



„Ganzheitliches Management von Energie- und Ressourceneffizienz in Unternehmen“ (MERU)

Unternehmensbezogene Rebound-Effekte Einführung und Übersicht

(auch Hintergrundpapier zum MERU-Praxisdialog
am 19.06.2019 in Berlin)

Sebastian Wüst und Stefan Schaltegger
Centre for Sustainability Management (CSM)
Leuphana Universität Lüneburg

Unter Mitarbeit von Carl-Otto Gensch¹, Nele Kampffmeyer¹, Christian Lautermann², Philip Mathies³, Kim Jana Müller⁴, Patrick Schöpflin², Dieter Thiel⁴, Antonia Thiele³ und Franziska Wolff¹

¹ Institut für ökologische Wirtschaftsforschung (IÖW)

² Öko-Institut e. V.

³ B.A.U.M. e. V.

⁴ Data Center Group

Datum:

25.06.2019

© Wüst & Schaltegger, Centre for Sustainability Management (CSM) 2019. All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system or transmitted in any form or by any means: electronic, electrostatic magnetic tapes, photocopying, recording or otherwise, without the permission in writing from the copyright holders.

Centre for Sustainability Management (CSM)

Leuphana Universität Lüneburg

Universitätsallee 1

D-21335 Lüneburg

Tel. +49-4131-677-2181

Fax. +49-4131-677-2186

E-Mail: csm@uni.leuphana.de

www.leuphana.de/csm

ISBN 978-3-942638-71-5

Inhaltsverzeichnis

1. Ausgangslage und Problemstellung	1
2. Der Rebound-Effekt.....	1
3. Eine Typologie von unternehmensbezogenen Rebound-Effekten	2
3.1. <i>Die ökonomische Ursache: Kosteneinsparungen und deren Handhabung.....</i>	<i>3</i>
3.2. <i>Die psychologische Ursache: Neu-Bewertung der Umweltverträglichkeit.....</i>	<i>5</i>
3.3. <i>Die technischen Ursachen: Lieferketten-Verbräuche und technische Wechselwirkungen</i>	<i>5</i>
3.4. <i>Die Bedeutung des organisationalen Kontexts, der Systemgrenzen und der Betrachtungszeiträume bei der Entstehung und Bewertung von Rebound-Effekten.....</i>	<i>6</i>
4. Die umweltentlastende Handhabung von Effizienzgewinnen: Die Hebel zur Herbeiführung von „Reinforcement-Effekten“	7
4.1. <i>Der ökonomische Hebel: Effektive Nutzung der Kosteneinsparungen.....</i>	<i>8</i>
4.2. <i>Der psychologische Hebel: Ansporn zur weiteren Verbesserung der Umweltverträglichkeit</i>	<i>10</i>
4.3. <i>Der technische Hebel: Umweltverträgliche Produkt- und Produktionsgestaltung</i>	<i>10</i>
5. Die Erzielung von Reinforcement-Effekten als Management-Aufgabe	11
Literatur	12

1. Ausgangslage und Problemstellung

Das aktuelle Niveau des globalen Energie- und Ressourcenverbrauchs für die Produktion und den Konsum von Gütern und Dienstleistungen ist deutlich zu hoch, um eine nachhaltige Entwicklung zu gewährleisten. Deshalb ist eine absolute Reduktion dieses Verbrauchs, insbesondere in den Industrieländern, notwendig. Eine gängige Strategie besteht in der Erhöhung der Energie- und Ressourcen-Effizienz, um Energie- und Materialverbräuche in Produktion und Konsum zu verringern. Trotz gesteigerter Effizienz in vielen Bereichen (bspw. der Mobilität) sind die Verbräuche auf gesamtwirtschaftlicher und -gesellschaftlicher Ebene jedoch bisher nicht nennenswert zurück gegangen (UBA 2017, Destatis 2018).

2. Der Rebound-Effekt

Ein möglicher Grund dafür, dass Effizienzsteigerungen auf volkswirtschaftlicher, aber auch betriebswirtschaftlicher Ebene nicht zu einem absoluten Rückgang des Material- und Energieverbrauchs geführt haben, sind Rebound-Effekte: Die tatsächlich realisierten Einsparungen führen zu unerwünschten Folgewirkungen, womit die Gesamtwirkung gemindert werden kann. Ein häufig vorgebrachtes Beispiel für den Rebound-Effekt ist die substantielle Effizienzsteigerung bei Verbrennungsmotoren, deren potenziell umweltentlastende Wirkung jedoch durch Veränderungen des Mobilitätsverhaltens der Konsument*innen und die Vergrößerung der Fahrzeuge durch die Hersteller geringer ausfällt als erwartet (Santarius 2015).

Effizientere und effizienter hergestellte Produkte und Dienstleistungen wirken bei einer Betrachtung pro Stück umweltentlastend, und werden deshalb weithin als Win-Win-Ansatz für Umwelt und Unternehmen aufgefasst, da neben der ökologischen Entlastung durch die Reduktion des Energie- und Materialverbrauchs oft auch Kosten eingespart werden können. Diese kostensparende Wirkung kann jedoch zu unerwünschten Nebenwirkungen führen, wenn das Ziel einer absoluten Entlastung der Umwelt durch Rebound-Effekte beeinträchtigt wird. Daneben können zahlreiche weitere Vorteile bestehen, in der Debatte häufig als „multiple benefits“ von Effizienzsteigerungen bezeichnet, die Wohlstand und Wohlbefinden erhöhen und damit grundsätzlich erstrebenswert sind (vgl. Ryan & Campbell 2012). Vor dem Hintergrund, dass die Steigerung der Energie- und Ressourceneffizienz jedoch auch eine zentrale Strategie von Wirtschaft und Politik zur Entlastung der Umwelt darstellen soll, müssen auch diese „multiple benefits“ auf die mit ihnen verbundenen negativen Umwelteinwirkungen betrachtet werden.

Bisher wurden Rebound-Effekte hauptsächlich im Hinblick auf das Konsumentenverhalten erforscht (Jenkins et al. 2011). Ähnliche Effekte können aber auch in Unternehmen auftreten, insbesondere dann, wenn bei der Bewertung der Energie- oder Materialeffizienz nur eine Betrachtung pro Stück erfolgt und dabei Mengeneffekte sowie anderweitige indirekte Wirkungen der Effizienzsteigerung, die einer absoluten Reduktion des Energie- und Materialverbrauchs entgegenwirken können, nicht bedacht werden.

