. In der gegenständlichen, im Rahmen des Projektes „Rebound-E.NRW“ durchgeführten Studie untersuchten wir Pendlerbewegungen in NRW zwischen 1999 und 2013 und fanden dabei auch heraus, dass die höchsten Rebound-Effekte nicht immer dort auftreten, wo die meiste Energie verbraucht wird.

Im Zeitraum 1999-2013 fand in NRW ein tiefgreifender demographischer Wandel statt. Die Wirtschaftsleistung erstarkte und die Anzahl an Arbeitsplätzen nahm zu; gleichzeitig reduzierte sich jedoch die Anzahl der Menschen im arbeitsfähigen Alter aufgrund der zunehmenden Überalterung der Gesellschaft. Dadurch wandelten sich auch die sozialen Muster innerhalb der Haushalte: Während die Anzahl arbeitsfähiger Männer abnahm, stieg die Anzahl der Frauen in der Arbeitswelt dramatisch an.

Statistiken zur Anzahl der Arbeitsplätze zeigen dies sehr deutlich. Im Jahr 1999 gab es knapp unter 5,8 Millionen sozialversicherte ArbeitnehmerInnen in NRW – eine Zahl, die bis 2013 um 6 % auf knapp über 6,1 Millionen angewachsen ist. Während dieses Zeitraums sank der Anteil männlicher Arbeitnehmer geringfügig, während die Anzahl der Arbeitnehmerinnen um über 14 % angestiegen ist, was einer Erhöhung von über 340.000 entspricht. Dies bedeutet, dass die gesamte Steigerung der Anzahl der Beschäftigten durch Arbeitnehmerinnen getragen wurde. Aber was bedeutet das nun für Pendlermuster und den Rebound-Effekt?

Das Bundesamt für Arbeit (BfA) führt detaillierte Aufzeichnungen zu Wohn- und Arbeitsstätten aller sozialversicherten ArbeitnehmerInnen in Deutschland, bezogen auf Gemeinde- und Stadtbezirke sowie aufgeschlüsselt nach Geschlecht. Unser Team analysierte die detailliertesten Datensätze der Jahre 1999 und 2013 sowie weniger detaillierte Daten für die dazwischen liegenden Jahre. Wir nutzten zusätzlich auch Daten des deutschen Sozio-ökonomischen Panels (SOEP), um herauszufinden, wie die Distanzen zwischen Wohn- und Arbeitsplatz die Häufigkeit der Fahrten zur Arbeitsstelle beeinflussen. Viele ArbeitnehmerInnen pendeln Hunderte oder sogar Tausende Kilometer zur Arbeit, legen aber diese Strecken nur einmal pro Woche oder sogar nur alle 14 Tage zurück. Diese Tatsache wirkt sich auf die Berechnungen der kompletten und durchschnittlichen Pendlerstrecken aus.

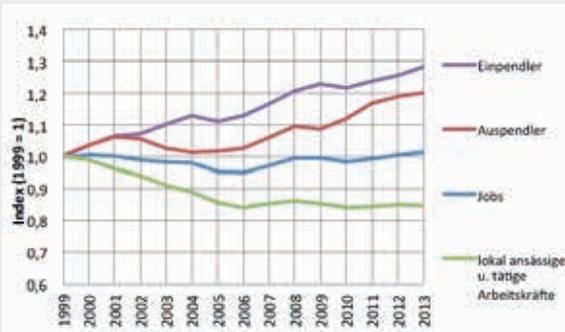


Abb. 15: Index der Stellen, Ein- und AuspendlerInnen sowie örtliche Arbeitskräfte in Duisburg, 1999-2013

Längeres Pendeln für alle

Zunächst war ein grundlegendes Ergebnis, dass die Anzahl der Arbeitnehmer/innen, die zu Jobs außerhalb ihrer Heimatgemeinde pendeln, stetig zugenommen hat. Abb. 15 zeigt den Trend für Duisburg, ein typisches Beispiel in NRW.

