



Borderstep Institut

ZEW



Industrie 4.0 im Kontext von Umweltinnovationen CliDiTrans Werkstattbericht 3-4

Jens Clausen

Impressum

Autoren / Autorinnen:

Jens Clausen (Borderstep Institut) | clausen@borderstep.de

Projekt

Klimaschutzpotenziale der Digitalen Transformation: Mikro- und Makroökonomische Evidenz zur Rolle von Nachfrageeffekten und Produktionsverlagerungen beim Einsatz von IKT (CliDiTrans)

Konsortialführung

Borderstep Institut für Innovation und Nachhaltigkeit gemeinnützige GmbH

Clayallee 323 | 14169 Berlin

Projektpartner:

ZEW - Leibniz-Zentrum für Europäische Wirtschaftsforschung GmbH Mannheim

Zweckverband Kommunale Datenverarbeitung Oldenburg (KDO) GmbH

Zitiervorschlag:

Clausen, J. (2019). Industrie 4.0 im Kontext von Umweltinnovationen. CliDiTrans Werkstattbericht 3-4. Berlin: Borderstep Institut.

Titelbild: © Clausen 2016, Innenansicht des Green Cube Rechenzentrums im Bau

Zuwendungsgeber:

Bundesministerium für Bildung und Forschung, Förderschwerpunkt „Ökonomie des Klimawandels“

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Inhaltsverzeichnis

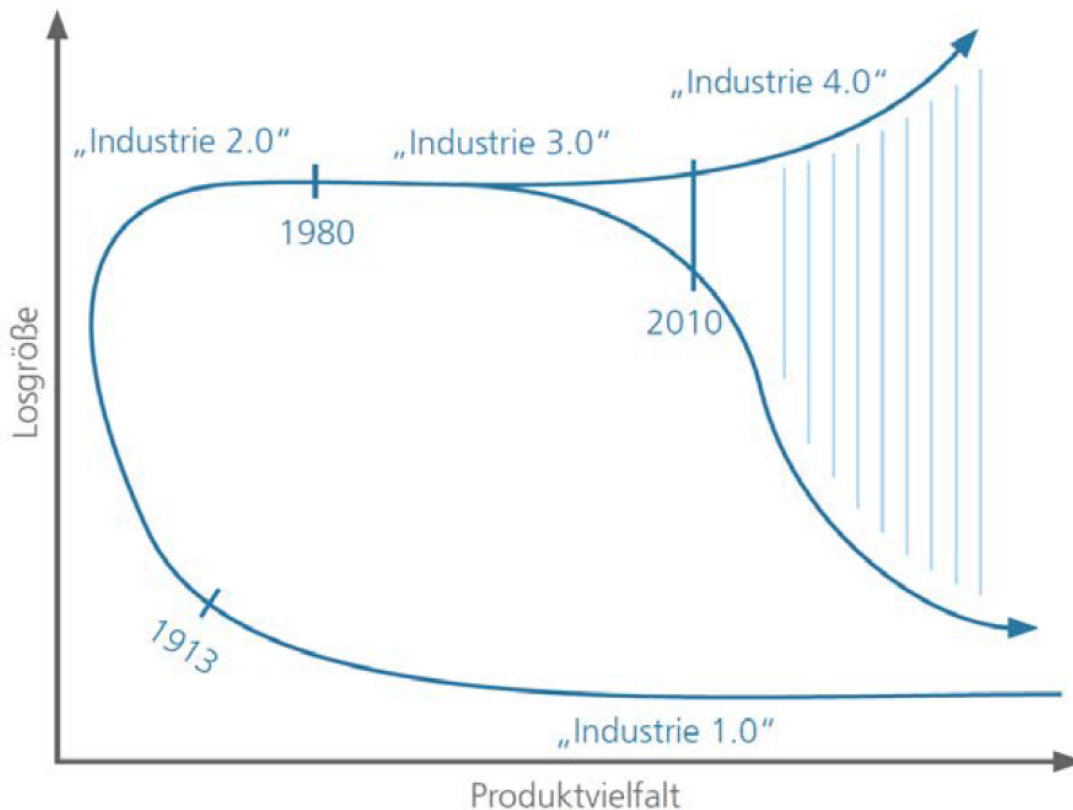
1	Einleitung	1
2	Ziele und Methodik	6
2.1	Zielsetzungen	6
2.2	Methodik der Potenzialabschätzung	6
2.3	Methodik der Abschätzung von Nachfrageeffekten.....	6
3	Beispiele für das Klimaschutzpotenzial von Industrie 4.0	8
3.1	StreetScooter und eGo Life.....	8
3.1.1	Bedeutung von Industrie 4.0 für StreetScooter und eGo Life	8
3.1.2	Klimaschutzwirkung StreetScooter und eGo Life	11
3.1.3	Niedrige TCO als Treiber der Diffusion	18
3.2	Serielles Sanieren.....	20
3.2.1	Bedeutung von Industrie 4.0 für die serielle Sanierung	21
3.2.2	Die Steigerung von Effizienz und Effektivität durch das serielle Sanieren	22
3.2.3	Diffusion des seriellen Sanierens.....	26
4	Fazit.....	27
5	Quellen.....	28

1 Einleitung

Nachdem die handwerkliche Produktion seit dem 18. Jahrhundert zunehmend durch mechanisierte Produktion abgelöst wurde (Industrie 1.0), verbreitete sich zu Beginn des 20. Jahrhunderts die Massenproduktion unter Nutzung des Fließbands (Industrie 2.0), die darauf ausgerichtet war, eine große Anzahl gleicher oder ähnlicher Produkte herzustellen. Um das Jahr 1970 herum waren die ersten speicherprogrammierbaren Steuerungen verfügbar, mit denen die Flexibilität der Produktion wieder zu steigen begann. Umrüstzeiten wurden reduziert und die Produktion ermöglichte zusehends wieder die wirtschaftliche Fertigung kleinerer Losgrößen (Industrie 3.0) (Krüger, 2017, S. 7).

Der gegenwärtige tiefgreifende Wandel, den die Digitalisierung in der Produktion ermöglicht, führt diese Entwicklung weiter. Die industrielle Fertigung von individualisierten Produkten mit der Losgröße Eins wird zusehends möglich und verbreitet sich in immer mehr Branchen. Aber die mit Industrie 4.0 verbundenen Technologien und Verfahren bieten auch für Großserien Vorteile.

Abbildung 1: Paradigmatischer Wandel der Produktionssysteme



Quelle: Buchholz, Ferdinand, Gieschen & Seidel (2017, S. 7)

Eine schier unübersehbare Vielfalt von Einzellösungen ermöglicht diese Entwicklung. Durch verschiedene Schlagworte wie Industrie 4.0, Internet of Things, künstliche Intelligenz oder Blockchain erfolgt ein Framing dieser Entwicklung, die sich dadurch zu einem quasi unausweichlichen Innovations- und Produktionsparadigma entwickelt. In der Hightechstrategie 2025 heißt es hierzu (Bundesministerium für Bildung und Forschung, 2018, S. 31):

„In den kommenden Jahren werden wir die Erfolgsgeschichte von Industrie 4.0 weiterschreiben und die Digitalisierung der deutschen Wirtschaft – gerade auch des Mittelstandes – auf ein breites Fundament stellen. Dafür müssen die neuen Technologien verstärkt im Mittelstand, im Dienstleistungssektor, insbesondere im Handel, und bei Dienstleistungen des öffentlichen Sektors zum Einsatz gebracht werden. Die Entwicklung digitaler Innovationen und neuer (datengetriebener) Geschäftsmodelle in den Unternehmen muss vorangetrieben werden. Zudem müssen Entwicklung und Integration autonomer Systeme befördert werden. Mit der Nutzung smarterer industrieller Dienstleistungen kann Industrie 4.0 weiterentwickelt und die deutsche Wirtschaft im globalen Wettbewerb gestärkt werden.“

Teilweise wirken die Erwartungen, die sich mit Industrie 4.0 verbinden, wie eine universelle Wunschliste an den technologiepolitischen Weihnachtsmann. So führt das BMWi im Absatz „Leitbild 2030: Nachhaltigkeit“ unter anderem auf (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, 2019, S. 25f):

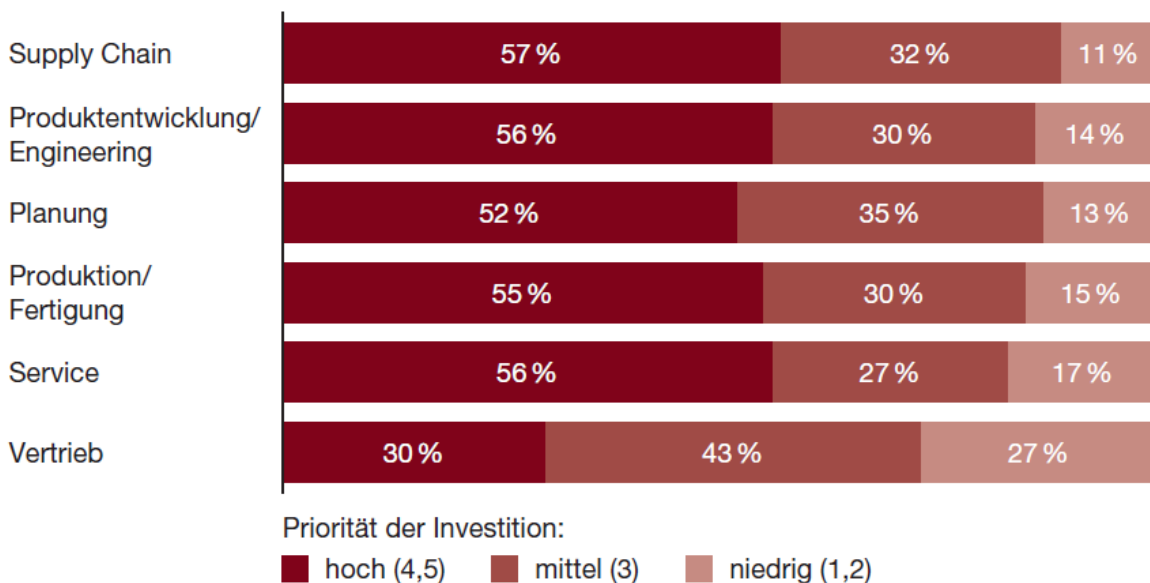
- *Mit dem Menschen im Zentrum leistet Industrie 4.0 im sozialpartnerschaftlichen Dialog signifikante Beiträge zur weiteren Verbesserung der Arbeitsbedingungen. ...*
- *Übergeordnetes Ziel ist, dass Industrie 4.0 im Sinne einer industriellen und sozialen Innovation diesen Beteiligten nicht nur Herausforderungen auferlegt, sondern vor allem neue Chancen eröffnet.*
- *Industrie 4.0 ist so ein maßgeblicher Befähiger für Kreislaufwirtschaft sowie Umwelt- und Klimaschutz insgesamt.*

Die Verbesserung der Arbeitsbedingungen relativiert sich beim Blick auf die „Autonomiestufen der Industrie“, in deren Stufe fünf ein autonomer Betrieb in allen Bereichen erreicht wird und der Mensch abwesend sein kann (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, 2019, S. 22).

Industrie 4.0 ist aber auch betriebswirtschaftlich von Bedeutung. Die von strategy& sowie PricewaterhouseCoopers (2014, S. 7) in 2014 befragten 235 Industrieunternehmen erwarteten eine jährliche Effizienzsteigerung von 3,3 % und Kostensenkung von 2,6 % durch eine Digitalisierung der Wertschöpfungsketten, die sich in fünf Jahren auf 18 % summieren würden. Um dies zu erreichen, sind allerdings Investitionen in die gesamte Wertschöpfungskette erforderlich:

Abbildung 2: Investitionen in Industrie 4.0-Lösungen verteilen sich auf alle Schlüsselbereiche entlang der Wertschöpfungskette

Industrie 4.0-Investitionen nach Wertschöpfungsstufen



Quelle: strategy& & PricewaterhouseCoopers (2014, S. 13)

Industrie 4.0 hat die deutschen Unternehmen also weitgehend erfasst. Die primäre Motivation liegt dabei zunächst in der Optimierung von internen Abläufen, der Steigerung der Effizienz und der Kostensenkung (Staufen AG & Staufen Digital Neonex, 2018, S. 19)¹. Für knapp die Hälfte der Unternehmen geht es auch um wettbewerbsfähige Produkte und die Schnittstelle zum Kunden, neue Geschäftsmodelle oder Services (Staufen AG & Staufen Digital Neonex, 2018, S. 19). 16 % der Unternehmen bieten bereits individualisierte Produkte (mit Losgröße Eins) an und für knapp 80 % ist Individualisierung ein wichtiges strategisches Thema (Staufen AG & Staufen Digital Neonex, 2018, S. 36).

Eine Reihe von technologischen Rahmenkonzepten wie Big Data, Plattformen, künstliche Intelligenz oder Losgröße Eins und zahlreiche Einzeltechnologien verlangen die Aufmerksamkeit des Managements. Es ist daher kein Wunder, dass fehlende (Management-)Kapazitäten und fehlendes Wissen wie auch die mancherorts nicht optimalen IT-Infrastrukturen die Entwicklung des Themas behindern (Staufen AG & Staufen Digital Neonex, 2018, S. 23).