Bei Rebound-Effekten handelt es sich um zuweilen kontrovers diskutierte Phänomene. Je nach Definition und Berechnungsweise fällt das Ausmaß in wissenschaftlichen Studien sehr unterschiedlich hoch aus (Sorrell 2009; Sorrell et al. 2009; Gillingham et al. 2013). Auch wenn Rebound-Effekte problematisch sind, da sie die Wirksamkeit einer Effizienzmaßnahme reduzieren oder aufheben können, sollte kein zwangsläufiger Zusammenhang zwischen Effizienzsteigerung und einem vollständigen oder mehrheitlichen Aufzehren durch anschließende Verhaltensänderungen unterstellt werden.

Von Rebound-Effekten abgegrenzt werden müssen anderweitige ökologisch, sozial und ökonomisch unerwünschte Neben- und Folgewirkungen von Effizienzmaßnahmen, die keine Reduktion der Effizienzwirkung darstellen. Während Rebound-Effekte eine Minderung oder Aufhebung der mit einer Maßnahme angestrebten Effizienzwirkung beschreiben, betreffen er-

wünscht oder unerwünschte Nebeneffekte andere Wirkungen und Wirkungskategorien jenseits der angestrebten Effizienzwirkung.

Grundsätzlich sind auch positive Verstärkungseffekte denkbar, die in die andere Richtung wirken, und damit Effizienzerhöhungen und Umweltentlastungen weiter verstärken. Entscheidend für das Entstehen möglicher Rebound- oder positiver Verstärkungseffekte ist deshalb, was im Nachgang einer Effizienzsteigerung geschieht, d. h. welche Entscheidungen getroffen und welche Aktivitäten verfolgt werden, und wie sich diese wiederum auf Energie- und Materialverbräuche des Unternehmens auswirken.

Das Phänomen der Rebound-Effekte ist in Unternehmen bisher jedoch kaum erforscht, aktuell dominieren noch Studien auf Branchen- oder volkswirtschaftlicher Ebene, die einen Blick in das tatsächliche Geschehen in Unternehmen vermissen lassen. Das Ziel des Forschungsprojekts MERU (Ganzheitliches Management von Energie- und Ressourceneffizienz in Unternehmen) ist es deshalb, das Entstehen von Rebound-Effekten direkt innerhalb von Unternehmen zu erfassen, um grundlegende Erkenntnisse zu deren Auftreten und Ausmaß zu erlangen. Zugleich sollen dabei praxistaugliche Empfehlungen zu deren Eindämmung sowie der umweltentlastenden Handhabung von Effizienzgewinnen entwickelt werden. Dies ist von großer Bedeutung, da weltweit ein Großteil des Energie- und Materialverbrauchs in Unternehmen anfällt.

3. Eine Typologie von unternehmensbezogenen Rebound-Effekten

Die wissenschaftliche Literatur zu Rebound-Effekten hat bisher zumeist den Fokus auf Effizienzsteigerungen von Produkten in der Nutzungsphase gelegt. Dabei dienen die Verhaltensänderungen durch Konsumenten als Erklärung für die ausbleibende Realisierung der zuvor erwarteten Reduktion von Energie- und Materialverbräuchen.

Den Ausgangspunkt für das Entstehen von unternehmensbezogenen Rebound-Effekten bilden Effizienzsteigerungen, die an unterschiedlichen Stellen in der Wertschöpfungs- und Lieferkette von Unternehmen entstehen oder herbeigeführt können. Als Orte der Effizienzsteigerung können dabei (1) das Produkt, (2) die Aktivitäten und Prozesse im Rahmen der Wertschöpfungskette des Unternehmens, insbesondere in der Produktion und Logistik, aber auch (3) nur indirekt mit der Herstellung verbundenen Bereiche, wie z. B. die Gebäude am Standort, ausgemacht werden. Die Lieferkette bildet einen weiteren Ort, wenn die Effizienz des Unternehmens und seiner Produkte durch den Bezug effizienterer Beschaffungs- und Investitionsgüter von Lieferanten erhöht werden kann.

Das Auftreten von Rebound-Effekten wurde bisher hauptsächlich auf ökonomische Ursachen – die mit der Effizienzsteigerung häufig verbundenen Kosteneinsparungen – zurückgeführt. Daneben können jedoch weitere Ursachen ausgemacht werden, die dazu führen, dass die tatsächlich realisierten Verbrauchsreduktionen unter den zuvor erwarteten Einsparungen liegen. Deshalb werden in der wissenschaftlichen Literatur in jüngerer Vergangenheit auch psychologische, technische und soziale Ursachen diskutiert (vgl. Santarius 2015; Santarius & Soland 2018; Sonnberger & Gross 2018). Die konzeptionelle Diskussion von psychologischen und sozialen Ursachen beschränkt sich aktuell jedoch noch auf die Konsumseite.

Psychologische Ursachen berücksichtigen dabei den Einfluss einer subjektiv wahrgenommenen, vermeintlich höheren Umweltverträglichkeit eines Produkts oder einer Technologie nach einer Effizienzerhöhung. Technische Ursachen beziehen den zur Herstellung von effizienter Produktionstechnologie notwendigen Energie- und Ressourcenaufwand in die Betrachtung mit ein. Soziale Ursachen weisen über ökonomische, psychologische und technische Ursachen hinaus und ergeben sich aus der Einbettung der handelnden Personen in den organisationalen Kontext. Dieser organisationale Kontext bildet die Rahmenbedingungen, unter denen Entscheidungen in Unternehmen getroffen werden und muss daher genauer beleuchtet werden. Sie werden hier als übergeordnete Dimension noch nicht weiter differenziert und auf-

geführt, sind jedoch Gegenstand des konzeptionellen Rahmens und der weiteren Untersuchungen im Forschungsprojekt.

Grundsätzlich werden Rebound-Effekte aufgrund ihrer Wirkungsrichtung und Reichweite in direkte und indirekte Effekte unterschieden (Greening et al. 2000; Jenkins et al. 2011; Santarius 2015). Bei direkten Effekten kann die Effizienzsteigerung unmittelbar als Ursache für die anschließende Verhaltensänderung identifiziert werden. Bei indirekten Effekten dient die höhere Effizienz zunächst nur als „ermöglichende Bedingung“, die im Anschluss zu anderweitigen Verhaltensänderungen führen kann, die nicht unmittelbar mit dem Objekt der Effizienzsteigerung verbunden sind.