Die Anzahl der EinpendlerInnen (das sind Arbeitskräfte, die von anderswo nach Duisburg pendeln) nahm von 1999-2013 um fast 30 % zu, mit zwei kleinen Abwärtsbewegungen während Zeiten ökonomischer Abschwächung. Allerdings nahm die Anzahl der Jobs um weniger als 1,5 % zu, sodass der Anstieg der EinpendlerInnen nicht durch einen Anstieg an Stellen hervorgerufen wurde. Stattdessen reduzierte sich die Anzahl örtlicher Arbeitskräfte (also derjenigen, die in Duisburg wohnten und arbeiteten) um 8,5 %, da eine große Anzahl von DuisburgerInnen zu AuspendlerInnen wurden, die täglich in andere Gemeinde- und Stadtbezirke zur Arbeit fahren. Die Menschen tauschten schlichtweg die Arbeit in der Heimatgemeinde gegen die Arbeit in weiter entfernten Gemeinden ein.

Dieses Muster findet sich für fast alle größeren Städte in NRW, und auch für größere Städte in anderen alten Bundesländern. Tatsächlich stieg auch die Anzahl der Menschen signifikant an, die zu Arbeitsstätten außerhalb ihrer Heimatgemeinde pendeln, selbst wenn die Heimatgemeinden einen starken Anstieg von Arbeitsplätzen verzeichneten. Welche Gründe auch immer diese Tendenz zu längeren Pendelstrecken verursachen, der Trend ist für ganz NRW und in einem Großteil Deutschlands konsistent. Dadurch ergeben sich für die Verringerung der CO₂-Emissionen und das Einsparen von Energie große Herausforderungen.

Männliche und weibliche Pendlerstrecken – ein rätselhaftes Dilemma

Einige sehr interessante Muster treten zu Tage, wenn man männliche und weibliche Pendlerstrecken in 1999 und 2013 miteinander vergleicht. Der durchschnittliche männliche

Arbeitnehmer in NRW in 1999 pendelte 17,92 km, mit einem Anstieg auf 18,83 km in 2013. Währenddessen steigerte sich die durchschnittliche weibliche Pendlerstrecke von 14,93 km auf 16,79 km. Dies zeigt, dass einerseits die Männer ihre absolute Pendlerstrecke um einen größeren Betrag steigerten als die Frauen, nämlich um 1,90 km im Vergleich zu 1,86 km (siehe auch Abb. 16a). Dementsprechend produzierte der durchschnittliche männliche Pendler nicht nur sowohl in 1999 als auch in 2013 mehr CO₂-Emissionen als die durchschnittliche Pendlerin, auch seine CO₂-Emissionen steigerten sich um einen größeren absoluten Betrag.

Andererseits dreht sich das Bild, wenn wir proportionale Änderungen in den Pendlerstrecken betrachten. Die durchschnittliche weibliche Pendlerstrecke steigerte sich um 12,4 %, bezogen auf den Ausgangswert in 1999, wohingegen die durchschnittliche männliche Pendlerstrecke um einen geringeren Betrag von 10,6 % anwuchs (siehe auch Abb. 16b). Dies führt zu einem Dilemma, weil es die proportionale Änderung des Energieverbrauchs ist, die den Rebound-Effekt bestimmt, nicht die absolute Änderung. Deshalb zeigen beispielsweise private Haushalte, die unter

Durchschnittliche Pendlerstrecken in NRW nach Geschlecht

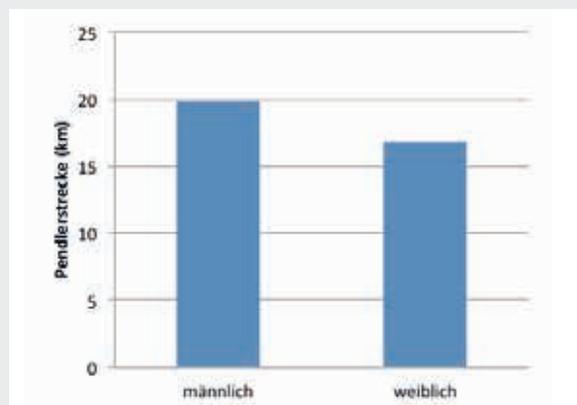


Abb. 16a: 2013 (in km)