Im Laufe der Zeit wird die Digitalisierung für immer mehr Unternehmen Möglichkeiten bieten, die Einsparung von Energie und materiellen Ressourcen voranzutreiben. Dies scheint besonders bei den im Folgenden aufgelisteten Verfahren grundsätzlich denkbar:

¹ Für den „Deutschen Industrie 4.0 Index 2018“ befragte Mitte 2018 die Unternehmensberatung Staufen AG zusammen mit der Staufen Digital Neonex GmbH 450 Unternehmen in Deutschland.

Produktentwicklung: „Bei der virtuellen Produktentwicklung wird ein digitales, dreidimensionales Modell eines neuen Produktes im Computer entworfen“ (Schebeck, 2018, S. 72). Moderne CAD-Systeme helfen dabei, den Entwurf mechanisch zu optimieren und ihn z.B. so materialsparend wie möglich zu gestalten. Weiter kann das virtuelle Modell in Simulationen getestet und iterativ optimiert werden, wodurch der Aufwand für den Prototypenbau sinkt. Durch die Simulation von Tests und Montagevorgängen kann darüber hinaus die Time-to-Market reduziert werden. Weiter wird der Aufwand für die Variantenkonstruktion stark reduziert, wodurch individualisierte Produkte (Losgröße Eins) wirtschaftlich darstellbar werden. Die Daten zum digitalen Produkt (auch „digitaler Zwilling“) enthalten alle Informationen zu Einzelteilen und ihren Lieferanten sowie zu den Fertigungsstufen.

Produktionsplanung: Auf Basis vorliegender Bestellungen oder der Plandaten für die Produktion errechnet das Enterprise Resource Planning (ERP)-System den Bedarf an Rohstoffen, Zulieferteilen und an Maschinenkapazität. „Die durchgängige Datenintegration und der einheitliche Zugriff auf Datenstrukturen ermöglicht die integrierte Betrachtung von Fertigung und Auftragsplanung“ (Schebeck, 2018, S. 72). Durch genauere und kurzfristigere (agilere) Planung wird besser als früher vermieden, dass bestellte Zulieferteile oder Material aufgrund von Änderungen im Produktionsprogramm nicht mehr benötigt werden und verabfällt werden müssen.

Maschinenwartung: Durch engmaschige automatisierte Überwachung von Maschinen und Anlagen, z.B. durch die Messung von Schwingungen oder Temperaturen an kritischen Teilen, wird Verschleiß früher erkannt und Wartungsarbeiten können zum optimalen Zeitpunkt durchgeführt werden. Übertrieben häufige Wartung wird vermieden, Schadensreparaturen werden seltener. Ein Zusammenhang zur Reduktion von Ausschuss ist denkbar. Maschinen mit solchen Funktionen sind Teil des Internet-of-Things. Durch diese Technologien werden für die Maschinenhersteller auch neue Geschäftsmodelle wie z.B. Verfügbarkeits- und Kostengarantien oder Nutzenverkauf nach dem Pay-per-Use Modell möglich (Gotsch, 2016, S. 21, 34).

Neue Produktionsmöglichkeiten: Prototypen oder Bauteile für Einzelanfertigungen (incl. Ersatzteile) lassen sich auf Basis der jeweiligen Datensätze durch neue Fertigungsverfahren wie den 3D-Druck herstellen. Die Anfertigung von Werkzeugen und Formen für die Herstellung solcher Teile wird vermieden. Durch die verbesserte Verfügbarkeit von Ersatzteilen können ggf. Nutzungsdauern verlängert werden.

Internet of Things: Werkstücke mit eingebauten Minicomputern können in bestimmtem Rahmen ihre eigene Fertigung (dezentral) organisieren. Durch Speicherung können Informationen zum Werkstück dokumentiert werden und liegen dann direkt bei Zugriff auf das Werkstück vor. Auch durch RFID-Chips oder ähnliches lassen sich Werkstücke individuell kennzeichnen. Anhand der Kennzeichnung kann das Werkstück unter Rückgriff auf eine zentrale Datenbank identifiziert und z.B. der nächste Fertigungsschritt ermittelt werden. In der Logistik wird durch solche und ähnliche Technologien eine sehr engmaschige Verfolgung von Gütern im Warenfluss und an verschiedenen Stellen die Steigerung der Effizienz möglich. Maschinen und Anlagen aber auch Einzelteile werden in Fabriken leichter auffindbar. Das Verlieren von falsch abgelegten Chargen wird unwahrscheinlich und der Aufwand für Ersatzfertigung sinkt.

Sensoren und Aktoren: Durch eine Vielzahl von Sensoren oder auch durch Bilderkennung können z.B. Messungen an Werkstücken oder Produktionsanlagen erfolgen. Messungen können z.B. der Qualitätskontrolle, aber auch der Planung des weiteren Fertigungsverlaufs dienen.

Service: Ähnlich wie bei der Maschinenwartung beschrieben, können fertige Investitions- oder Gebrauchsprodukte in das Internet-of-Things integriert und während ihrer Nutzung überwacht werden.² Der Hersteller kann so Daten zur Nutzung, zum Verschleißzustand oder zu notwendigen Wartungsaktivitäten gewinnen und dem Anwender einen besseren Service bieten. Auch auf der Absatzseite werden neue Geschäftsmodelle wie z.B. Verfügbarkeits- und Kostengarantien oder Nutzenverkauf nach dem Pay-per-Use Modell möglich (Gotsch, 2016, S. 34).

Aus Sicht der Energie- und Ressourceneffizienz finden sich in diesen Anwendungen von Industrie 4.0 **eine Reihe effizienzsteigernder Mechanismen:**

- Es können Produktvariation bis hin zu individualisierten Produkten mit Losgröße Eins hergestellt werden, die die Anforderungen des Kunden besser erfüllen und z.B. keine überzähligen Funktionen, die der Kunde nicht benötigt, aufweisen.
- Virtuelles Testen und virtuelle Optimierung von Prototypen reduziert den materiellen Aufwand für Tests und Prototypenbau.
- Reduktion des Aufwandes zum Bau von Werkzeugen und Formen durch Fertigung von Kleinserien und Einzelstücken auf z.B. 3-D-Druckern,
- Vermeidung von Fehlkäufen oder Fehlproduktion durch genauere Planung und punktgenauen Einkauf von Material und Zulieferteilen,
- Schnellere weil automatisierte Erkennung von Qualitätsabweichungen und Vermeidung von Abfall oder Ausschuss durch schnellere Reaktion,
- Vermeidung von Abfall durch Wiederauffinden von Werkstücken, die durch Einbindung in der Internet-of-Things lokalisiert werden können,
- Vorbeugende Überwachung und Wartung von Maschinen und Anlagen und Reduktion des Aufwandes zur Behebung von Schäden durch Reparatur und Ersatzteile.

Parallel ist allerdings darauf hinzuweisen, dass auch **gegenläufige Effekte** möglich sind. Produkte mit Losgröße Eins wären zu verabfallen, wenn der einzig mögliche Kunde abbestellt oder zahlungsunfähig wird. Auch lassen im Bereich vernetzter Produkte für den Haushalt einige Studien kürzere Nutzungszeiten befürchten (Hintemann & Hinterholzer, 2018, S. 18), ein Effekt, der sich auch bei für predictive maintenance ausgestatteten Produkten reduzierend auf die Nutzungsdauer auswirken könnte.

² Es ist darauf hinzuweisen, dass solche Geschäftsmodelle nur bei einigen Produktkategorien Sinn ergeben. Verbrauchsprodukte wie Lebensmittel, viele Dienstleistungen oder auch einfache Artefakte und Haushaltsgegenstände in das IoT einzubinden dürfte wenig Zusatznutzen hervorbringen und letztlich zu einer unkontrollierbaren Verbreitung kleiner Elektronikkomponenten in die Umwelt führen.

2 Ziele und Methodik

2.1 Zielsetzungen

Die Untersuchung von Industrie 4.0 im Kontext von Umweltinnovationen im Rahmen von CliDiTrans verknüpft zwei **Zielsetzungen**:

- (1) Die durch Industrie 4.0 erschließbaren Potenziale für Nutzensteigerung, Kostensenkung, Qualitätssteigerung sowie Umwelt- und Klimaschutz sollen qualitativ abgeschätzt werden.
- (2) Weiter sollen Nachfrageeffekte beispielhaft abgeschätzt werden, die durch einen gezielten Einsatz von Industrie 4.0 im Kontext von geeigneten Schlüsselinnovationen der Green Economy erschlossen werden können.

2.2 Methodik der Potenzialabschätzung

Die Potenzialabschätzung erfolgt methodisch anhand der Analyse von zwei realisierten Beispielen von Umweltinnovationen, die unter intensiver Nutzung von Industrie 4.0 entwickelt und realisiert wurden.

Als erster Fall wird der erfolgreiche Einstieg des Werkzeugmaschinenlabors der RWTH Aachen in die Fertigung von batterieelektrischen Automobilen mit den Produkten **StreetScooter** und **eGo Life** untersucht. Sowohl die kooperative Entwicklung dieser Fahrzeuge durch ein Netzwerk von Mittelständlern wie auch die durch Design-to-Cost-Engineering vergleichsweise niedrigen Produktkosten waren nur durch die Anwendung modernster IT-gestützter Konstruktions- und Kooperationsverfahren möglich. Im Mittelpunkt des Falles StreetScooter und eGo Life stehen eher Kostensenkung und Qualitätssteigerung von Serienprodukten, mit denen Umweltinnovationen wettbewerbsfähiger gemacht werden und eine höhere Verbreitung finden. Umweltentlastung und Klimaschutzeffekte werden primär durch die schnellere Diffusion der Produkte in die Anwendung und unter der Annahme der anteiligen Verdrängung weniger umweltfreundlicher Produkte aus dem Markt erschlossen.

Als zweiter Fall wird „**Energiesprung**“ untersucht, eine in den Niederlanden entwickelten Technologie der seriellen Sanierung, bei der die Nutzung von Building Information Modelling (BIM) die Möglichkeit schafft, Wärmesaniierungen mit industriell vorgefertigten Modulen preiswert und schnell zu realisieren. Wesentliches Element der seriellen Sanierung ist die industrielle Fertigung mit der Losgröße Eins, da jedes Gebäude unterschiedlich ist. Dies Sanierungsverfahren ist also durch Industrie 4.0 überhaupt erst möglich geworden.

2.3 Methodik der Abschätzung von Nachfrageeffekten

Der gezielte Einsatz des Technologiespektrums von Industrie 4.0 zur Optimierung von Schlüsselinnovationen der Nachhaltigkeit mit Blick auf für Nutzensteigerung, Kostensenkung, Qualitätssteigerung sowie Umwelt- und Klimaschutz wird methodisch wie folgt untersucht.

Es wird ein Überblick über Umweltinnovationen erarbeitet, für deren Diffusion eine Verbesserung der Produktionstechnik unter Nutzung von Elementen von Industrie 4.0 hilfreich sein könnte. Mit

Hilfe von Expertengesprächen erfolgt ein erstes Screening dieser Innovationen und ein Ranking in Bezug auf das Potenzial, welches Industrie 4.0 in Bezug auf die jeweiligen Innovationen verspricht.

Für drei Umweltinnovationen, bei denen Industrie 4.0 bisher nur eine geringe Rolle spielt, wird jeweils eine konzeptuelle Kurzstudie angefertigt, die die jeweils einsetzbaren Methoden von Industrie 4.0 beschreibt und die Potenziale für Kostensenkung und Qualitätssteigerung abschätzt. Die beispielhaft ausgewählten und unter Nutzung von Industrie 4.0-Verfahren gestalteten und produzierten Produkte sollten dabei für die jeweils zuzuordnenden Branchen typisch sein und insoweit die Verallgemeinerung ausgewählter Ergebnisse erlauben.

In drei Fokusgruppen wird in Branchenkontexten diskutiert, für welche Innovationen solche Potenziale in Zukunft wahrscheinlich zu erschließen sind und wie eine solche Erschließung erfolgen kann.

Als Ergebnis wird ein Fallstudienbericht zum Themenfeld „Industrie 4.0 im Kontext von Umweltinnovationen“ inkl. Handlungsempfehlungen für Politik und Wirtschaftsakteure erstellt.

3 Beispiele für das Klimaschutzpotenzial von Industrie 4.0

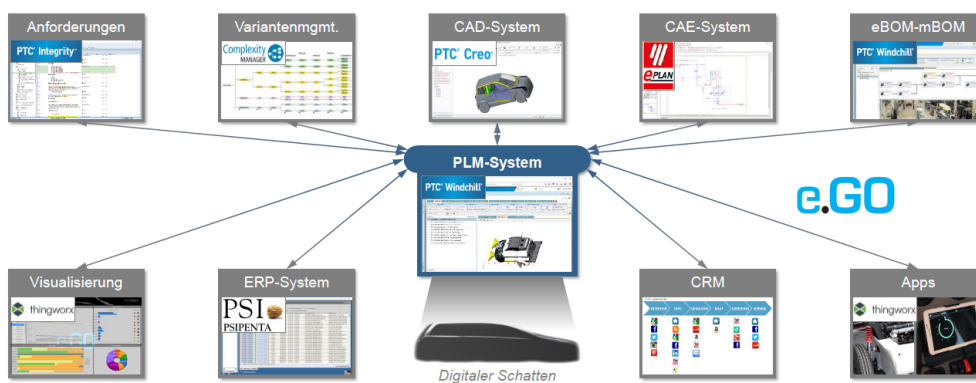
3.1 StreetScooter und eGo Life

Der durch Produktionstechniker der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen (RWTH) (und nicht nur durch Kraftfahrzeugspezialisten) unter Einsatz modernster IKT-unterstützter Konstruktions- und Simulationsmethoden entwickelte StreetScooter machte es möglich, den Kaufpreis eines batterieelektrischen Transportfahrzeugs für den innerörtlichen Lieferverkehr so weit zu senken, dass die Total Cost of Ownership (TCO) gegenüber Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor wettbewerbsfähig werden, wodurch ein Anreiz bei Flottenkunden für den Umstieg von Diesel auf Elektro entsteht (Clausen, 2017). Anfang Mai 2019 werden die ersten Exemplare des auf die Produktionstechnik der RWTH zurückgehenden eGo Life der eGo Mobile AG zum Preis³ von 15.900 € abzüglich Prämie, also 11.900 € ausgeliefert, der den Kaufpreis eines Elektro-Smart⁴ von 21.940 € damit um ca. 45 % unterbietet.