Im Folgenden werden die verschiedenen Ursachen von Rebound-Effekten systematisiert vorgestellt. Eine zusammenfassende Übersicht der Erläuterungen mit Beispielen bietet Tabelle 1 auf der folgenden Seite.

3.1. Die ökonomische Ursache: Kosteneinsparungen und deren Handhabung

Wenn die Steigerung der Energie- und Ressourceneffizienz mit einer **Kosteneinsparung** verbunden ist, dann ist die die **alternative Verwendung der freigesetzten finanziellen Mittel** von zentraler Bedeutung. Unterschieden werden können dabei drei Treiber, die das Entstehen von Rebound-Effekten befördern (Santarius 2016; vgl. Font Vivanco et al. 2016):

1. Die Kosteneinsparung wird als Preissenkung an Kunden weitergeben.
2. Für Unternehmen entstehen bei konstanten Preisen höhere Gewinnmargen.
3. Eine Effizienzsteigerung in der Lieferkette bei Investitionsgütern (oder die Eigenentwicklung effizienterer Produktionstechnologie) führt zu einem relativen Kostenvorteil für eine energie- und ressourcenintensivere Produktionsweise.

Direkte Rebound-Effekte entstehen durch Entscheidungen und Verhaltensänderungen, die direkt mit der Effizienzsteigerung des Produkts oder Produktionsprozesses verbunden sind.

1. Die Weitergabe der Kosteneinsparung durch die Preissenkung kann zu einem Mehrkonsum oder einer intensiveren Nutzung bei Kunden führen (d. h. einem Rebound-Effekt auf Konsumentenseite durch einen **Einkommens-Effekt**).
2. Bei gleichbleibenden Preisen können die zusätzlichen Mittel für eine Ausweitung der Produktion (entweder durch Erhöhung der Produktionskapazitäten oder durch Mittel der Absatzförderung) genutzt werden (**Output-Effekt**).
3. Durch effizientere Produktionsverfahren kann die relative Preissenkung von Energie zu einer Substitution von anderen Input-Faktoren (insbesondere menschlicher Arbeit) in der Produktion führen, die (durch Mechanisierung, Automatisierung und Digitalisierung) in einer energie- und ressourcenintensiveren Produktion münden (**Substitutions-Effekt**).

Indirekte Rebound-Effekte können im Unternehmen dann entstehen, wenn die Effizienzgewinne an anderer Stelle für Ausgaben und Investitionen genutzt werden. Re-Spending- und Re-Investment-Effekte bezeichnen dabei die Energie- und Materialverbräuche, die durch eine alternative Mittelverwendung zusätzlich angestoßen werden.

	Direkte Rebound-Effekte		Indirekte Rebound-Effekte	
	Treiber	Beispiel	Treiber	Beispiel
Ökonomische Ursachen Kosten-einsparung durch höhere Effizienz	1. Preissenkung	1. Die Nachfrage nach einem Produkt steigt, weil es durch die Effizienzmaßnahme günstiger wird.	1. Re-Spending	1. Eingesparte Mittel werden für stärkere motorisierte Dienstwagen genutzt.
	2. Output-Erhöhung (Expansion der Produktion oder Absatzförderung)	2. Das Unternehmen investiert in eine zweite Fertigungsstraße.	2. Re-Investment	2. Eingesparte Mittel werden in die Diversifikation des Produktportfolios investiert.
	3. Substitution von anderen Produktionsfaktoren durch Energie	3. Das Unternehmen setzt statt menschlicher Arbeit verstärkt auf Automatisierung, Roboter und Digitalisierung.	3. Einbehalten von Effizienzgewinnen zur späteren Verwendung	3. Die Rücklagen werden für die Einrichtung eines zweiten Produktionsstandorts verwendet.
Psychologische Ursachen (Neu-) Bewertung der Umweltverträglichkeit aufgrund höherer Effizienz	1. Eindruck verringerteter Konsequenzen	1. Der effizienzbedingte geringere Verbrauch von PKW wird als substantieller Beitrag zur Umweltentlastung aufgefasst, ist es aber faktisch nicht.	Negative Ausstrahlung auf andere Bereiche und Aktivitäten durch: 1. Moralische Rechtfertigung bzw. „Buchführung“ 2. „Single action bias“	1. Umweltfreundliches Verhalten in einem Bereich des Unternehmens erlaubt es, bei anderen Aktivitäten ökologisch ein Auge zuzudrücken.
	2. Diffusion von Verantwortlichkeit	2. Aufgrund der höheren Effizienz in der Produktion kann der Vertrieb den Absatz dieses Produkts forcieren.		2. Aufgrund der Effizienzsteigerung ist „das“ zentrale Umweltproblem gelöst; andere Belastungen erhalten keine große Aufmerksamkeit mehr.
	3. Moralische Rechtfertigung	3. Aufgrund der höheren Umweltverträglichkeit ist es moralisch gerechtfertigt, Produktion und Absatz auszuweiten.		
Technische Ursachen Technol. Voraussetzungen & Wechselwirkungen höherer Effizienz	1. Embodied-energy- und grey-matter-Effekt („Versteckte“ Energie- und Materialverbräuche in der Lieferkette)	1. Die effizientere Herstellung von Mikrochips erfordert energie- und ressourcenintensiv hergestellte Produktionsmaschinen.	1. „Verschieben von Verbräuchen“ zwischen verschiedenen Technologien (Die Einsparung einer Technologie führt zu Mehrverbräuchen bei anderen Technologien)	1. Der Energieverbrauch für die Kühlung von Rechenzentren wird durch Verdunkelung von Fensterflächen reduziert, sodass durch Tageslicht keine Wärme mehr übertragen wird. Dies führt aber dazu, dass zusätzliche Verbräuche für Beleuchtung entstehen.

Tabelle 1: Direkte und indirekte Rebound-Effekte: Treiber und Beispiele (teilweise basierend auf Truelove et al. 2014; Santarius 2015; 2016; Font Vivanco et al. 2016; Santarius & Soland 2018)

Die Unterscheidung zwischen Re-Spending und Re-Investment bezieht sich auf den Zeitraum der Mittelverwendung: Re-Spending bezeichnet die Verbräuche durch Ausgaben im laufenden Betrieb, Re-Investment zielt auf den Verbrauch durch längerfristig wirksame Investitionen. Eine weitere Möglichkeit der alternativen Mittelverwendung besteht im vorläufigen Einbehalten der Effizienzgewinne, die dann bei einer späteren Verwendung weitere Energie- und Materialverbräuche verursachen können. Entscheidend für das Ausmaß dieser Effekte ist dabei die Höhe der zusätzlich angestoßenen Energie- und Materialverbrauch, der je nach Art und Zweck der Ausgabe oder Investition unterschiedlich hoch ausfallen kann.