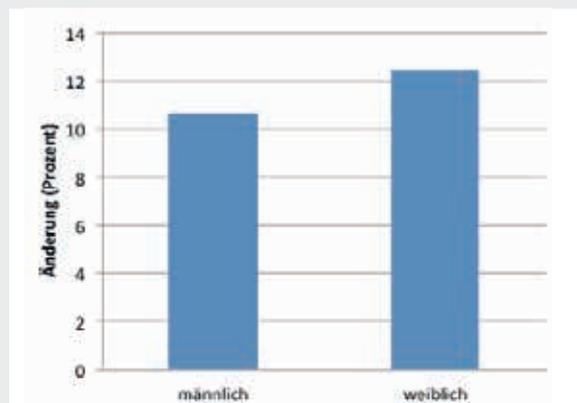


Abb. 16b: Prozentuale Änderung, 1999-2013

	Definition	Verhältnis = $\left(\frac{\text{weiblicher Rebound-Effekt}}{\text{männlicher Rebound-Effekt}} \right)$
(a)	Änderung der durchschnittlichen Pendlerstrecke 1999-2013	1.165
(b)	Änderung in der Gesamtpendlerstrecke 1999-2013	2.487
(c)	Pendlerstrecke, bezogen aufs Bruttoinlandsprodukt (BIP) der Arbeitsgemeinde/des Arbeitsbezirks, 2013	1.140

Energiearmut leiden, häufig sehr hohe Rebound-Effekte, wenn ihre Wohnungen energetisch saniert werden.

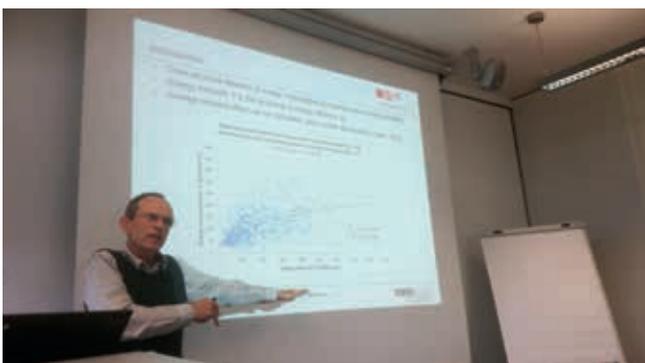
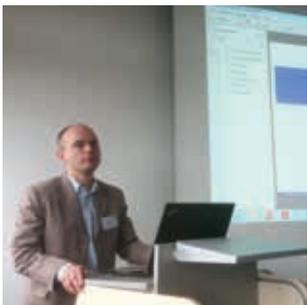
Ihr proportionaler Anstieg im Verbrauch von Energiedienstleistungen ist sehr hoch, obwohl ihr absolutes Energieverbrauchs-niveau - auch nach einer energetischen Sanierung - oft unter dem Durchschnitt liegt. Ein einseitiger Fokus auf den Rebound-Effekt, ohne zugleich das absolute Verbrauchsniveau in den Blick zu nehmen, kann daher einen falschen Eindruck vermitteln, wer den höchsten Anteil an klimaschädlichen Emissionen verursacht.