3.1.1 Bedeutung von Industrie 4.0 für StreetScooter und eGo Life

Vorläufer des heutigen StreetScooter Lieferfahrzeugs der deutschen Post war ein in Koordination durch die RWTH Aachen entwickelter Kleinwagen, der als Fallbeispiel des Exzellenzclusters „Integrative Produktion in Hochlohnländern“ gedacht war (Clausen, 2017, S. 8). Er wurde kooperativ und arbeitsteilig durch ein Konsortium der RWTH mit anderen Forschungseinrichtungen und 80 mittelständischen Unternehmen entwickelt. In einer Zeit von nur 15 Monaten gelang es diesem dezentralen Entwicklungsnetzwerk, einen ersten Prototyp, den Compact A12, zu realisieren und ihn 2011 auf der IAA in Frankfurt auszustellen (Future Mag, 2016).

Abbildung 3: Die Durchgängigkeit der IT-Systeme als Voraussetzung für hochfrequente Change Requests



Quelle: Schuh (2017, S. 14)

³ Vgl. <https://e-go-mobile.com/de/modelle/e-go-life/> vom 18.4.2019

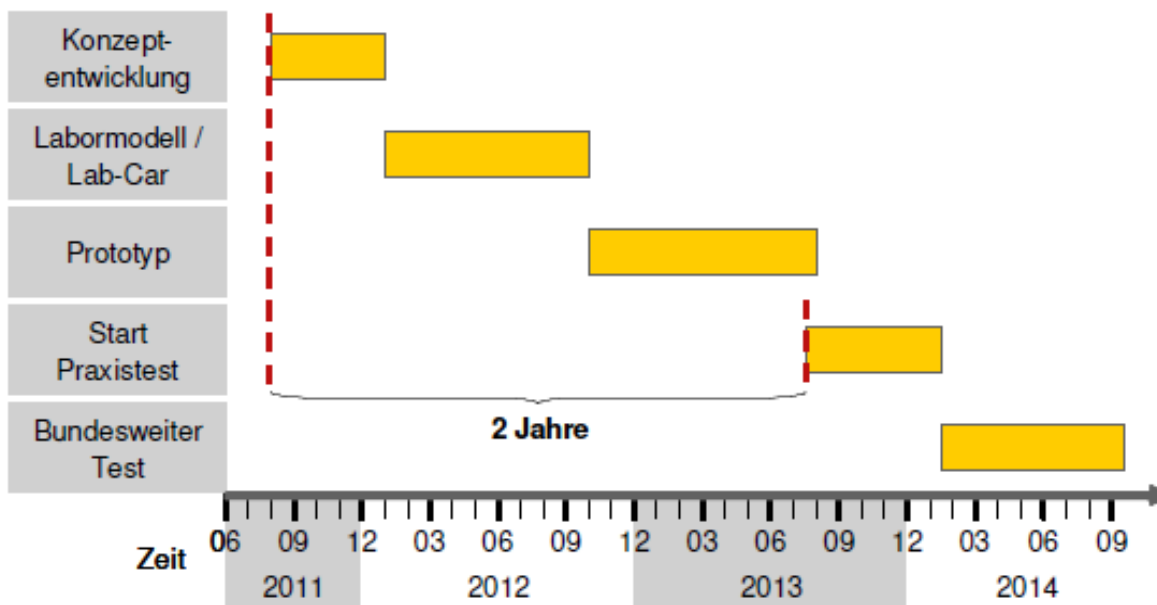
⁴ Vgl. <https://www.smart.com/de/de/index/smart-model-overview.html> vom 18.4.2019

Diese Form der kooperativen und dezentralen Entwicklung war nur auf Basis einer modernen IT möglich, deren Komponenten Schuh (2017, S. 14) aufführt: Computer Aided Design (CAD), Computer Aided Engineering (CAE), Product Life Cycle Management (PLM), Engineering Bill of Materials (eBOM), Manufacturing Bill of Materials (mBOM), Enterprise Resource Planning (ERP) und Customer Relationship Management (CRM).

„Das 50-köpfige e.GO Team mit einem Durchschnittsalter von 29 Jahren erprobt zusammen mit Forschern der RWTH den aus der Softwareentwicklung bekannten Scrum-Prozess für die Fahrzeugentwicklung“ (RWTH Aachen Campus, 2016). Scrum unterscheidet drei am Prozess beteiligte Akteursgruppen: Den Product Owner, der die fachlichen Anforderungen definiert und priorisiert, den Scrum-Master, der den Prozess managt und Hindernisse beseitigt sowie das Team, welches dezentral das Produkt entwickelt. Auch der 3D-Druck wurde eingesetzt und der erste Prototyp wurde zu 30 % aus 3D-gedruckten Komponenten aufgebaut.

Die PLM-Software und der Scrum-Prozess erlaubten, verschiedene Prototypen in dezentralen Teams parallel zu entwickeln. Sie erlaubte es auch, zwischen dem 13.12.2016 und dem 9.2.2017 eine deutlich verbreiterte und damit sicherere Version des eGo Life zu entwickeln, was mit Mitteln der konventionellen Produktentwicklung ein Vielfaches an Zeit gekostet hätte (Schuh, 2017, S. 13). Auch die Taktung des F&E-Prozesses des StreetScooters war schnell:

Abbildung 4: StreetScooter in zwei Jahren vom Kick-off zum Start des Praxistests



Quelle: Kampker (2015, S. 17)

Eine Virtual-Reality-Installation aixCAVE am IT Center der RWTH Aachen University ermöglichte eine regelmäßige und schnelle Überprüfung des Designs und beschleunigt den Entwicklungsprozess er-

heblich (RWTH Aachen Campus, 2016). Durch IT-gestützte Simulation wurde das besonders bei Elektroautos mögliche, überdurchschnittlich steife Chassis optimiert. Es wurde durch die Festigkeit des hochfesten Batterieblocks möglich, der für die passive Sicherheit des gesamten Autos genutzt wird (RWTH Aachen Campus, 2016).

Die Produktion der Teile erfolgt dezentral im Netzwerk der auch in der Entwicklung eingebundenen Entwicklungs- und Produktionspartner. Klar ist, dass diese Organisationsform Auswirkungen auf die Innovationsfähigkeit der Automobilbranche hat. Tobias Reil leitet die Fertigung des StreetScooters und urteilt: *„Für die großen Hersteller gilt: Erst ab 80.000 Einheiten jährlich lohnt sich für sie der Aufbau eines eigenen Produktionssystems. Wir beweisen, auch mit 20.000 bis 25.000 Fahrzeugen pro Jahr effizient, produktiv und wirtschaftlich erfolgreich sein zu können“* (Meier, 2018). Die Kleinserienfähigkeit profitiert davon, dass es den StreetScooter zunächst nur in relativ wenigen Varianten gab. Zunächst konnte durch den Kunden nur die Größe der Batterie (20 oder 40 kWh) sowie die Größe des Aufbaus (4m³ oder 8 m³) gewählt werden. Die beiden Grundmodelle sind jeweils in drei Ausführungen (Koffer, Pritsche, Fahrgestell) bestellbar, aber selbst das ist im Vergleich zu der Variantenvielfalt etablierter Hersteller eine sehr geringe Zahl (Meier, 2018).

Die starke Reduktion der Vielfalt ist im Automobilgeschäft nicht neu. Schon Henry Ford erkannte die kostentreibende Wirkung der Variantenvielfalt und beschloss 1909 *„Jeder Kunde kann seinen Wagen beliebig anstreichen lassen, wenn der Wagen nur schwarz ist“* (Ford, 1923, S. 83). Er betrachtete die Verkäufer kritisch, die immer auf die 5 % der Kunden mit Extrawünschen hörten und nicht *„auf die 95 %, die schlechtweg kauften“* (Ford, 1923, S. 83).

Der eGo Life ist in Bezug auf einige Komponenten unkonventionell frugal konstruiert. So senken ein 48-Volt-Antrieb mit Großserien-E-Motoren wie auch ein tragender Fahrzeugrahmen mit Kunststoffkarosserie die Kosten gegenüber den üblichen aufwendig entwickelten Verbrennungsmotoren und selbsttragenden Karosserien (RWTH Aachen Campus, 2016). Mit Blick auf den eGo Life resümiert Schuh: *„Wir haben damit gerechnet, dass unsere Frugal Engineering-Ansätze aufgehen und ein extrem günstiges Elektrofahrzeug realisieren“* (RWTH Aachen Campus, 2016)

Kostensenkende Effekte wurden in der Entwicklung von StreetScooter und eGo Life zumindest auf zwei Wegen erzielt:

- Durch die schnelle Taktung konnte der Entwicklungsprozess beschleunigt werden, wodurch zum einen Personalkosten, zum anderen aber auch Kapitalkosten für die Vorfinanzierung über eine lange Zeit, reduziert wurden.
- Durch die konsequent dezentrale Fertigung fallen die für den zentralen Zusammenbau der Fahrzeuge notwendigen Produktionsanlagen vergleichsweise einfach und damit kostengünstig aus.

Aufgrund der konsequenten Modulbauweise und der daraus resultierenden geringen Fertigungstiefe verläuft die Produktion des StreetScooters in den Talbot-Hallen, in denen ehemals Eisenbahnwaggons gebaut wurden, anders als in konventionellen Automobilfabriken. Aufwändige Fließ- bzw. Produktionsbänder fehlen, stattdessen werden die Karossen auf Rollwagen im 15 Minutentakt zu den 30 Endmontagestationen bewegt (Meier, 2018).

In der Produktion des eGo-Life erfassen RFID-Scanner das angelieferte Material, welches vernetzte und selbst fahrende Gabelstapler ins Hochregallager fahren. Autonom fahrende Smart Factory Trains bringen das Material dann in die Produktion (Vodafone Deutschland, 2019). Die Maschinen und Anlagen der eGo-Life Fabrik sind durch 36 Antennen auf 16.000 m² mit einem autarken 5G-Netz verbunden. Mobile Edge Computing sorgt für niedrige Latenzzeiten (Vodafone Deutschland, 2019). Durch Network-Slicing wird das Netz lokal bedarfsgerecht optimiert, etwa auf geringe Latenz oder hohe Upload- oder Downloadbandbreiten (Vodafone Deutschland, 2019). In Zukunft sollen Augmented-Reality Anwendungen dabei helfen, Bauteile zu lokalisieren und die Montage zu unterstützen (Vodafone Deutschland, 2019).

3.1.2 Klimaschutzwirkung StreetScooter und eGo Life

Zur Beurteilung der Klimaschutzwirkung der Entwicklung von StreetScooter sind zwei Wirkungsmechanismen von Bedeutung:

- Ein möglicher Beitrag zum Klimaschutz liegt darin, dass jeder einzelne StreetScooter im Betrieb niedrigere CO₂-Emissionen haben könnte als ein Vergleichsfahrzeug mit Antrieb durch Verbrennungsmotor. Aufgrund der **kostenoptimierten Gestaltung** des StreetScooter erfolgt eine im Vergleich zu teureren Angeboten schnellere Verbreitung im Markt, wodurch dann insgesamt ein größeres Klimaschutzpotenzial erschlossen wird.
- Ein anderer möglicher Beitrag liegt in den in Kapitel 1 beschriebenen **effizienzsteigernden Mechanismen**, die durch die Nutzung des Technologiespektrums von Industrie 4.0 in Produktion und Logistik erschlossen werden können.

3.1.2.1 Treibhausgasemissionen aus dem Betrieb von Elektrofahrzeugen

Um die Frage zu beantworten, ob und ggf. unter welchen Bedingungen jeder einzelne StreetScooter im Betrieb einen Beitrag zum Klimaschutz leistet ist es notwendig, die Literatur zum ökobilanziellen Vergleich von Elektroautos und Autos mit Verbrennungsmotor zu nutzen und besonders die ökologische Bewertung der sich ggf. durch schnelle Innovationen rasch verändernden Batterien in Betracht zu ziehen. Die Zahl solcher Studien nimmt gegenwärtig rasch zu und Peters et al. (2017, S. 497) zeigen dabei plastisch auf, dass einer eher kleinen Zahl von Primäruntersuchungen eine vergleichsweise große Zahl Sekundäranalysen folgt. Zudem unterscheiden sich die Studien von den Ergebnissen her. Insgesamt tobt quasi ein Kampf der Studien. So zeigen Buchal et al. (2019), „*dass der CO₂-Ausstoß des Elektromotors im günstigen Fall um etwa ein Zehntel und im ungünstigen Fall um ein gutes Viertel über dem Ausstoß des Dieselmotors liegt*“, wurden aber von anderen Autoren deutlich wegen mangelnder wissenschaftlicher Grundlage kritisiert (Hajek, 2019; Schwierz, 2019), so dass trotz vieler Pressemeldungen ein Erkenntnisgewinn nicht stattfindet. Der ADAC meldet im Herbst 2019, dass beim gegenwärtigen Strommix die klimafreundlichste Lösung das Erdgasauto sei, sieht aber erhebliche Vorteile bei Elektroautos im Zukunftsszenario mit grünem Strom (ADAC, 2019). Die folgende Abschätzung ist damit eine weitere unter vielen. Ihr Ziel liegt nicht in einer „Klärung des Sachverhaltes“ sondern eher darin, die Bedeutung wesentlicher Einflussfaktoren deutlich zu machen.