3.2. Die psychologische Ursache: Neu-Bewertung der Umweltverträglichkeit

Wenn durch ein effizienteres (oder effizienter hergestelltes) Produkt zuerst einmal eine **Entlastung der Umwelt** auftritt, dann kann die daran anschließende **Neu-Bewertung der Umweltverträglichkeit** zu unterschiedlichen Entscheidungen und Verhaltensanpassungen innerhalb des Unternehmens führen (Santarius 2015 sowie Soland & Santarius 2018, dort für Verhalten auf Konsumentenseite dargestellt, hier auf Unternehmen übertragen).

Direkte Rebound-Effekte können nach der Effizienzsteigerung aufgrund der nun positive(re)n Bewertung der höheren Umweltverträglichkeit der Produkte oder Produktionsweise auftreten. Dies kann grundsätzlich unabhängig von finanziellen Effekten geschehen, entweder indem durch die Kommunikation der ökologischen Vorteile an Kunden eine höhere Nachfrage angeregt oder aus dem Unternehmen heraus eine Produktionsausweitung forciert wird. Die so zunehmende Absatz- und Produktionsmenge kann dann gegenläufig zu den umweltentlastenden Einsparungen pro Stück wirken.

Erklärt werden kann dieser Effekt aus Perspektive der handelnden Personen durch den (1) Eindruck verringerter negativer ökologischer Konsequenzen, (2) die Diffusion von Verantwortlichkeit für ökologische Folgen, oder auch durch (3) moralische Rechtfertigung. Die angenommene Entlastung der Umwelt entsteht dabei entweder durch eigene Anstrengungen oder wird durch Aktivitäten anderer Organisationseinheiten oder Akteure in der Wertschöpfungskette gewährleistet. Dies kann dazu führen, dass davon ausgegangen wird, dass das mit der Produktion einhergehende ökologische Probleme gemindert oder gelöst sind. Daneben können auch moralische Argumentations- und Denkmuster eine Rolle spielen, die es erlauben, die nun ausgeweitete umweltverträglichere Produktion mit moralischen Argumenten zu rechtfertigen (Santarius 2015; Santarius & Soland 2018).

Indirekte Rebound-Effekte wirken durch Ausstrahlung der (vermeintlichen) Umweltentlastung durch die Effizienzsteigerung auf andere Bereiche und Aktivitäten des Unternehmens. An dieser Stelle können – ähnlich wie der direkte Effekt durch moralische Rechtfertigung – Muster einer mehr oder weniger bewussten „moralischen Buchführung“ entstehen. Dabei kommt es zu einem Aufwiegen von unterschiedlichen ökologischen Be- und Entlastungen, womit weiterhin bestehenden ökologischen Belastungen eventuell eine geringere Relevanz beigemessen wird. Weiterhin kann ein „single action bias“ wirken (vgl. Truelove et al. 2014), der dazu führt, dass die handelnden Personen im Unternehmen davon ausgehen, dass mit der durchgeführten Effizienzsteigerung bereits ein substantieller Beitrag geleistet wurde, und weitere Anstrengungen damit weniger oder nicht notwendig wären.

3.3. Die technischen Ursachen: Lieferketten-Verbräuche und technische Wechselwirkungen

Wenn der Einsatz effizienterer Technologie im Unternehmen mit **zusätzlichen Verbräuchen von Energie und Ressourcen in der Lieferkette** (bzw. der Produktion von Investitionsgütern) einhergeht, dann ist die **Höhe dieser Verbräuche in die Betrachtung der Energie- und Ressourceneffizienz miteinzubeziehen**.

Zur Feststellung **direkter Effekte** ist dazu die Erfassung der auf diese Weise in der Lieferkette „versteckten“ grauen Energie und grauen Ressourcen notwendig, um die Einsparungen der vermeintlich energie- und ressourcensparenden Produktion umfassend beurteilen zu können.

Hinsichtlich möglicher **indirekter Effekte** sind die Wechselwirkungen zwischen einer Verbrauchsreduktion für eine Technologie und dadurch angestoßene Mehrverbräuche für die Nutzung einer anderen Technologie zu betrachten, um mögliche gegenläufige Wirkungen zu identifizieren und zu erfassen.

3.4. Die Bedeutung des organisationalen Kontexts, der Systemgrenzen und der Betrachtungszeiträume bei der Entstehung und Bewertung von Rebound-Effekten

Diese unterschiedlichen Ursachen wirken sich allerdings nicht automatisch auf das Geschehen im Unternehmen aus. Im Rahmen der wissenschaftlichen, insbesondere volkswirtschaftlichen Literatur, die sich mit Rebound-Effekten beschäftigt, wird häufig ausgeblendet bzw. nicht explizit berücksichtigt, dass Steigerungen der Energie- und Ressourcen-Effizienz zur Entlastung der Umwelt auch kostenneutral oder sogar kostensteigernd wirken können. Ist dies der Fall, entfalten die ökonomischen Ursachen für Rebound-Effekte keine direkte Wirkung, da dies zu Preiserhöhungen auf dem Absatzmarkt (bzw. bei konstanten Preisen zu geringeren Margen für Unternehmen) führt. Ein Rebound-Effekt aufgrund ökonomischer Ursachen entsteht dabei nicht, es können dabei jedoch weiterhin Rebound-Effekte aufgrund nicht-ökonomischer Ursachen auftreten, die zu Wirkungsdefiziten führen können. An dieser Stelle ist auch der von Santarius (2016) beschriebene Re-Design-Effekt zu verorten. Dieser Rebound-Effekt in der Produktgestaltung ergibt sich aus Entscheidungen unterschiedlicher betrieblicher Funktionen und zehrt mögliche Einsparungen durch Effizienzsteigerungen auf, indem diese für Veränderungen am Produkt genutzt werden, um dessen Leistung, Komfort oder Convenience in der Nutzung zu erhöhen.