Geschlechtsspezifische Rebound-Effekte im Vergleich

Um Rebound-Effekte für Pendlerstrecken zu berechnen müssen wir zwei Arten von Veränderungen kennen: die proportionale Änderung in der Pendlerstrecke und die proportionale Änderung in den tatsächlichen Reisekosten. Letztere hängt von Änderungen in der Treibstoffeffizienz der Fahrzeuge ab, Änderungen der Treibstoffpreise und Änderungen im Einkommen derjenigen, die die Fahrtkosten tragen. Die Analyse der BfA und SOEP-Daten liefert sehr genaue Angaben zu proportionalen Änderungen der Pendlerstrecke. Im Gegensatz dazu ist es jedoch nicht einfach, zuverlässige Daten bezüglich der Faktoren zu erhalten, welche die Änderungen in den tatsächlichen Fahrtkosten bestimmen. Nichtsdestotrotz liegt die Annahme nahe, dass Änderungen in den tatsächlichen Treibstoffkosten ungefähr gleich sind für Pendler und Pendlerinnen. Das Forscherteam entwickelte dementsprechend eine Methode zum Vergleich der Rebound-Effekte geschlechtsspezifischer Pendlerstrecken, ohne genau wissen zu müssen, wie hoch oder niedrig diese Rebound-Effekte waren. Tabelle 1 gibt das Verhältnis von geschlechtsspezifischen Rebound-Effekten für eine Anzahl verschiedener Definitionen an. Definition (a) in Tabelle 1 betrifft die proportionale Änderung in der durchschnittlichen Pendlerstrecke von 1999 bis 2013 von weiblichen im Vergleich zu männlichen Arbeitnehmern. Der Rebound-Effekt für Frauen ist 1,165 mal so hoch wie für Männer, d.h. der Rebound-Effekt bei den Pendlerinnen ist um 16,5 % höher als jener ihrer männlichen Artgenossen. Definition (b) betrifft die proportionale Änderung

der Gesamtpendlerstrecke, die von allen Arbeitnehmern (weiblichen und männlichen) zurückgelegt wurde. Mit 2,487 liegt dieser Wert viel höher, weil zwischen 1999 und 2013 eine große Anzahl zusätzlicher Arbeitnehmerinnen in den Arbeitsmarkt eingetreten ist. Definition (c) betrifft die Unterschiede in Pendlerstrecken in 2013 bezogen auf das Bruttoinlandsprodukt (BIP) der verschiedenen Gemeinden und Stadtbezirke (sogenannte Querschnittsanalyse anstatt einer Zeitreihenanalyse). Dieser Wert deutet darauf hin, dass reichere Regionen eine größere Anziehung auf Pendlerinnen ausüben als auf Pendler. Mit anderen Worten: wenn man von einer Arbeitnehmerin lange Pendlerstrecken erwartet, muss man sie gut bezahlen, während dies für männliche Arbeitnehmer etwas weniger bedeutsam ist. Diese Definition wurde zusätzlich mit Bezug auf eine Anzahl anderer ökonomischer Einflussfaktoren auf Pendlerstrecken geprüft, wie z.B. der Arbeitsplatzdichte und den Mietkosten. Im Ergebnis galt der Zusammenhang ungeachtet dieser anderen Einflüsse.

Dementsprechend wurden für jede der verwendeten Definitionen höhere Rebound-Effekte bei den Pendlerinnen gefunden als bei den Pendlern. Dies bedeutet aber nicht, dass Arbeitnehmerinnen weitere Strecken zurücklegten, mehr Treibstoff verbrauchten oder mehr CO₂-Emissionen produzierten. Es bedeutet schlichtweg, dass diese im Hinblick auf diese Kenngrößen ihren Energieverbrauch proportional stärker erhöht haben als die männlichen Arbeitnehmer, weil sie von einem deutlich niedrigeren Ausgangswert gestartet sind. Dies spiegelt also vielmehr die gewonnene wirtschaftliche Unabhängigkeit und den größeren Wohlstand für Frauen wieder. Gemäß ihrer Rollen im Haushalt und in der Kinderversorgung mussten Frauen früher eher in der Nähe des Wohnorts arbeiten und hatten demzufolge nicht dasselbe Maß an Wahlmöglichkeiten wie Männer. Es gibt Hinweise darauf, dass sich diese Situation in entwickelten Ländern derzeit ändert. Aber trotz der beschriebenen Trends sind es immer noch die männlichen Pendler, die am meisten zu den klimaschädigenden Emissionen beitragen und ebendiese Emissionen um den größten Anteil pro Jahr steigern.