Das Umweltbundesamt (2016, S. 79) unterscheidet in einem 2016 publizierten Vergleich unterschiedliche Beiträge zu den gesamten Treibhausgasemissionen eines Fahrzeugs.

- Unabhängig von der Antriebsart sind dies die Fahrzeugherstellung, die Wartung und die Fahrzeu- gentsorgung.
- Bei Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor kommen die Kraftstoffbereitstellung und die Auspuf- fissionen hinzu.
- Bei Elektrofahrzeugen sind die Strombereitstellung, die Herstellung der Batterie sowie eine mög- liche Weiternutzung der Batterie nach Verschrottung des Fahrzeugs wie auch das Batterierecyc- ling zu berücksichtigen.

Mit Blick auf die verfügbaren Ökobilanzen ist ein Vergleich verschiedener Antriebsarten eher für PKW als für Kleintransporter wie den StreetScooter durchführbar. Mit einer durchschnittlichen Leermasse von 1.497 kg wiesen Pkw (Kraftfahrt-Bundesamt, 2017) aber sogar schon im Jahr 2016 mehr Leerge- wicht auf als ein StreetScooter WORK mit 20 kWh Batterie, der nur ein Leergewicht von 1.460 kg hat (StreetScooter, 2018). Da der StreetScooter zudem eine sehr geringe Höchstgeschwindigkeit von nur 85 km/h hat ist davon auszugehen, dass in einem solchen Vergleich ein batterieelektrisches Fahrzeug wie der StreetScooter eher etwas zu schlecht abschneidet.

Fahrzeugherstellung: Sowohl für Fahrzeuge mit Ottomotor wie auch für Fahrzeuge mit Dieselmotor geht das Umweltbundesamt (2016, S. 79) von Treibhausgasemissionen aus der Fahrzeugherstellung von ca. 40 gCO₂/km bei 168.000 km Laufleistung aus. Nordelöf et al. (2014, S. 1879) nennen umge- rechnet auf 168.000 km Laufleistung einen Wert von 39,2 gCO₂/km, ganz ähnlich auch Hall und Lut- sey (2018, S. 6). Im folgenden Vergleich wird ein Wert von 40 gCO₂/km für die Herstellung eines Fahr- zeugs mit Verbrennungsmotor wie auch für die Herstellung eines Elektrofahrzeugs ohne Batterie ver- wendet.

Wartung: Sowohl für Fahrzeuge mit Otto- und Dieselmotor wie auch für Fahrzeuge mit Elektromotor geht das Umweltbundesamt (2016, S. 79) von Treibhausgasemissionen aus der Fahrzeugwartung von ca. 4 gCO₂/km bei 168.000 km Laufleistung aus. Der Wert wird in den folgenden Vergleich übernom- men.

Fahrzeugentsorgung: Sowohl für Fahrzeuge mit Otto- und Dieselmotor wie auch für Fahrzeuge mit Elektromotor geht das Umweltbundesamt (2016, S. 79) von Treibhausgasemissionen aus der Fahr- zeugentsorgung von ca. 3 gCO₂/km bei 168.000 km Laufleistung aus. Der Wert wird in den folgenden Vergleich übernommen.

Kraftstoffbereitstellung und Auspuffemissionen: Das Umweltbundesamt (2016, S. 79) nimmt für die Kraftstoffbereitstellung Treibhausgasemissionen von 30 gCO₂/km im Falle von Dieselmotor und 40 gCO₂/km im Falle von Ottomotor an. Die Auspuffemissionen betragen 120 gCO₂/km im Falle von Dieselmotor und 155 gCO₂/km im Falle von Ottomotor. Messagie (2017, S. 11) dokumen- tiert für Diesel einen ähnlich hohen Summenwert von 163 gCO₂/km, ganz ähnlich auch Hall und Lut- sey (2018, S. 6). Dieser Wert ist auch bei kleineren Transportern ähnlich (Schwarz & Gerstl, 2018). In den meisten Ökobilanzen nicht betrachtet wird der Erdgasantrieb. Buchal, Karl & Sinn (2019, S. 8)

nehmen hier auf Basis der Mercedes Werksangaben Auspuffemissionen von 76 gCO₂/km und einen Aufschlag für die Vorkette von 30 % an und kommen so auf insgesamt 99 gCO₂/km für ein Mercedes Modell der C-Klasse. Auf Spritmonitor.de werden reale Verbrauchswerte dokumentiert. Das einzige hier gelistete Mercedes C-Modell liegt bei einem Erdgasverbrauch 5,22 kg/100 km, die gelisteten Modelle der etwa größeren E-Klasse zwischen 5,5 und 8 kg/100 km. Rechnet man mit einem realen Verbrauch von 5,5 kg/100 km und einem Emissionsfaktor (incl. Vorkette) von 2,79 kgCO₂/kg Erdgas (Spritmonitor.de, 2019), errechnet sich so ein realer CO₂-Ausstoß des Buchal, Karl & Sinn betrachteten Mercedes von 146 g/km.⁵

Zur Entwicklung im Zeitverlauf und damit zu erwartenden Verbesserungen bei Verbrennungsmotoren merken Clausen und Fichter (2019) an:

„Ausgangspunkt waren (2008) Emissionen von ca. 157,5 gCO₂/km (Transport & Environment, 2018, S. 18), das Ziel für 2015 waren 130 gCO₂/km. Für die durchschnittlichen Emissionen eines in 2017 verkauften Fahrzeugs gibt die EU-Kommission⁶ 118,5 gCO₂/km an, womit das Ziel für 2015 übererfüllt wäre. Seit 2008 entspricht dies einer Reduktion von 39 g oder 24,8 %. Die an sich erfreuliche Zielerreichung stellt sich differenzierter dar, wenn man parallel auf die zunehmende Differenz von Herstellerangaben und den daraus errechneten Werten der CO₂-Emissionen einerseits und der realen Kraftstoffverbräuche andererseits schaut. Die Tendenz dieser Abweichungen zeigt seit Jahren nach oben (ICCT & TNO, 2017; ICCT, TNO, IFEU & Sidekick, 2013). Den um nominell 24,8 % gesenkten CO₂-Emissionen von 2008 bis 2017 stehen zusätzliche Messabweichungen von ca. 27 % zwischen 2008 und 2016 gegenüber, die den erreichten Effekt nicht nur auf Null reduzieren, sondern sogar einen unter dem Strich gestiegenen Spritverbrauch erwarten lassen (ICCT & TNO, 2017). „

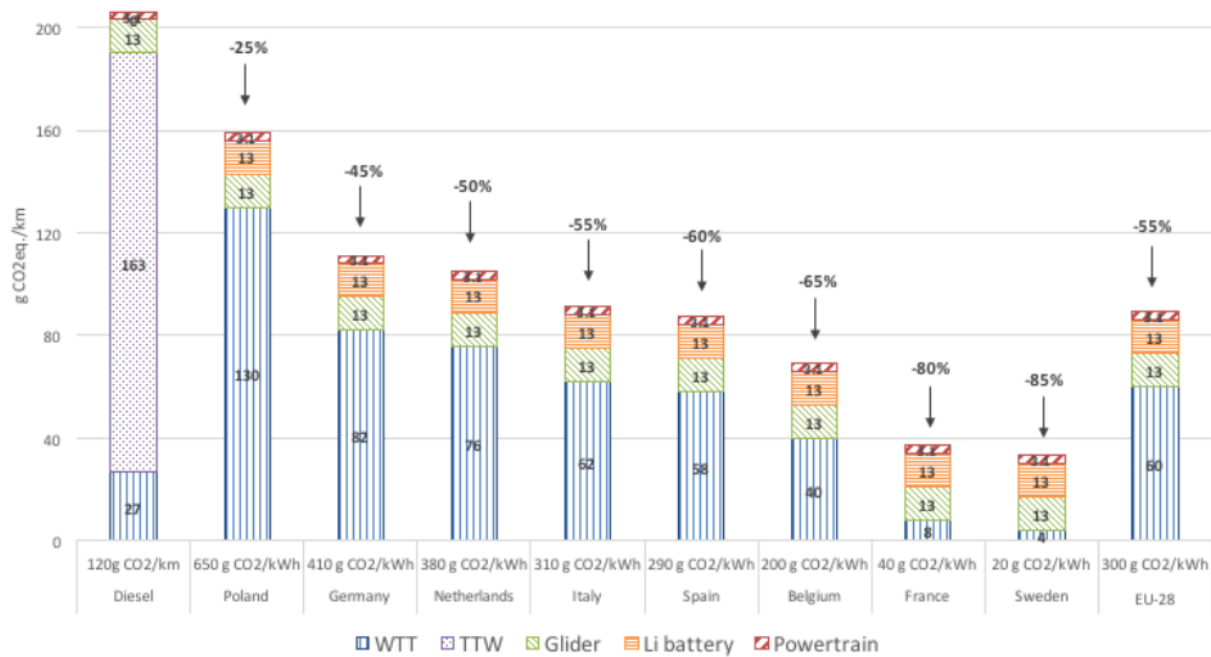
Mit Blick auf die Tatsache, dass den Automobilherstellern seit dem Jahr 2008 keine effektive Reduktion des durchschnittlichen Treibstoffverbrauches gelungen ist, kann mit einer Reduktion dieser Werte durch Effizienzgewinne nicht sicher gerechnet werden. Im folgenden Vergleich wird daher bei Kraftstoffbereitstellung und Auspuffemissionen ein Wert von ca. 160 gCO₂/km für Diesel und 180 gCO₂/km für Benzin verwendet. Für den Erdgasmotor wird nicht der von Buchal et al. (2019) angegebene sondern der auf Basis realer Verbräuche errechnete Wert von 146 gCO₂/km verwendet.

Strombereitstellung: Die vorliegenden ökobilanziellen Untersuchungen sind sich einig, dass die Art der Strombereitstellung von hohem Einfluss auf die Treibhausgasemissionen von BEV pro km Laufleistung haben. Messagie (2017, S. 11) dokumentiert die niedrigsten Emissionen mit 4 gCO₂/km für den schwedischen Strommix auf Basis von Strommixdaten der EU (Commission européenne & Direction générale de la mobilité et des transports, 2016).

⁵ Dieser Wert entspricht fast exakt den für gebrauchte Mercedes Erdgasfahrzeuge auf <https://suchen.mobil.de/auto/mercedes-benz-e-200-erdgas-cng.html> angegebenen Werten.

⁶ vgl. http://ec.europa.eu/clima/policies/transport/vehicles/cars/index_en.htm vom 20.12.2018.

Abbildung 5: Treibhausgasemissionen eines batterieelektrischen Fahrzeuges in europäischen Ländern mit unterschiedlichem Strommix



Quelle: Messagie (2017, S. 11), WTT = well to tank, TTW = tank to wheel, Glider = Herstellung der Karosserie, Powertrain = Antriebsstrang

Mit zunehmendem Anteil erneuerbaren Stroms im Netz nehmen also die Treibhausgasemissionen aus der Strombereitstellung eines BEV im Verlauf der Nutzung kontinuierlich ab (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU), 2019, S. 4). Angelehnt an den in 2030 zu erwartenden EU Strommix wird im folgenden Vergleich ein Wert von 40 gCO₂/km für Treibhausgasemissionen aus der Strombereitstellung für BEV verwendet. Zusätzlich wird im Zukunftsszenario der Wert von 4 gCO₂/km für den schwedischen Strommix beispielhaft für Länder bzw. zukünftige Zeiträume mit weitgehend regenerativem Strommix verwendet.

Batterieherstellung: Das Umweltbundesamt (2016, S. 86) dokumentiert Treibhausgasemissionen der Herstellung von Li-Ionen-Batterien auf Basis verschiedener Studien mit – unter Ausschluss eines Ausrichters - Werten zwischen 120 und 180 kgCO₂/kWh Batteriekapazität. Die Studie selbst verwendet einen Wert von 140 kgCO₂/kWh. Romare und Dahlöf (2017, S. 39) dokumentieren für die Materialbereitstellung incl. Bergbau einen „most likely value“ von 60 bis 70 kgCO₂/kWh, für die Zell- und Batterieproduktion einen „most likely value“ von 70 bis 110 kgCO₂/kWh. In Summe ergibt dies einen Wert zwischen 130 bis 180 kgCO₂/kWh. Romare und Dahlöf (2017, S. 25) weisen darauf hin, dass ein hoher Anteil der in der Batterieproduktion eingesetzten Energie Strom ist. Es ist dementsprechend von hohem Einfluss, mit welchem Strommix die Produktion erfolgt. Der schwedische Strommix beispielsweise reduzierte die Gesamtauswirkung um 60 %. Ellingsen et al. (2014) haben die Bewertung der Umstellung auf Strom aus Wasserkraft einbezogen und kommen ebenso zu dem Schluss, dass dies

den Gesamtwert um 60 % senken könnte. Ganz ähnlich wie die Treibhauswirkung der Strombereitstellung wirkt sich der Strommix also auch auf die Treibhausgasmissionen aus der Batterieherstellung aus. Im folgenden Vergleich wird zum einen der gegenüber dem Umweltbundesamt höhere Mittelwert von Romare und Dahlöf von 155 kgCO₂/kWh verwendet, alternativ aber im „Zukunftsszenario“ dieser Wert um 60 % auf 62 kgCO₂/kWh reduziert.