Die Steigerung der Energie- und Materialeffizienz ist deshalb im Kontext der Aufbau- und Ablauforganisation zu betrachten, um die Nutzung und Wirkung der höheren Effizienz nachzuvollziehen. Dieser Kontext bildet dabei den Hintergrund der Effizienzmaßnahmen und prägt entscheidend deren Durchführung sowie die anschließende Handhabung von Effizienzgewinnen. Zu diesem Kontext zählen beispielsweise die Ziele und Erfolgsmaßstäbe des Unternehmens, die dazu implementierten Entscheidungs- und Anreizsysteme, und insbesondere auch die grundsätzliche Bedeutung von Umweltbelastungen durch das Unternehmen aus der Perspektive von Mitarbeiter*innen und Management. Auch die Ausrichtung des Geschäftsmodells, beispielsweise, ob Produkte verkauft oder Dienstleistungen angeboten werden, kann einen entscheidenden Einfluss auf das Ausmaß und damit die Bedeutung von Rebound-Effekten ausüben.

Aufgrund dieser Kontextfaktoren ist es denkbar, dass identische Effizienzmaßnahmen deutlich unterschiedliche Wirkungen in verschiedenen Bereichen und Abteilungen eines Unternehmens zeitigen können. Beispielsweise kann die Verwendung von LED-Lampen dazu führen, dass es in einer Abteilung bei gleichem Nutzerverhalten bzgl. Lichteinschalten und -ausschalten zu einer Einsparung kommt und in einer anderen Abteilung dazu, dass die Mitarbeitenden aufgrund der effizienteren Lampen keinen Grund mehr sehen, am Abend und bei Verlassen des Raumes das Licht auszuschalten. Diese Vielschichtigkeit und zahlreiche Wechselwirkungen erfordern deshalb eine differenzierte und umfassende Betrachtung, die je nach Bedarf auch Absatzmärkte und Lieferketten in die Bewertung miteinbeziehen sollte. Denn ob ein Unternehmen trotz intern auftretendem Rebound-Effekt aufgrund gesteigerter Produktionsmenge zur globalen Umweltentlastung beiträgt, muss beispielsweise den Absatzmarkt miteinbeziehen, da dort weniger effiziente Wettbewerber Marktanteile einbüßen können und somit eine positive Verdrängungswirkung auftreten kann. In der Folge kann dies „unter dem Strich“ dann zu einer Verminderung des gesamten Verbrauchs von Energie und Ressourcen in der Branche führen. Diese Wahl der Systemgrenzen, d. h. der in die Betrachtung und Bewertung von Rebound-Effekten einbezogenen Verbräuche, ist entscheidend, um differenziert über Umweltentlastungen befinden zu können. Zentral ist dabei immer der Beitrag der Effizienzmaßnahmen zur absoluten Reduktion des Energie- und Materialverbrauchs.

Neben den Systemgrenzen ist auch die Wahl des Betrachtungszeitraums in der Erklärung und Bewertung von Rebound-Effekten von Bedeutung, um auf Basis von Verbrauchsänderungen im Zeitverlauf sinnvolle Aussagen über deren Ausmaß und damit Relevanz zu treffen (Greening et al. 2000; Font Vivanco & Van der Voet 2014). Die Gründe hierfür bestehen in den im Zeitablauf auftretenden Veränderungen der (1) Präferenzen von Konsument*innen, (2) sozialen Institutionen des Zusammenlebens und (3) strukturellen Effekten in der Organisation auf der Produktionsseite (Greening et al. 2000). Hierbei kann zwischen kurzfristigen und langfristigen Effekten unterschieden werden.

Tritt in der kurzen Frist ein Rebound-Effekt auf, kann dies zunächst an Problemen mit der vollumfänglichen Implementierung einer Effizienzmaßnahme liegen. Maßnahmen zur Effizienzerhöhung müssen zunächst im bzw. durch das Verhalten der beteiligten und betroffenen Personen ihre umweltentlastende Wirkung entfalten. Dabei ist der höhere Verbrauch nach einer Effizienzsteigerung zunächst als Momentaufnahme aufzufassen, da Veränderungen des Status quo sich aufgrund von bestehenden Verhaltens- und Verfahrensmustern sowie existierenden Prozessen und Technologien (aufgrund von Pfadabhängigkeiten und Lock-in-Effekten) schwierig gestalten können. Im weiteren Verlauf können dann eine zunehmende Sensibilisierung, Lernerfahrungen und andere Formen der Verhaltensbeeinflussung oder technischen Anpassungen zu einer langfristig positiven Wirkung der Effizienzmaßnahme führen (so kann z.B. die Einführung eines Reinigungsmittelkonzentrats für die Reinigung von Anlagen im Betrieb zunächst dazu führen, dass das Dosierverhalten nicht verändert und damit überdosiert wird, aber nach mehreren Trainings und Gesprächen die Gewohnheiten verändert und langfristig eine effizientere Dosierung mit dem Reinigungsmittelkonzentrat erfolgt).

Beobachtbar ist allerdings auch häufig der gegenläufige Fall. Wenn bei einer Effizienzmaßnahme zunächst eine Realisierung von Einsparungen im Energie- und Materialverbrauch beobachtet wird, kann im weiteren Verlauf über einen längeren Zeitraum trotz (oder gerade wegen) der Effizienzsteigerung dann eine Steigerung des Verbrauchs dieser Technologie auftreten. Diese strukturelle Anpassungen nach Effizienzerhöhungen und der zunehmende Einfluss indirekter Effekte durch alternative Verwendung eingesparter Mittel oder Nutzung der effizienteren Technologie in neuen Anwendungsgebieten sorgen für zusätzliche Verbräuche, die die zuvor erwarteten Einsparungen aufzehren können. Ein häufig aufgeführtes Beispiel ist die Verwendung von künstlichem Licht (Fouquet & Pearson 2006; Tsao et al. 2010). Im Verlauf mehrerer Jahrhunderte wurde die Bereitstellung von Beleuchtung immer energieeffizienter und damit billiger. Dies ermöglichte die Verwendung in immer zahlreicheren Kontexten, sodass sich in einer Gesamtbetrachtung keine Einsparungen bei der für Beleuchtung notwendigen Energie ergeben hat.

Neben dieser umfassenderen und differenzierten Perspektive auf die tatsächlichen Eigenschaften und Folgen von Effizienzmaßnahmen ist es deshalb geboten, Möglichkeiten aufzuzeigen, auf welche Weise Effizienzgewinne eingesetzt werden können (bzw. sollten), um die Wertschöpfung begleitende Umweltbelastungen durch Unternehmen effektiv zu reduzieren.