Literaturverzeichnis

Aus dem Projekt entstandene Publikationen

Frieling, J.; Madlener, R. (2016). Elasticity estimation for nested production functions with generalized Productivity, FCN Working Paper 1/2016

Frondele, M.; Martinez Flores, F.; Vance, C. (2016). Heterogeneous Rebound Effects: Comparing Estimates from Discrete-Continuous Models. Ruhr Economic Papers #601

Frondele, M.; Sommer S.; Vance, C. (2015), Heterogeneity in Residential Electricity Consumption: A Quantile Regression Approach. SFB 823 Discussion Paper #39

Galvin, R. (2015). Calculating the sampling error for rebound effects derived from cross-sectional analysis of building energy consumption data, eingereicht bei Energy Efficiency

Galvin, R. (2015). How does energy consumption in electric vehicles vary with speed and acceleration? Development of useful algorithms for drivers and policymakers (unveröffentlichtes Manuskript)

Galvin, R. (2015). How does speed affect the rebound effect in car travel? Conceptual issues explored in a case study of 720 Formula 1 Grand Prix speed trials, with implications for road vehicle energy efficiency policy, eingereicht bei Energy Policy

Galvin, R. (2015). The ICT/Electronics Question: Structural Change and the Rebound Effect. Ecological Economics, 120, 23-31.

Galvin, R. (2015). The rebound effect, gender and social justice: a case study in Germany, akzeptiert bei Energy Policy

Galvin, R. (2015). The Rebound Effect in Home Heating: A guide for policymakers and practitioners, publiziert von Routledge – Earthscan

Krings, H. (2015). International Trade in Second-hand Electronic Goods and the Resulting Global Rebound Effect. Joint Discussion Paper Series in Economics, MAGKS, No. 38-2015

Schmitz, H.; Madlener, R. (2015). Heterogeneity in Residential Space Heating Expenditures in Germany, FCN Working Paper No. 5/2015

Quellen

Bernstein, R.; Madlener, R. (2010). Impact of Disaggregated ICT Capital on Electricity Intensity in European Manufacturing. Applied Economics Letters, 17(17), 1691-1695

Borenstein, S. (2015). A Microeconomic Framework for Evaluating Energy Efficiency Rebound and Some Implications, The Energy Journal 36(1), 1-21

Chan, N. W.; Gillingham, K. (2015). The Microeconomic Theory of the Rebound Effect and its Welfare Implications. Journal of the Association of Ecological and Resource Economists 2 (1), S. 133–159. DOI: 10.1086/680256

Collard, F.; Patrick, F.; Franck, P. (2005). Electricity Consumption and ICT in the French service sector. Energy Economics, 27, 541-550

Coroama, V.; Lorenz, M. H. (2009). Energy Consumed vs. Energy Saved by ICT-A Closer Look . Proc. EnvirolInfo, 353-361

Frondel, M.; Peters, J.; Vance, C. (2008). Identifying the Rebound: Evidence from a German Household Panel. *The Energy Journal*, 29 (4), 154-163

Frondel, M.; Ritter, N.; Vance, C. (2012). Heterogeneity in the Rebound: Further Evidence for Germany. *Energy Economics*, 34 (2), 388-394

Frondel, M.; Vance, C. (2013). Re-Identifying the Rebound: What About Asymmetry? *The Energy Journal* 34 (4), 43-54. DOI: 10.5547/01956574.34.4.3

Galvin, R. (2015). The ICT/Electronics Question: Structural Change and the Rebound Effect. *Ecological Economics*, 120, 23-31

Madlener, R.; Alcott, B. (2011). Herausforderungen für eine technisch-ökonomische Entkoppelung von Naturverbrauch und Wirtschaftswachstum unter besonderer Berücksichtigung der Systematisierung von Rebound-Effekten und Problemverschiebungen. Studie im Auftrag der Enquete-Kommission. „Wachstum, Wohlstand, Lebensqualität“ des Deutschen Bundestages, Berlin