Weiternutzung der Batterie: Helmers und Weiss (2017) wie auch Reid und Julve (2016) weisen auf die Bedeutung einer Verlängerung der Nutzungsdauer der Batterie durch einen „second life“ Ansatz hin, bei dem die verbrauchten Batterien in weniger anspruchsvollen Anwendungen, z.B. der Energiespeicherung in Stromnetzen, weiterverwendet werden, anstatt sie mit dem Auto gleichzeitig zu recyceln. Da erwartet wird, dass die Batterien nach ca. 10 Nutzungsjahren noch über eine Restkapazität von 75 bis 80 % verfügen (Hall & Lutsey, 2018, S. 7), ist ein solcher Einsatz durchaus denkbar. Abhängig von der Zeitdauer der „second life“ Nutzung (bis zu 10 Jahre) sowie dem Anteil an Batteriezellen, die einer solchen zweiten Nutzung zugeführt werden (bis zu 100 %), errechnet Richa (2016, S. 65, 148) aufgrund der Einsparung des Material- und Produktionsaufwandes für im Stromnetz eingesetzte Batterien eine relative Reduktion der für die Nutzung im Elektrofahrzeug anzurechnenden Treibhausgasemissionen von bis zu 50 %. Hall und Lutsey (2018, S. 8) errechnen mit etwas anderen Annahmen einen mit 42 % etwas kleineren Vorteil. Aufgrund der schlechten Verfügbarkeit von Daten besteht jedoch eine hohe Unsicherheit bei der Abschätzung der Auswirkungen der zweiten Lebensdauer der Batterie (Ellingsen, Hung & Strømman, 2017; Hall & Lutsey, 2018). Im folgenden Vergleich wird daher ein Bonus von 30 % der für die Herstellung anfallenden Treibhausgasemissionen für eine „second life“ Nutzung in Anrechnung gebracht.

Batterieentsorgung bzw. –recycling: Ellingsen, Hung und Strømman (2017) sehen das Batterierecycling als umweltentlastend, da die Herstellung von Sekundärmetallen (d.h. recycelten Metallen) weniger Energie benötigt als die Gewinnung von Primärmetallen. Die in der Literatur angegebenen Treibhausgasemissionen des Batterie-Recyclings sind vielfältig und mit hoher Unsicherheit behaftet. Romare und Dahlöf (2017, S. 37) zeigen, dass das Recycling von Lithium-Ionen Batterien möglicherweise zu einer berechtigten Bonusgutschrift von ca. 1 kgCO₂/kWh Batteriekapazität führen kann. Hall und Lutsey (2018, S. 10)) errechnen für das Batterierecycling Nettoeinsparungen von 7 bis 17 % der Treibhausgasemissionen der Batterieherstellung. Im folgenden Vergleich wird die Schätzung von 1 kgCO₂/kWh Batteriekapazität aus der Arbeit von Romare und Dahlöf verwendet.

Zusammenfassend ergeben sich Werte für Treibhausgasemissionen jeweils incl. bzw. excl. Herstellung und Entsorgung unter der Annahme einer Fahrzeuglaufleistung von 168.000 km.

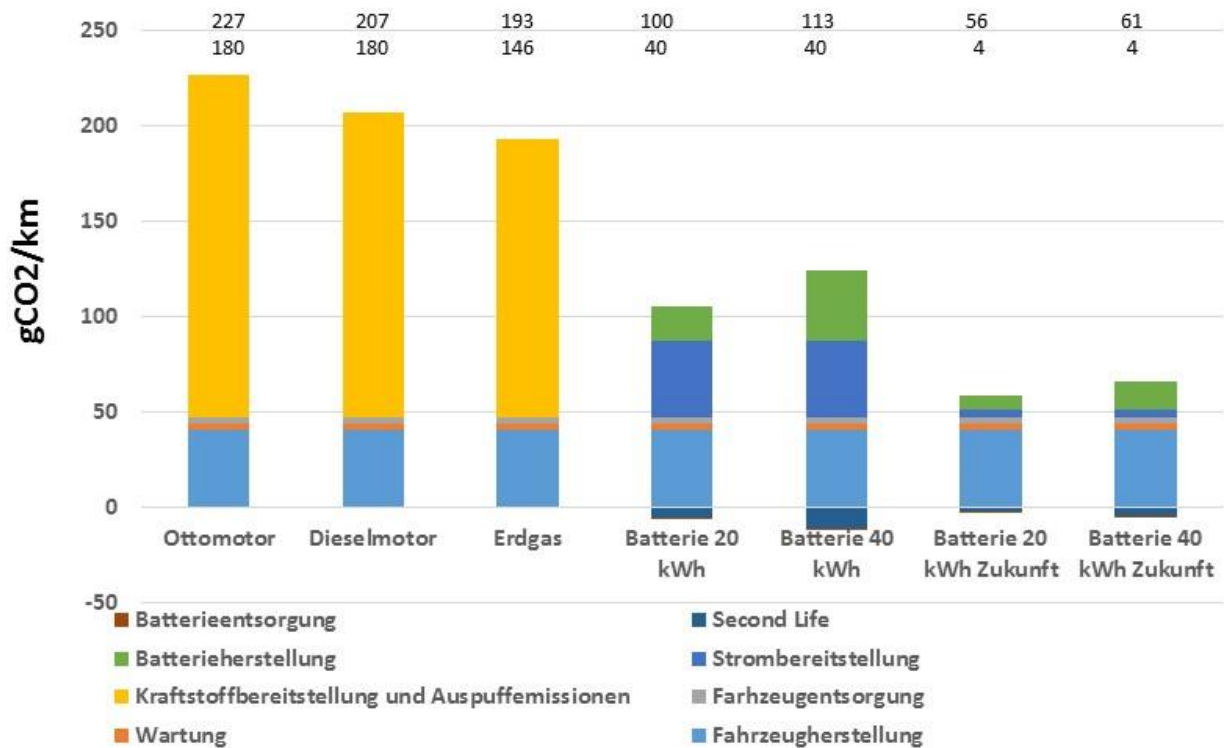
Tabelle 1: Treibhausgasemissionen verschiedener Antriebsarten

Antriebsart	Treibhausgasemissionen incl. Herstellung und Entsorgung gCO₂/km	Treibhausgasemissionen reiner Fahrbetrieb gCO₂/km
Ottomotor	227	180
Dieselmotor	207	160
Erdgasmotor	193	146
Elektroantrieb 20 kWh	100	40
Elektroantrieb 40kWh	113	40
Elektroantrieb 20 kWh Zukunfts-szenario	56	4
Elektroantrieb 40kWh Zukunfts-szenario	61	4

Quelle: Borderstep

Es wird deutlich, dass ein steigender Anteil erneuerbarer Energie im Stromnetz nicht nur die Treibhausgasemissionen aus dem Fahrbetrieb deutlich reduziert, sondern auch diejenigen aus der Herstellung. Die folgende Grafik vergleicht die aktuell in Ökobilanzen ausgewiesenen CO₂-Emissionen aus dem Betrieb von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor mit Elektrofahrzeugen, wie sie im europäischen Strommix 2030 betrieben werden sowie in einem Zukunftsszenario, in dem von fast vollständig dekarbonisierter Stromversorgung für Betrieb und auch die Batterieproduktion ausgegangen wird.

Abbildung 6: Treibhausgasemissionen verschiedener Fahrzeuge im Vergleich (Herstellung und Betrieb)



Quelle: Borderstep

In dieser Betrachtung wird deutlich, dass verschiedene Faktoren für die Beurteilung der ökologischen Vorteilhaftigkeit verschiedener Antriebsverfahren von Bedeutung sind:

Zum einen ist von hohem Einfluss, welcher Strommix der Untersuchung zu Grunde gelegt wird. Dieser Faktor würde sich bei der Bewertung des Wasserstoffantriebs aufgrund des ca. 2,5-mal so hohen Strombedarfs noch stärker auswirken.

Neben der Batteriegröße (Kapazität in kWh) ist auch die eingesetzte Batterietechnologie, der in der Batterieherstellung eingesetzte Strom (z.B. regenerativ oder nicht) und die Frage von Bedeutung, ob die Batterie nach der Nutzungsphase im Auto in einem „second life“ im Stromnetz eingesetzt wird.

Beim Vergleich mit Verbrennungsmotoren ist wiederum die Frage, ob Treibstoffverbrauch und CO₂-Emissionen den unrealistischen Herstellerangaben entnommen werden oder ob die realistischen, um ca. 40 % über dem NEFZ-Wert bzw. ca. 20 % über dem WLTP-Wert liegenden Realverbräuche zu Grunde gelegt werden.

3.1.2.2 Effizienzsteigernde Mechanismen von Industrie 4.0

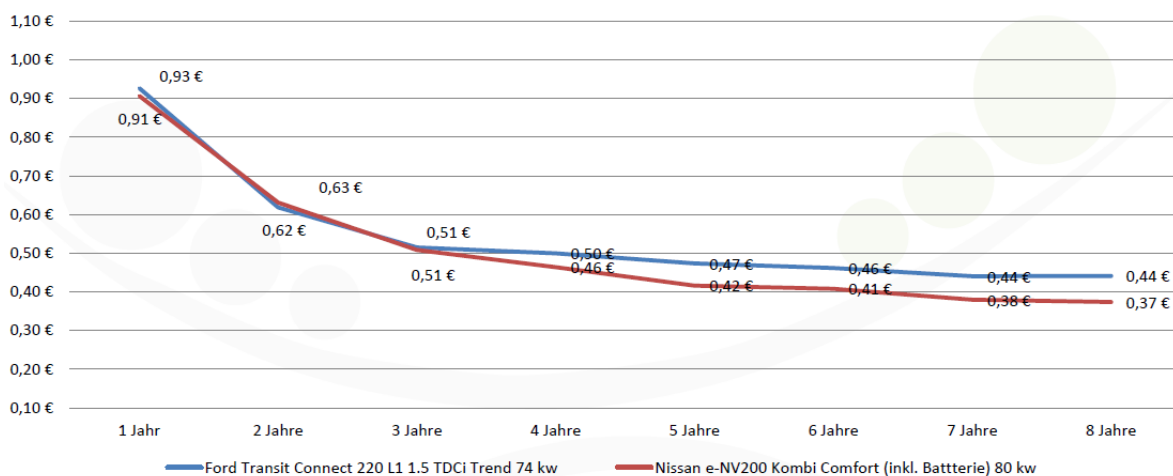
Gegenwärtig liegen keine Untersuchungen vor, die für den Fall des StreetScooter die Wirkung der in Kapitel 1 beschriebenen generellen effizienzsteigernden Mechanismen von Industrie 4.0 nachweisen würden. Es können daher hierzu an dieser Stelle keine Aussagen erfolgen.

3.1.3 Niedrige TCO als Treiber der Diffusion

Elektroautos gelten als preiswert in der Wartung. „Sie verursachen 60 bis 80 Prozent weniger Kosten für Wartung und Verschleiß gegenüber vergleichbaren konventionellen Fahrzeugen“ (Hebermehl, Of, Conrad & Harloff, 2018). Trotz des pro kWh hohen Strompreises sind auch die Treibstoffkosten geringer, weil einem Verbrauch von ca. 20 kWh Strom auf hundert km ein Verbrauch von 70 bis 80 kWh Energie aus Benzin oder Diesel gegenübersteht. Beklagt werden vielfach die - noch - hohen Anschaffungspreise. In der Vollkostenrechnung stellen sich verschiedene Elektro-PKW allerdings für den ADAC schon 2018 als „überraschend günstig“ dar (ADAC Fahrzeugtechnik, 2018).

Gillessen (2018) stellt einen TCO-Vergleich für einen Ford Transit mit Verbrennungsmotor und einen Nissan Elektrotransporter an, der in der Anschaffung nach Prämie von 4.000 € immer noch 1.000 € mehr als der Verbrenner kostet. Bei einem angenommenen Restwert des Ford mit Verbrennungsmotor von 17 % nach 8 Jahren Nutzungsdauer und von 9 % beim Nissan fällt das Ergebnis deutlich positiv für den Nissan aus:

Abbildung 7: km-Kosten bezogen auf Haltedauer



Quelle: Gillessen (2018, S. 9) bei einer Jahresfahrleistung von 11.000 km

Auch der ADAC errechnet beim Vergleich dieser Fahrzeuge für beide Varianten des Nissan (Batteriekauf und Batteriemiete) bei fünfjährigen Haltedauer und mit 15.000 Kilometern Jahresfahrleistung einen Kostenvorteil für den Elektro-Nissan in Höhe von 1 Cent/km bei Batteriemiete und in Höhe von 2,7 Cent/km bei Batteriekauf (Gille, 2018).