4. Die umweltentlastende Handhabung von Effizienzgewinnen: Die Hebel zur Herbeiführung von „Reinforcement-Effekten“

Wie bereits weiter oben beschrieben, entstehen auch nach kostensparenden Effizienzsteigerungen nicht zwangsläufig Rebound-Effekte. Es bestehen zahlreiche und umfangreiche Handlungsspielräume, durch die diese Effekte vermieden oder positive Wirkungen verstärkt werden können. Neben der Untersuchung von Rebound-Effekten sollen deshalb auch die weiter oben bereits genannten positiven Verstärkungseffekte berücksichtigt werden. **Sie sollen hier als „Reinforcement“-Effekte bezeichnet werden.** Dabei soll untersucht werden, ob und falls ja, in welchen Fällen Reinforcement-Effekte entstehen und wie diese von Unternehmen aktiv geschaffen werden können. Die Verdrängung weniger effizienter Wettbewerber kann solch einen Reinforcement-Effekt bilden, ist jedoch nur

unter Einbezug der Wirkungen auf dem Absatzmarkt feststellbar. Diese Effekte sind in dieser Kombination so bisher noch nicht in der wissenschaftlichen Literatur diskutiert worden und entspringen konzeptionellen Überlegungen.

Die auf der folgenden Seite abgebildete Tabelle 2 zeigt eine Übersicht dieser zahlreichen Handlungsoptionen zur Herbeiführung von umweltentlastenden Reinforcement-Effekten.

4.1. Der ökonomische Hebel: Effektive Nutzung der Kosteneinsparungen

Damit kostensparende Effizienzsteigerungen effektiv und richtungssicher zu einer Reduktion des absoluten Energie- und Materialverbrauchs beitragen können, erfordern diese deshalb eine qualitative Flankierung und konsequente Berücksichtigung weiterer potentieller ökologischer Belastungen. Dazu zählen qualitative Verbesserungen der Produkte und Produktionsweise sowie weitere Anstrengungen zur Verringerung des Energie- und Materialverbrauchs bei deren Herstellung, Absatz und Nutzung.

Direkte Reinforcement-Effekte ökonomischer Natur stehen wie direkte Rebound-Effekte in unmittelbarem Zusammenhang mit dem Produkt oder dem Produktionsprozess der vorangegangenen Effizienzsteigerung. Die Kosteneinsparung wird in diesem Fall jedoch dazu verwendet, die verursachte Umweltbelastung noch weiter zu vermindern. Dazu ist eine wohlüberlegte Nutzung der freigesetzten Mittel notwendig, die zu jedem Zeitpunkt weitere mögliche Umweltbelastungen berücksichtigt.

Denkbar sind dabei vier Möglichkeiten:

1. Die Kosteneinsparung wird an Konsument*innen weitergegeben und das Unternehmen erzielt Marktanteilsgewinne auf Kosten der Wettbewerber. Damit verdrängt es aufgrund von Preisvorteilen weniger effizientere Wettbewerber, deren Produkte und Produktionsweise mit einer höheren Umweltbelastung verbunden sind.
2. Die Kosteneinsparung wird in der Produktion zum Bezug höherwertiger Inputs mit geringerer Umweltbelastung genutzt, die in der Beschaffung teurer sind, jedoch in einer Gesamtkostenbetrachtung dann aufgrund der zuvor erfolgten Effizienzsteigerung kostenneutral wirken.
3. Statt die Produktion und damit die Absatzmenge an Produkten auszuweiten wird angestrebt, verstärkt Dienstleistungen zu vermarkten. Damit kann der physische Output des Unternehmens gesenkt werden, während durch den Verkauf von beispielsweise Mobilitätsdienstleistungen Umsätze erzielt werden können.
4. Als vierte Möglichkeit ist eine selbstaufgelegte, zweckgebundene (Re-)Investition von Effizienzgewinnen in die weitere Effizienzsteigerung der Produktion denkbar, mit der eine stetige Verringerung des Energie- und Ressourcenverbrauchs angestrebt wird. Neben dieser quantitativen Verbesserung sind hier weiterhin auch qualitative Veränderungen zur Reduktion der Umweltbelastung denkbar, beispielsweise durch den Einsatz nachwachsender Rohstoffe oder die Imitation natürlicher Stoffkreisläufe.

Indirekte Reinforcement-Effekte können im Unternehmen dann entstehen, wenn bei der alternativen Verwendung von freigesetzten finanziellen Mitteln in anderen Bereichen des Unternehmens – sei es als Ausgabe im laufenden Betrieb oder als längerfristig wirksame Investition – konsequent die damit potenziell angestoßenen Energie- und Ressourcenverbräuche berücksichtigt werden, um den Gesamtverbrauch von Energie und Ressourcen des Unternehmens zu mindern.