Madlener, R.; Turner, K. (2016). After 35 Years of Energy Rebound Research in Economics: Where do we Stand? In: T. Santarius; Walnum, H. J. and Aall, C. (Eds.): *Rethinking Climate and Energy Policies. New Perspectives on the Rebound Phenomenon*. Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg/New York, Ch. 2, pp.17-36

Ritter, N.; Schmidt, C. M.; Vance, C. (2013). How Full Is the Tank? – Insights on Short-Run Fuel Price Reactions from German Travel Diary Data. *Ruhr Economic Papers #401*

Schulte, P.; Welsch, H.; & Rexhäuser, S. (2014). ICT and the Demand for Energy: Evidence from OECD Countries. *Environmental and Resource Economics*, 63, 119-146

Saunders, H. D. (2008). Fuel conserving (and using) production functions. *Energy Economics* 30 (5), S. 2184–2235. DOI: 10.1016/j.eneco.2007.11.006

Sorrell, S.; Dimitropoulos, J. (2008). The rebound effect: Microeconomic definitions, limitations and extensions. *Ecological Economics* 65 (3), S. 636–649. DOI: 10.1016/j.ecolecon.2007.08.013

Stern, D. I.; Kander, A. (2012). The Role of Energy in the Industrial Revolution and Modern Economic Growth. *The Energy Journal* 33 (3), 125-152. DOI: 10.5547/01956574.33.3.5

Cluster EnergieForschung.NRW

Völklinger Straße 4 (rwi4)
40219 Düsseldorf
www.cef.nrw.de

Prof. Dr. Reinhard Madlener

Institute for Future Energy Consumer Needs and Behavior (FCN)

E.ON Energy Research Center

RWTH Aachen University
Mathieustraße 10
52074 Aachen
www.fcneonerc.rwth-aachen.de

Gestaltung

CARABINCREATIVES.com

Bildnachweis

Foto: E.ON ERC Gebäude, copyright E.ON Energy Research Center (Titel),
Foto: copyright Christoph Kniel (S. 7)
Foto: Prof. Madlener, copyright Frank Wiedemeier (S. 8)
Foto: Stromzähler, pixabay, kein Bildnachweis nötig (S. 17).
Foto: "used computers", Luigi Guarino, flickr, lizenziert nach CC 2.0 (S. 19)
Bild Formel E: Premiere Spark-Renault SRT_01 E auf der IAA 2013 in Frankfurt am Main,
smokeonthewater lizenziert nach CC 3.0 (S. 28)
Alle Grafiken: copyright Projektteam

Cluster EnergieForschung.NRW

Der Cluster EnergieForschung.NRW (CEF.NRW) arbeitet im Auftrag des Ministeriums für Innovation, Wissenschaft und Forschung des Landes Nordrhein-Westfalen an der Umsetzung der energiewirtschaftlichen und klimapolitischen Zielvorgaben der Landesregierung im Bereich der Energieforschung. CEF.NRW zielt darauf ab, dass technologische und sozioökonomische Erkenntnisfortschritte schneller als bisher ihren Weg in die Anwendung finden. Dazu initiiert der Cluster Forschungs- und Entwicklungsprojekte in der koordinierten Zusammenarbeit von Forschungseinrichtungen mit der Wirtschaft. Das Management des Clusters EnergieForschung.NRW verantwortet die EnergieAgentur.NRW.

©EnergieAgentur.NRW/EA446



ClimatePartner^o
klimaneutral

Druck | ID: 10876-1608-1004



EUROPÄISCHE UNION
Investition in unsere Zukunft
Europäischer Fonds
für regionale Entwicklung

Gefördert durch:
Ministerium für Innovation,
Wissenschaft und Forschung
des Landes Nordrhein-Westfalen