Der Kaufpreis des StreetScooter Work Box ist mit ca. 36.000 €⁷ zwar im Vergleich zu anderen Elektrotransportern wie dem deutlich größeren Volkswagen Crafter mit ca. 79.000 €⁸ günstig, im Vergleich

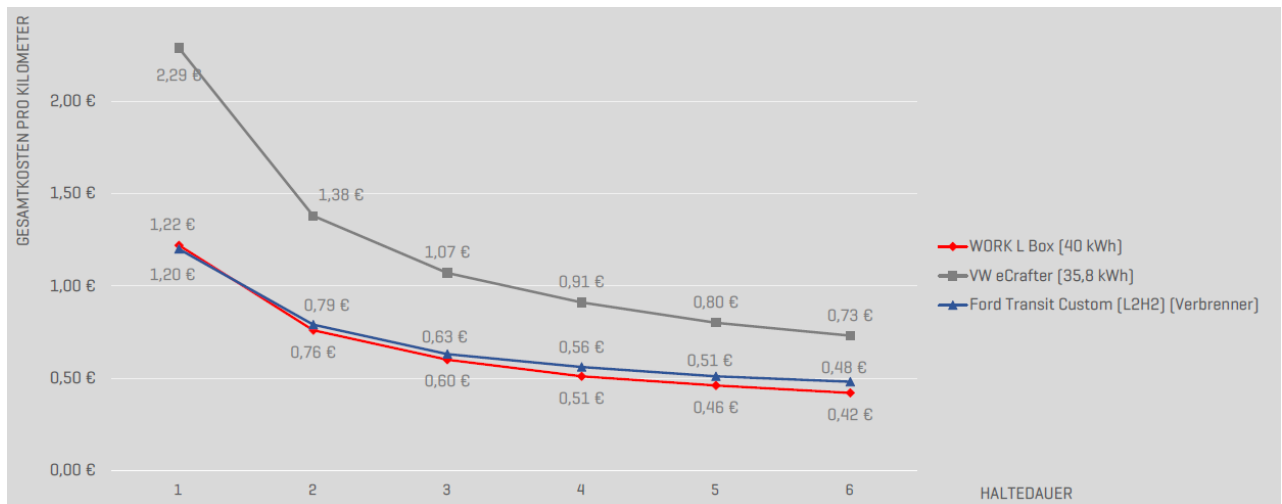
⁷ Vgl. <https://www.handwerk-magazin.de/transporter-mit-elektroantrieb/150/517/32100> vom 10.4.2019

⁸ Vgl. <https://www.adac.de/der-adac/motorwelt/reportagen-berichte/auto-innovation/elektro-transporter-vw-e-crafter/> vom 10.4.2019

zu gleichgroßen Transportern mit Verbrennungsmotor aber teurer. Der Ford Transit Custom wie auch der VW Transporter T6 sind für ca. 25.000 €⁹ zu haben (alle Preise ohne MwSt.).

Für den etwas teureren StreetScooter Work L mit 8 m³ Ladevolumen (41.450 € nach Prämie) errechnet StreetScooter bei 6 Jahren Haltedauer, 15.000 km jährlicher Laufleistung und einem Strompreis von 16 Cent/kWh sowohl im Vergleich zum Volkswagen eCrafter wie im Vergleich zum Ford Transit Custom mit Verbrenner Kostenvorteile für den StreetScooter (StreetScooter, 2019).

Abbildung 8: km-Kosten bezogen auf Haltedauer



Quelle: StreetScooter (2019)

Mit steigender Skalierung und zunehmenden Erfolgen bei der produktionsbegleitenden Kostensenkung dürfte daher die Wirtschaftlichkeit zum entscheidenden Treiber gewerblicher Elektromobilität werden. Sehr deutlich zeigt dies auch Gillesen (2018, S. 21) bei einem Vergleich zwischen Ford Fiesta und eGo Life, der zukünftig für Pflegedienste interessant sein könnte (eGo Mobile AG, 2017). Bei 11.000 km Jahresfahrleistung und 8 Jahren Haltedauer kommt der Fiesta auf 35 Cent/km, der eGo Life auf 27 Cent/km, was etwa um 23 % niedrigeren Kilometerkosten entspricht (Gillesen, 2018, S. 21).

Welche Auswirkungen dies alles auf die Verkaufszahlen haben wird, wird sich in einigen Jahren zeigen. Eine Reihe von Unsicherheiten spielt dabei eine Rolle:

- Sowohl die angenommene Reduktion von Wartungskosten als auch der angenommene Stromverbrauch sind mangels realer Betriebsdaten mit Unsicherheiten verbunden, wenn auch erste Berichte über langfristig extrem niedrige Wartungskosten für den schon länger im Einsatz befindlichen Tesla S auftauchen (Zachary, 2017).

⁹ Vgl. <https://www.handwerk-magazin.de/transporter-bis-28-tonnen-gesamtgewicht-im-vergleich/150/517/372537> vom 10.4.2019

- Der von Gillessen (2018, S. 9) für den Elektro-Nissan angenommene extrem niedrige Restwert ist ebenso ein Unsicherheitsfaktor. In Zukunft realisierte höhere Restwerte könnten sich positiv auf die erwarteten TCO auswirken.
- Ein Nachweis niedriger TCO dürfte sich bei Gewerbekunden stärker auswirken als bei Privatkunden, die sich traditionell eher an Kaufpreis und Liquidität als an der Wirtschaftlichkeit orientieren (Fichter & Clausen, 2013; Welsch & Kühling, 2009).

Volkswagen reagiert zunächst mit Blick auf den Privatkundenmarkt mit der Ankündigung, der Volkswagen ID solle zu einem Verkaufspreis ähnlich dem eines Golf Diesel in den Verkaufsräumen stehen¹⁰. Durch niedrigere Betriebs- und Wartungskosten wäre daher zu erwarten, dass sich der Volkswagen ID als deutlich wirtschaftlicher für die Kundschaft erweist.

Der Blick auf die Verkaufszahlen von Elektrotransportern hilft noch nicht viel weiter. Das Kraftfahrt-Bundesamt meldet zum 1.1.2018 nur 5.762, zum 1.1.2019 dann 9.954 zugelassene StreetScooter¹¹. Die Entwicklung ist daher im weiteren Verlauf des Projektes zu beobachten.

3.2 Serielles Sanieren

Mindestens 1,4 % Sanierungsrate sind notwendig, um die Klimaschutzziele der Bundesregierung zu erreichen, aber derzeit liegt die Sanierungsrate nur bei ca. 1 % (Deutsche Energie-Agentur GmbH, 2018, S. 15). Die langsame Entwicklung ist Folge dauerhaft niedriger Preise für fossile Brennstoffe, die in Kombination mit hohen Sanierungskosten zu einer schlechten Wirtschaftlichkeit von Sanierungsvorhaben führen. Die trotz fehlender Preissignale dennoch mögliche Einführung von Sanierungsverpflichtungen wird von starken Lobbys wie z.B. dem Bundesverband der Heizungsindustrie bisher erfolgreich verhindert und auch im Entwurf des Gebäudeenergiegesetzes befindet sich keine einschlägige Vorschrift, obwohl Deutschland durch die EU-Richtlinie 2009/28/EG seit 2014 zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen dazu verpflichtet ist, die Nutzung erneuerbarer Wärme auch bei der Sanierung von Altbauten vorzuschreiben (Europäisches Parlament und Rat, 2009, S. 33). Eine Umsetzung dieser Verpflichtung ist aber bisher nicht erfolgt. Im Entwurf des neuen Gebäudeenergiegesetzes stellt es § 52 den Bundesländern frei, ggf. entsprechende Vorschriften zu erlassen (Die Bundesregierung, 2018).

Angesichts der nicht nur in Deutschland schleppend vorangehenden energetischen Sanierung von Wohngebäuden entwickelte auf Initiative des niederländischen Umweltministeriums eine Gruppe aus Bau- und Wohnungsunternehmen ein auf Industrie 4.0 basierendes Sanierungskonzept, welches günstige Kosten mit hoher energetischer Qualität und aufgrund industrieller Vorfertigung kurzen Bauzeiten von ca. 10 Tagen verknüpft (Energiesprong, TNO & RIGO, 2015). Das „Energiesprong“ ge-

¹⁰ Vgl. https://www.volkswagenag.com/presence/investorrelation/publications/annual-media-conference/2019/reden_pr%C3%A4sentationen/Jahrespressekonferenz_2019_Reden_deutsch.pdf vom 11.4.2019.

¹¹ Vgl. https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/MarkenHersteller/marken_hersteller_node.html vom 11.4.2019.

nannte Konzept umfasst eine Reihe von Komponenten, die zusammen ein Null-Energie-Haus mit einer Leistungsgarantie von 30 Jahren realisierbar machen. Dies wird erreicht durch (Richter, 2018):

- eine industriell vorgefertigte Wärmedämmfassade, die eine Hülle um ein bestehendes Gebäude bildet,
- ein vollflächiges Solardach, das so bemessen ist, dass es so viel Energie erzeugt, wie die Immobilie verbraucht,
- eine Energiezentrale mit Luft-Wärmepumpe, elektrischer Steuerung und optionalen Batterien, die es dem Haus ermöglichen, Energiedienstleistungen für das Netz bereitzustellen.

Die Sanierung nach dem Energiesprung-Modell wird so finanziert, dass die Investitionskosten durch Energieeinsparungen und reduzierte Hauswartungskosten gedeckt werden. Das Sanierungsverfahren wurde mit Blick auf optisch oft weniger ansprechende Nachkriegs-Wohngebäude entwickelt, die durch die Sanierung trotz der hohen Standardisierung der Bauelemente häufig auch architektonisch an Attraktivität gewinnen.

Abbildung 9: Unsanierete und seriell sanierte Doppelhaushälfte



Quelle: Energiesprung, TNO & RIGO, (2015, S. 7)

3.2.1 Bedeutung von Industrie 4.0 für die serielle Sanierung

Die serielle Sanierung ist ein Produkt bzw. ein Geschäftsmodell, welches erst durch Industrie 4.0 überhaupt möglich geworden ist. Denn es gibt aufgrund der fast durchweg handwerklichen Erstellung des gesamten Gebäudebestandes keine zwei Gebäude, die EXAKT gleich sind. Zwar mag immer wieder eine größere Zahl von Gebäuden nach dem gleichen Bauplan errichtet worden sein, aber durch die menschliche Arbeit bei der Errichtung von Mauern ist es dennoch so, dass sich die Position

der Fenster, Türöffnungen u.a.m. von Gebäude zu Gebäude zwar wenig, aber etwas unterscheidet. Für das serielle Sanieren bedeutet dies, dass nur durch Losgröße Eins ein Produkt angeboten werden kann, welches für jeden Kunden eine passende Lösung realisiert. Der Prozess des seriellen Sanierens umfasst eine Reihe von Ablaufschritten (Energiesprong et al., 2015; Schmelcher, 2019, S. 18):

- Ein elektronisches Aufmaß durch einen 3D-Scan vermisst jedes Gebäude auf den Millimeter genau und dokumentiert dabei neben der Lage von Fenstern und Türen z.B. auch einen in der Dicke um wenige Millimeter schwankenden Putz.
- Die Daten werden in ein System des Building Information Management (BIM) übertragen. Mit Hilfe von Computer Aided Design werden die Einzelteile für jedes Gebäude effizient und schnell konstruiert und deren Kosten berechnet. In der Gruppe der für das Verfahren gut geeigneten Gebäude ist es so möglich, Aufmaß und Erstellung eines Angebotes innerhalb von 24 Stunden zu realisieren.
- Die Daten der Einzelteile werden nach Auftragserteilung in die vernetzte Fertigung übertragen und dort je nach Ausstattung der produzierenden Firmen teilweise unter Einsatz von automatischen Maschinen (CAM) von Produktionsrobotern hergestellt. In die Wandelemente werden Fenster, Türen und technische Teile wie z.B. Leitungen bereits in der Fabrik und unter optimalen Bedingungen passgerecht eingebaut. Die Dachelemente werden mit fertig montierten PV-Elementen geliefert.
- Die industriell vorgefertigten Teile werden auf der Baustelle innerhalb weniger Tage montiert. Ziel ist ein Abschluss der Vor-Ort-Arbeiten innerhalb von einer Woche.

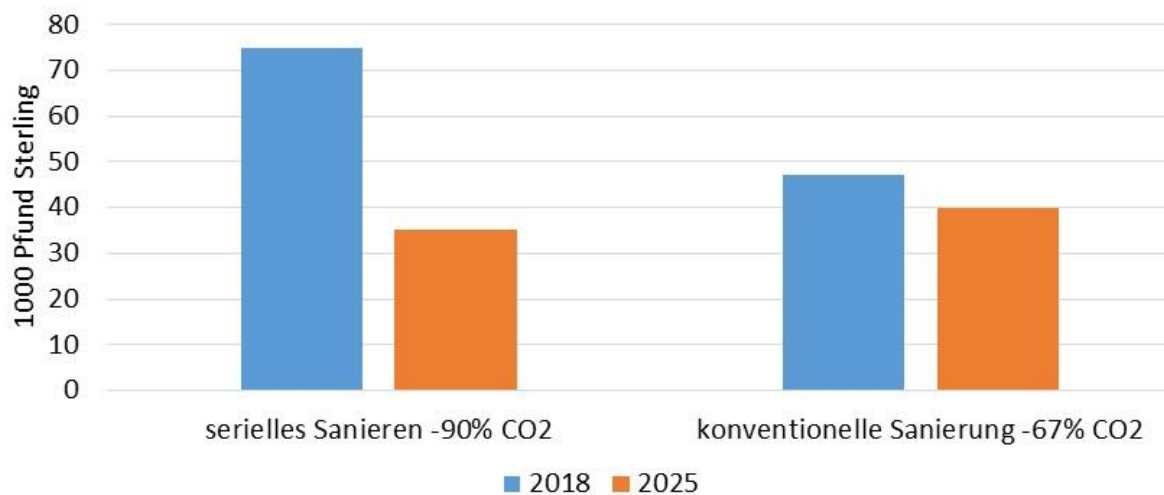
Seriell sanierte Objekte können mit einem Monitoring-System ausgerüstet werden, welches Energieerzeugung wie auch den Energieverbrauch dokumentiert.