	Direkte Reinforcement-Effekte		Indirekte Reinforcement-Effekte	
	Treiber	Beispiele	Treiber	Beispiele
Ökonomische Hebel Effektive Nutzung der Kosteneinsparung	1. Preissenkung	1. Die günstigeren Produkte verdrängen umweltbelastendere Angebote der Konkurrenz.	1. Re-Spending	1. Einsparung ermöglicht Angebot höherwertiger ökologischer Mahlzeiten in der Betriebsgastonomie
	2. Einsatz teurerer und höherwertiger Inputs mit geringerer Umweltbelastung (gesamtkostenneutrale qualit. Verbesserung)	2. Statt Einsatz von konventionellem Kakao in der Schokoladenproduktion wird ökologischer Fairtrade-Kakao verwendet.	2. Re-Investment	2. Investitionen in Effizienzsteigerung oder qualitative Verbesserung in anderen Geschäftsbereichen des Unternehmens
	3. „Physische Output-Limitierung“ (bspw. durch Substitution von Produkten durch Dienstleistungen)	3. Statt Verkauf von PKWs erfolgt das Angebot von Car-Sharing.	3. Einbehalten von Effizienzgewinnen zur späteren nachhaltigkeitsorientierten Verwendung	3. Spätere Verwendung zur Investition in Selbsterzeugung erneuerbarer Energien
	4. (Re-)Investition zur weiteren Effizienzsteigerung in bestehende Produktion	4. Einsparungen werden in weitere Effizienz-erhöhungen in der Produktion gesteckt.		
Psychologische Hebel Gestiegene Sensibilisierung für Umweltbelastungen	1. Steigerung der Ansprüche und höheres Verantwortungsgefühl hinsichtlich der Umweltverträglichkeit	1. Ansporn zu kontinuierlicher Verbesserung und Wettbewerb um möglichst geringe Verbräuche im Unternehmen	Positive Ausstrahlung auf weitere Bereiche im Unternehmen: 1. Konsistentes Handeln in allen Bereichen des Unternehmens 2. Anstreben einer „ Green Corporate Identity “	1. Aufgrund der Reduktion der Umweltbelastung in der Produktion, soll auch die Logistik zur Entlastung beitragen. 2. Es erfolgt eine Positionierung des Unternehmens in Selbst- und Fremdwahrnehmung als „grüner Arbeitgeber“.
	2. Verbesserte Möglichkeiten zur Steuerung und Kontrolle der Energie- und Ressourcen-Verbräuche	2. Einwirken auf Kunden für ökologisch nachhaltigeres Verhalten in der Produktnutzung		
Technische Hebel Integrierte Gestaltung der technischen Eigenschaften und Infrastruktur	1. Produktdesign und Produktionsweise berücksichtigen den Produktlebenszyklus	1. Produkt wird rezyklierfähig gestaltet und ein wirksames Recyclingsystem wird eingerichtet	1. Nutzung von Synergien bzw. Kopplung verschiedener Technologien und Verfahren (Kuppelproduktion) zur Erhöhung der Effizienz des „Gesamtsystems“	1. Kraft-Wärme-Kopplung oder Nutzung der Abwärme von Kühlungsprozessen für Heizung
	2. Energie-extensivere Vorproduktion durch innovative, biotechnologische Verfahren	2. Biotechnologische Produktion bei Raumtemperatur statt Produktion mit hohem Druck und Energieeinsatz	2. Unternehmensübergreifende Kuppelproduktion im Sinne der „industrial symbiosis“	2. Unternehmensübergreifende Nutzung von Nebenprodukten und Abfallstoffen (z. B. Abwärme, chemische Zwischenprodukte)

Tabelle 2: Direkte und indirekte Verstärkungs-Effekte: Treiber und Beispiele (teilweise basierend auf Truelove et al. 2014; Santarius & Soland 2018)

4.2. Der psychologische Hebel: Ansporn zur weiteren Verbesserung der Umweltverträglichkeit

Neben diesen ökonomischen Hebeln sind auch positiv wirkende psychologische Hebel denkbar, die dazu führen, dass Rebound-Effekte vermieden oder sogar positive Reinforcement-Effekte herbeigeführt werden können. Im Gegensatz zur psychologischen Entstehung von Rebound-Effekten führt hier die Neu-Bewertung der Umweltverträglichkeit zu einer gestiegenen Sensibilisierung bezüglich ökologischer Belastungen durch das Unternehmen.

Direkte Reinforcement-Effekte beziehen sich dabei wiederum auf das bereits effizientere Produkt bzw. die effizientere Produktionsweise. Dabei kann die Effizienzsteigerung durch Sensibilisierung zu einer Steigerung der Ansprüche und einem höheren Verantwortungsgefühl für die mit der Produktion verbundenen Umweltbelastungen kommen, die dafür sorgen, dass verstärkt an einer höheren Umweltverträglichkeit der Produkte und Produktionsweise gearbeitet wird. Weiterhin kann dieser Effekt auch durch verbesserte Möglichkeiten zur Kontrolle der Verbräuche entstehen, da mit zunehmender Auseinandersetzung mit der Energie- und Ressourcen-Effizienz die Wahrnehmung der möglichen Einflussnahme und Steuerung des Energie- und Materialeinsatzes steigt.

Indirekte Reinforcement-Effekte entstehen auf psychologischer Grundlage dann, wenn diese Sensibilisierung auch bezüglich der bestehenden Umweltbelastungen durch andere Aktivitäten und in anderen Bereichen des Unternehmens auftritt. Dabei kann der Wunsch, die ökologischen Belastungen zu vermindern, in einer konsistenten, für alle Bereiche des Unternehmens geltenden Umweltpolitik münden und dort weitere Maßnahmen anstoßen. Weiterhin ist auch das Anstreben einer authentischen „Green Corporate Identity“ denkbar, bei der das Unternehmen versucht in Selbst- und Fremdwahrnehmung als „grüner Arbeitgeber“ in Erscheinung zu treten, um beispielsweise aktuelle Mitarbeiter*innen zu motivieren und zu binden, und darüber hinaus als attraktiver Arbeitgeber neues Personal zu gewinnen.

4.3. Der technische Hebel: Umweltverträgliche Produkt- und Produktionsgestaltung

Auch aus einer rein technischen Betrachtung sind positive Verstärkungseffekte durch die Nutzung von Effizienzsteigerungen vorangegangener Effizienzmaßnahmen denkbar, wenn Effizienzerhöhungen über den gesamten Lebenszyklus von Produkten angestrebt werden. Dies kann immer dann der Fall sein, wenn weitere Phasen des Lebenszyklus' und weitere Produktionsprozesse im Unternehmen mit in die technische Gestaltung einbezogen werden, um sämtliche mit den Produkten verbundenen Materialflüsse und Stoffströme von Rohstoffgewinnung bis zur Entsorgung möglichst umweltverträglich zu gestalten.

Direkte Reinforcement-Effekte

1. Direkte technische Verstärkungseffekte können zum Beispiel bei produktlebenszyklusberücksichtigendem Produktdesign und entsprechender Produktionsweise entstehen. So kann zum Beispiel ein materialeffizienteres Produkt mit sortenreinen Materialien einfacher zu rezyklieren sein und damit die Wirksamkeit und Sinnhaftigkeit eines Recyclings so erhöhen, dass ein wirksames Recycling aufgebaut werden kann.
2. In eine ähnliche Richtung können zum Beispiel bei biotechnologischen Produktionsverfahren, die eine mit hohem Druck und Energieeinsatz arbeitende Produktion substituieren, verstärkende Effekte durch eine energie-extensivere Vorproduktion entstehen. So müssen keine fossilen Energieträger mehr beschafft, gelagert und transportiert werden und auch die Umweltbelastungen aus der Lieferkette der fossilen Brennstoffe entfallen.