3.2.2 Die Steigerung von Effizienz und Effektivität durch das serielle Sanieren

Die Weiterentwicklung der Gebäudesanierung durch das serielle Sanieren muss vor dem Hintergrund des Langfristziels eines komplett klimaneutralen Gebäudebestandes betrachtet werden. Da das serielle Sanieren noch ein neuartiger Ansatz für die Nachrüstung von Gebäuden ist, sind die Kosten derzeit noch höher als bei den üblichen inkrementellen Wärmesaniierungsverfahren. Durch die Sanierung nach dem Energiesprong-Konzept entsteht jedoch in nur einem Schritt ein Netto-Null-Energiehaus, das spätere Ausgaben für weitere Effizienzmaßnahmen unnötig macht.

Da der Energiesprong-Ansatz im Gegensatz zu handwerklichen Sanierungsverfahren wie z.B. dem Wärmedämm-Verbundsystem industriell skaliert werden kann, sind mittelfristig erhebliche Skaleneffekte zu erwarten.

Abbildung 10: Potenzielle Kostensenkungen, seriell versus konventionelles Sanieren



Quelle: Green Alliance (2019, S. 11)

Mit Blick auf das Ziel eines klimaneutralen Gebäudebestandes ist das serielle Sanieren damit:

- erstens effektiv, weil es dieses Ziel in nur einem Sanierungsschritt mit der Umsetzung nur einer wenn auch komplexen Maßnahmenkombination erreicht,
- zweitens effizient, weil perspektivisch erwartet wird, dass das sehr effektive serielle Sanieren zusätzlich nicht nur kosteneffizienter ist als die konventionelle Wärmesanieung, sondern sogar zu absolut niedrigeren Kosten anzubieten sein wird.

Die Beurteilung des seriellen Sanierens aus Sicht der Klimapolitik ist damit aber davon abhängig, ob der erwartete Effekt auf die Energiebilanz der Gebäude wie auch die erwartete Kostensenkung eintritt. Nun ist das serielle Sanieren zwar neu, aber nicht ganz neu. Es liegen also schon einige Erkenntnisse aus der Evaluation erster Gebäude vor.

3.2.2.1 Energetische Ergebnisse des seriellen Sanierens

Aus zwei Projekten in Tilburg (Daten für 10 Wohnungen) (Energiesprong, TNO & RIGO, 2017) und Heerhugowaard (Daten für 46 Wohnungen) (Energiesprong, TNO & RIGO, 2016) liegen Evaluationsdaten zum Energieverbrauch vor. Der Untersuchungszeitraum in Tilburg umfasst die Zeit von Juli 2015 bis März 2016 und wurde auf ein ganzes Jahr hochgerechnet, in Heerhugowaard umfassen die Daten das Jahr 2015, wobei zeitweise Daten fehlen und auf ein ganzes Jahr hochgerechnet wurde.

Tabelle 2: Evaluationsdaten zum Energieverbrauch

	Ø Stromverbrauch Projekt Tilburg in kWh	Ø Stromverbrauch Projekt Heerhugowaard in kWh
Wärmepumpe	1.038	1.719
Warmwasser	952	1.290
Belüftung	514	475
Kühlung	89	0
Pauschale für Haushaltsstrom und Kochen	2.750	2.500
Gesamtverbrauch	5.343	5.984
Ertrag PV-Anlage	5.903	5.984
Überschuss	560	0

Quelle: Borderstep mit Daten aus (Energiesprong et al., 2016, 2017)

Umgerechnet auf ein „Normjahr“ ergibt sich in Tilburg ein leichter Mehrverbrauch, in Heerhugowaard ein kleiner Netto-Überschuss (Energiesprong, 2018).

Insgesamt liegen Energiesprong weitere Evaluationsergebnisse für 613 Wohnungen und Energiedaten über ein Jahr für 154 Wohnungen vor (Energiesprong, 2018). Die Überwachungsergebnisse zeigen insgesamt, dass der Netto-Null Energieverbrauch den Design- und Leistungsspezifikationen entspricht, was bedeutet, dass in der Praxis die sanierten Gebäude gemäß den Vereinbarungen in der Leistungsgarantie funktionieren. Der Verbrauch von Raumwärme ist für die niederländischen Haushalte im Durchschnitt genau wie die solare Energieerzeugung etwas höher als erwartet (Energiesprong, 2018).

Energiesprong (2018) berichtet auch von einigen Problemen in seinen Projekten. So war z.B. in einigen Projekten eine unzureichende Luftdichtigkeit festzustellen. Durch das Monitoring wurden solche Probleme rasch erkannt und konnten in Folgeprojekten vermieden werden. Das Verhalten der Mieter zeigt sich wenig überraschend als unterschiedlich. Während viele mit der Strompauschale gut auskommen ist bei anderen ein Mehrverbrauch zu verzeichnen, so dass Nachzahlungen erfolgen müssen (Energiesprong et al., 2016, 2017).

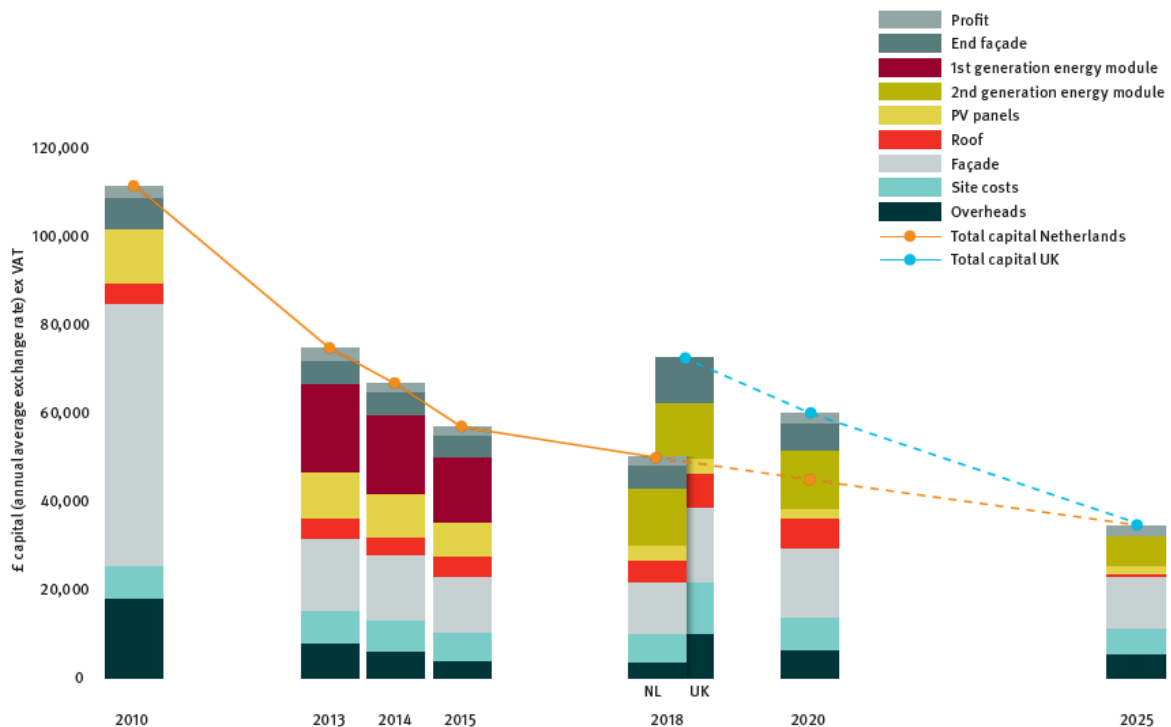
Insgesamt hat das Energiesprong-Verfahren das Problem aller Kombinationen von PV und Wärmepumpe: Während die Stromerzeugung primär im Sommer erfolgt, konzentriert sich der Verbrauch in der kalten Jahreszeit. Ein hoher Anteil in dieser Form ausgestatteter Gebäude stellt insoweit eine Herausforderung für das Stromnetz dar.

Während die befragten Mieter mit dem Ergebnis der Sanierung insgesamt zufrieden waren, gab es am Ablauf des Planungs- und Realisierungsprozesses Kritik (Energiesprong, 2018). Durch verstärkte Kommunikation mit den Mietern reagierten die beteiligten Unternehmen auf diese Erfahrungen.

3.2.2.2 Ergebnisse der Kostensenkung durch das serielle Sanieren

Die konstruktive Optimierung des Verfahrens wie auch erste Skaleneffekte in den Niederlanden haben die Kosten für die serielle Sanierung nach dem Energiesprong-Verfahren in sieben Jahren seit 2010 das erste Projekt realisiert wurde fast halbiert. Ein Teil dieser Reduzierung hat sich bereits auf Großbritannien ausgewirkt: Die ersten Energiesprong-Anlagen in Nottingham kosten rund 75.000 Pfund Sterling pro Haus, verglichen mit rund 110.000 Pfund Sterling pro Haus in den Niederlanden im Jahr 2010 (Green Alliance, 2019, S. 15).

Abbildung 11: Bisherige und bis 2025 erwartete Kostensenkungen des seriellen Sanierens



Quelle: Green Alliance (2019, S. 15)

Effizienz ist im Kontext der Sanierung nicht nur wesentlich, um die Kosten der Sanierung des gesamten Gebäudebestandes bis 2050 in einem finanzierbaren Kostenrahmen abschließen zu können. Effizienz ist zusätzlich von Bedeutung, um die notwendigen umfangreichen Arbeiten mit dem knappen vorhandenen Personal überhaupt erbringen zu können. „Die Arbeitskräfte-reserven auf dem deutschen Bauarbeitsmarkt sind weitgehend ausgeschöpft: Die Zahl der arbeitslosen Baufacharbeiter erreichte 2015 ein historisches Tief“ (Hauptverband der Deutschen Bauindustrie e.V., 2017, S. 30). Durch den erhöhten Industrialisierungsgrad ist beim seriellen Sanieren wahrscheinlich, dass der Bedarf an gelernten Fachkräften tendenziell geringer ist. Es kann also die begründete Vermutung aufgestellt werden, dass die Verbreitung des seriellen Sanierens sich auf die Arbeitskräfteknappheit im Baugewerbe entlastend auswirken könnte.

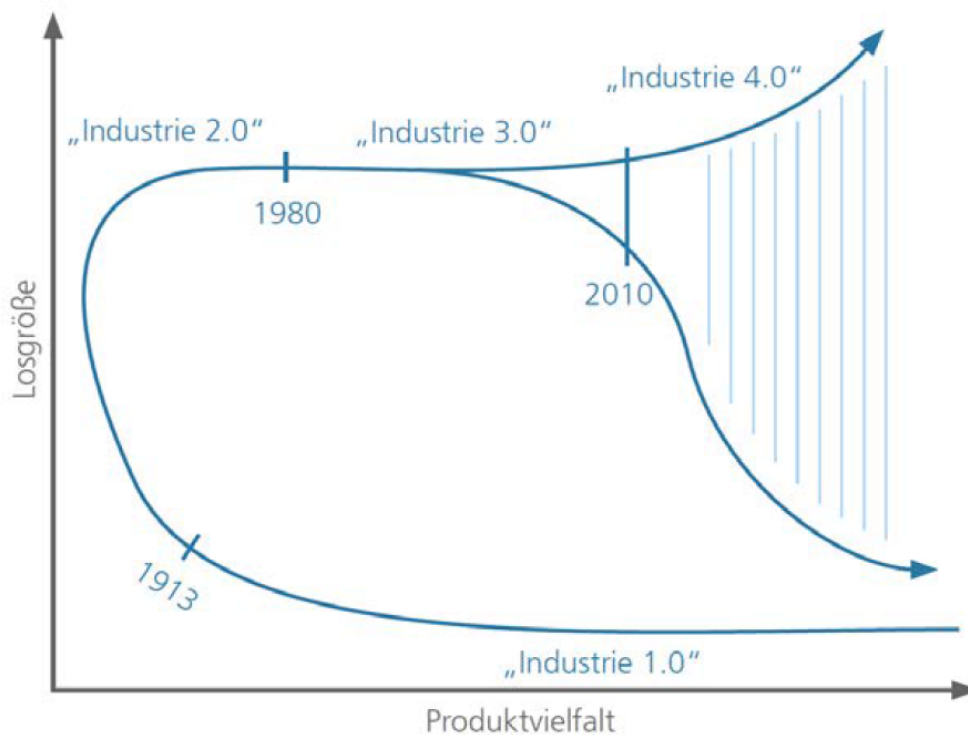
3.2.3 Diffusion des seriellen Sanierens

Nach dem ersten Pilotprojekt in 2010 sind seither in den Niederlanden nach Angabe von Energiesprong (2019) 5.000 Objekte saniert bzw. nach demselben Prinzip als Netto-Null Häuser neu gebaut worden. Darüber hinaus befinden sich 14.400 Gebäude in Planung. In Frankreich wurden 24 Gebäude saniert und 6.550 befinden sich in Planung, In England sind es 10 sanierte und 225 geplante Gebäude, in Deutschland sind 10 und in Italien 5 geplant. Durch die Verbreitung auf mehrere große europäische Staaten wächst die Hoffnung, dass weitere Skalierungseffekte erschlossen werden können.