Indirekte Reinforcement-Effekte

1. Zu indirekten Reinforcement-Effekten können die Nutzung von Synergien und die Kopplung zwischen verschiedenen Technologien gezählt werden (Kuppelproduktion), wenn sie zur Erhöhung der Effizienz des „Gesamtsystems“ beitragen (z.B. Kraft-Wärme-Kopplung oder Nutzung der Abwärme von Kühlungsprozessen für den Ersatz einer Heizung).
2. Mit einer unternehmensübergreifenden Kuppelproduktion im Sinne der „Industrial Symbiosis“ können indirekte Verstärkungseffekte durch eine unternehmensübergreifende Nutzung von Nebenprodukten und Abfallstoffen (z. B. Abwärme, chemische Zwischenprodukte) erreicht werden.

5. Die Erzielung von Reinforcement-Effekten als Management-Aufgabe

Diese Überlegungen und Ausführungen zu Reinforcement-Effekten sollen insbesondere den Personen in Unternehmen Anregungen geben, systematisch über eine zweckvolle Verwendung von Effizienzgewinnen nachzudenken, um den Gesamtverbrauch von Energie und Ressourcen trotz eventuell auftretender gegenläufiger Effekte effektiv zu mindern. Diese hier als Reinforcement-Effekte aufgeführten Handlungsoptionen zeigen, dass den häufig angenommenen Zwangsläufigkeiten und Automatismen in der Diskussion über Rebound-Effekte zahlreiche Auswege gegenüberstehen. Sie zeigen allerdings auch, dass Preissenkungen in Folge von Effizienzsteigerungen – für sich allein genommen – zu ambivalenten Ergebnissen hinsichtlich der umweltentlastenden Wirkung führen können.

Weitere Anstrengungen und kreative Ansätze sind demnach notwendig, um durch Effizienzmaßnahmen nicht nur relative, sondern auch signifikante absolute Umweltentlastungen zu erreichen. Dabei sollte angestrebt werden, die Effizienz in einer Gesamtbetrachtung über den Lebenszyklus der Produkte – d. h. von der Rohstoffgewinnung über Produktion und Nutzung bis zur Wiederverwendung und schlussendlich Entsorgung – zu erhöhen, um richtungssichere Beiträge zu einer nachhaltigen Entwicklung zu leisten.

Literatur

- Font Vivanco, D. F., & van der Voet, E. (2014). The rebound effect through industrial ecology's eyes: a review of LCA-based studies. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 19(12), 1933-1947.
- Font Vivanco, D. F., McDowall, W., Freire-González, J., Kemp, R., & van der Voet, E. (2016). The foundations of the environmental rebound effect and its contribution towards a general framework. *Ecological Economics*, 125, 60-69.
- Fouquet, R., & Pearson, P. J. (2006). Seven centuries of energy services: The price and use of light in the United Kingdom (1300-2000). *The Energy Journal*, 139-177.
- Gillingham, K., Kotchen, M. J., Rapson, D. S., & Wagner, G. (2013). Energy policy: The rebound effect is overplayed. *Nature*, 493 (7433), 475.
- Greening, L. A., Greene, D. L., & Difiglio, C. (2000). Energy efficiency and consumption—the rebound effect—a survey. *Energy Policy*, 28 (6-7), 389-401.
- Jenkins, J., Nordhaus, T., Shellenberger, M., 2011. Energy Emergence: Rebound and Back-fire as Emergent Phenomena. Breakthrough Institute. Online verfügbar unter https://s3.us-east-2.amazonaws.com/uploads.thebreakthrough.org/legacy/blog/Energy_Emergence.pdf Stand 24.06.2019.
- Ryan, L. and N. Campbell (2012), "Spreading the Net: The Multiple Benefits of Energy Efficiency Improvements", *IEA Energy Papers*, No. 2012/08, OECD Publishing, Paris.
<https://doi.org/10.1787/5k9crzjbpkcc-en> Stand 24.06.2019
- Santarius, T. (2015). Der Rebound-Effekt. Ökonomische, psychische und soziale Herausforderungen für die Entkopplung von Wirtschaftswachstum und Energieverbrauch. Metropolis Verlag für Ökonomie, Gesellschaft und Politik GmbH.
- Santarius, T. (2016). Investigating meso-economic rebound effects: production-side effects and feedback loops between the micro and macro level. *Journal of Cleaner Production*, 134, 406-413.
- Santarius, T., & Soland, M. (2018). How technological efficiency improvements change consumer preferences: towards a psychological theory of rebound effects. *Ecological Economics*, 146, 414-424.
- Sonnberger, M., & Gross, M. (2018). Rebound effects in practice: An invitation to consider rebound from a practice theory perspective. *Ecological Economics*, 154, 14-21.
- Sorrell, S. (2007). The Rebound Effect: An assessment of the evidence for economy-wide energy savings from improved energy efficiency. A report produced by the Sussex Energy Group for the Technology and Policy Assessment function of the UK Energy Research Centre. London. Online verfügbar unter <http://www.ukerc.ac.uk/publications/the-rebound-effect-an-assessment-of-the-evidence-for-economy-wide-energy-savings-from-improved-energy-efficiency.html> Stand 21.06.2019
- Sorrell, S. (2009). Jevons' Paradox revisited: The evidence for backfire from improved energy efficiency. *Energy Policy*, 37(4), 1456-1469.
- Sorrell, S., Dimitropoulos, J., & Sommerville, M. (2009). Empirical estimates of the direct rebound effect: A review. *Energy Policy*, 37(4), 1356-1371.
- Statistisches Bundesamt [Destatis] (2018). Nachhaltige Entwicklung in Deutschland 2018. Indikatorenbericht. Online verfügbar unter [https://www.destatis.de/DE/Themen/](https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-) Gesellschaft-

Umwelt/Nachhaltigkeitsindikatoren/Publikationen/Downloads-Nachhaltigkeit/indikatoren-0230001189004.pdf?__blob=publicationFile&v=6, Stand 24.06.2019.

Truelove, H. B., Carrico, A. R., Weber, E. U., Raimi, K. T., & Vandenberg, M. P. (2014). Positive and negative spillover of pro-environmental behavior: An integrative review and theoretical framework. *Global Environmental Change*, 29, 127-138.

Tsao, J. Y., Saunders, H. D., Creighton, J. R., Coltrin, M. E., & Simmons, J. A. (2010). Solid-state lighting: an energy-economics perspective. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 43(35), 354001.

Umweltbundesamt [UBA] (2017). Daten zur Umwelt 2017. Indikatorenbericht. Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/daten_zur_umwelt_2017_indikatorenbericht.pdf, Stand 24.06.2019.