4 Fazit

In beiden Fallbeispielen ist die Auswirkung von Industrie 4.0 deutlich zu erkennen. Während das serielle Sanieren dabei auf der Möglichkeit der industriellen Produktion von Losgröße Eins basiert und viele andere Möglichkeiten von der Konstruktion bis zu digitalisierter Produktion und Monitoring nutzt, liegt der Schwerpunkt beim StreetScooter und beim eGo Life sowohl auf Konstruktion und Entwicklung im dezentralen Team wie auch auf einer hochmodernen, vernetzten Produktion, die flexibel und kostengünstig ist (Vodafone Deutschland, 2019).

Abbildung 12: Paradigmatischer Wandel der Produktionssysteme



Quelle: Buchholz, Ferdinand, Gieschen & Seidel (2017, S. 7)

Für beide Beispiele konnte abgeschätzt werden, dass die so entstandenen Produkte einen deutlichen Beitrag zum Klimaschutz leisten und ihre rasche Diffusion daher aus der Perspektive des Klimaschutzes wünschenswert ist.

In beiden Beispielen gibt es eine aussichtsreiche Perspektive, dass durch Industrie 4.0 Anwendungen optimierte und vergleichsweise wettbewerbsfähige Produkte entstanden sind, deren Diffusion in den jeweiligen Märkten als wahrscheinlich gelten kann. Für die weiteren Schritte des AP 3.4 ergibt sich zunächst die zentrale Frage, auf welche Produkte oder Produktgruppen diese Erkenntnisse übertragbar sind.

5 Quellen

- ADAC. (2019, August 26). Klima-Studie: Elektroautos brauchen die Energiewende. ADAC. Zugriff am 2.9.2019. Verfügbar unter: <https://www.adac.de/verkehr/tanken-kraftstoff-antrieb/alternative-antriebe/co2-treibhausgasbilanz-studie/>
- ADAC Fahrzeugtechnik. (2018). *Was kosten die neuen Antriebsformen? Kostenvergleich E-Fahrzeuge + Plug-In Hybride gegen Benziner und Diesel*. München. Zugriff am 5.11.2018. Verfügbar unter: https://www.adac.de/_mmm/pdf/E-AutosVergleich_260562.pdf
- Buchal, C., Karl, H.-D. & Sinn, Ha.-W. (2019). Kohlemotoren, Windmotoren und Dieselmotoren: Was zeigt die CO₂-Bilanz? *ifo-Schnelldienst*, 72, 3–17.
- Buchholz, B., Ferdinand, J.-P., Gieschen, J.-H. & Seidel, J. (2017). *Digitalisierung industrieller Wertschöpfung Transformationsansätze für KMU*. Berlin. Zugriff am 3.4.2019. Verfügbar unter: https://vdivde-it.de/sites/default/files/document/Digitalisierung-industrieller-Wertschoepfung_0.pdf
- Bundesministerium für Bildung und Forschung. (2018). *Forschung und Innovation für die Menschen: Die Hightech-Strategie 2025*. Berlin. Zugriff am 21.9.2018. Verfügbar unter: <https://www.hightech-strategie.de/>
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU). (2019). *Wie klimafreundlich sind Elektroautos?*. Berlin. Zugriff am 5.4.2019. Verfügbar unter: https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Verkehr/emob_klimabilanz_2017_bf.pdf
- Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. (2019). *Industrie 4.0 Fortschrittsbericht 2019*. Berlin.
- Clausen, J. (2017). *Der Post-Streetscooter. Fallstudie im Rahmen des Projekts Evolution2Green – Transformationspfade zu einer Green Economy*. Berlin: Borderstep Institut für Innovation und Nachhaltigkeit. Zugriff am 28.3.2017. Verfügbar unter: https://evolution2green.de/sites/evolution2green.de/files/documents/2017-03-e2g-emobility_streetscooter_borderstep.pdf
- Clausen, J. & Fichter, K. (2019). *Governance radikaler Umweltinnovationen: Theoretische Grundlagen und Forschungskonzeption*. Berlin: Borderstep Institut.
- Commission européenne & Direction générale de la mobilité et des transports. (2016). *EU energy, transport and GHG emissions: trends to 2050 : reference scenario 2016*. Luxembourg: Office for official publications of the european communities.
- Deutsche Energie-Agentur GmbH. (2018). *dena-Gebäudereport Kompakt 2018. Statistiken und Analysen zur Energieeffizienz im Gebäudebestand*. Berlin. Zugriff am 17.4.2019. Verfügbar unter: https://shop.dena.de/fileadmin/denashop/media/Downloads_Dateien/bau/9254_Gebaeudereport_dena_kompakt_2018.pdf
- Die Bundesregierung. (2018). *Gesetzentwurf der Bundesregierung: Gesetz zur Vereinheitlichung des Energieeinsparrechts für Gebäude*. Berlin. Zugriff am 20.3.2019. Verfügbar unter: http://www.oekozentrum-nrw.de/fileadmin/Medienablage/PDF-Dokumente/181101_GEG-Entwurf.pdf
- eGo Mobile AG. (2017, November 14). Caritas-Verbände steigen auf Elektroautos von e.GO Mobile um. Zugriff am 14.11.2017. Verfügbar unter: <http://e-go-mobile.com/de/aktuelles/>
- Ellingsen, L. A.-W., Hung, C. R. & Strømman, A. H. (2017). Identifying key assumptions and differences in life cycle assessment studies of lithium-ion traction batteries with focus on greenhouse gas

- emissions. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 55, 82–90.
<https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.06.028>
- Ellingsen, L. A.-W., Majeau-Bettez, G., Singh, B., Srivastava, A. K., Valøen, L. O. & Strømman, A. H. (2014). Life Cycle Assessment of a Lithium-Ion Battery Vehicle Pack: LCA of a Li-Ion Battery Vehicle Pack. *Journal of Industrial Ecology*, 18(1), 113–124.
<https://doi.org/10.1111/jiec.12072>
- Energiesprong. (2018). *Energiesprong works! Net zero energy homes put to the test both on technical performance and customer satisfaction*. Den Haag. Zugriff am 17.4.2019. Verfügbar unter: http://transition-zero.eu/wp-content/uploads/2018/06/Energiesprong-works_DEF.pdf
- Energiesprong. (2019). Energiesprong. Zugriff am 17.4.2019. Verfügbar unter: <https://energiesprong.org/>
- Energiesprong, TNO & RIGO. (2015). *Transition Zero*. Den Haag. Zugriff am 17.4.2019. Verfügbar unter: https://energiesprong.org/wp-content/uploads/2017/04/EnergieSprong_UK-Transition_Zero_document.pdf
- Energiesprong, TNO & RIGO. (2016). *Bewonerservaringen en meetresultaten uit nul op de meter woningen in Heerhugowaard*. Den Haag. Verfügbar unter: <https://www.energielinq.nl/wp-content/uploads/2016/08/MonitoringsresultatenHeerhugowaard-1464682248.pdf>
- Energiesprong, TNO & RIGO. (2017). *Bewonerservaringen en meetresultaten uit nul op de meter woningen in Tilburg*. Den Haag. Zugriff am 17.4.2019. Verfügbar unter: <https://www.energielinq.nl/wp-content/uploads/2017/02/Tilburg-2.pdf>
- Fichter, K. & Clausen, J. (2013). *Erfolg und Scheitern „grüner“ Innovationen*. Marburg: Metropolis.
- Ford, H. (1923). *Mein Leben und Werk*. Leipzig: Paul List Verlag.
- Future Mag. (2016). Future Lab Aachen – StreetScooter – wie alles anfang. Zugriff am 3.2.2017. Verfügbar unter: <http://www.futurelab-aachen.de/streetscooter-wie-alles-begann/>
- Gille, D. (2018). Lust auf Zukunft? *Norddeutsches Handwerk | Niedersachsen*.
- Gillessen, V. (2018, März 6). Grundlagen der Elektromobilität für Unternehmen. Mobilität neu denken. Gehalten auf der E-Mobilität in Unternehmen und Gewerbe, Wuppertal. Zugriff am 8.3.2019. Verfügbar unter: https://www.lee-nrw.de/wp-content/uploads/2015/10/180306-Grundlagen-der-Elektromobilit%C3%A4t_EcoLibro.pdf
- Gotsch, M. (2016). *Materialband 11: Nutzenverkauf in der Industrie. Umweltinnovationen und ihre Diffusion als Treiber der Green Economy*. Berlin. Zugriff am 24.8.2017. Verfügbar unter: https://www.borderstep.de/wp-content/uploads/2016/08/11_UBA-Materialband-Nutzenverkauf-PUB_final-2.pdf
- Green Alliance. (2019). *Reinventing retrofit. How to scale up home energy efficiency in the UK*. London. Zugriff am 17.4.2019. Verfügbar unter: https://www.green-alliance.org.uk/reinventing_retrofit.php
- Hajek, S. (2019, April 19). Was Hans-Werner Sinn bei seiner Elektroauto-Studie übersehen hat. *Wirtschaftswoche*.
- Hall, D. & Lutsey, N. (2018). *Effects of battery manufacturing on electric vehicle life-cycle greenhouse gas emissions*. Beijing, Berlin, Brussels.

- Hauptverband der Deutschen Bauindustrie e.V. (2017). *Bauwirtschaft im Zahlenbild. Ausgabe 2017*. Berlin. Zugriff am 17.4.2019. Verfügbar unter: https://www.bauindustrie.de/media/documents/BW_Zahlenbild_2017_final.pdf
- Hebermehl, G., Of, A., Conrad, B. & Harloff, T. (2018, Oktober 11). Bosch vermietet Streetscooter an Baumärkten. *auto,motor,sport*. Zugriff am 10.4.2018. Verfügbar unter: <https://www.auto-motor-und-sport.de/news/bosch-vermietet-streetscooter-an-baumaerkten/>
- Helmers, E. & Weiss, M. (2017). Advances and critical aspects in the life-cycle assessment of battery electric cars. *Energy and Emission Control Technologies, Volume 5*, 1–18. <https://doi.org/10.2147/EECT.S60408>
- Hintemann, R. & Hinterholzer, S. (2018). *Smarte Rahmenbedingungen für Energie- und Ressourceneinsparungen bei vernetzten Haushaltsprodukten Kurzstudie im Auftrag des Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland e.V. (BUND)*. Berlin. Zugriff am 11.4.2019. Verfügbar unter: https://www.borderstep.de/wp-content/uploads/2018/07/energiewende_studie_vernetzte_produkte.pdf
- ICCT & TNO. (2017). *From laboratory to road: A 2017 update*. Beijing, Berlin, Brussels. Zugriff am 20.12.2018. Verfügbar unter: <https://www.theicct.org/publications/laboratory-road-2017-update>
- ICCT, TNO, IFEU & Sidekick. (2013). *From Laboratory to Road: A Comparison of official and real-world fuel consumption and CO2 values for cars in the EU and US*. Washington D.C. Zugriff am 10.6.2015. Verfügbar unter: http://www.theicct.org/sites/default/files/publications/ICCT_LabToRoad_20130527.pdf
- Kampker, A. (2015, Mai 4). CO2-freie Zustellung. Perspektive Elektromobilität bei der Deutschen Post AG. Gehalten auf der E-Mobility Summit, Berlin. Zugriff am 3.2.2017. Verfügbar unter: http://www.emobility-summit.de/system/images/707/original/Pr%C3%A4sentation_DHL__Prof._Dr._Achim_Kampker.pdf
- Kraftfahrt-Bundesamt. (2017). Neuzulassungen im Jahr 2016 nach Motorisierung. Zugriff am 7.4.2019. Verfügbar unter: https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Neuzulassungen/Motorisierung/2016/2016_motorisierung_node.html
- Krüger, W. (2017). *Digitalisierung und Industrie 4.0 - Herausforderung für den Mittelstand*. Bielefeld. Zugriff am 3.4.2019. Verfügbar unter: https://www.fh-mittelstand.de/fileadmin/pdf/Schriftenreihe/Heft_8.pdf
- Meier, B. F. (2018, Juni 19). Streetscooter: Produktion fix und flexibel. *edison/handelsblatt*. Zugriff am 8.4.2019. Verfügbar unter: <https://edison.handelsblatt.com/erleben/streetscooter-produktion-fix-und-flexibel/22705262.html>
- Messagie, M. (2017). *Life Cycle Analysis of the Climate Impact of Electric Vehicles*. brüssel.
- Nordelöf, A., Messagie, M., Tillman, A.-M., Ljunggren Söderman, M. & Van Mierlo, J. (2014). Environmental impacts of hybrid, plug-in hybrid, and battery electric vehicles—what can we learn from life cycle assessment? *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 19(11), 1866–1890. <https://doi.org/10.1007/s11367-014-0788-0>
- Peters, J. F., Baumann, M., Zimmermann, B., Braun, J. & Weil, M. (2017). The environmental impact of Li-Ion batteries and the role of key parameters – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 67, 491–506. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.08.039>

- Reid, G. & Julve, J. (2016). *Second life-batteries as flexible storage for renewable energies*. Berlin. Zugriff am 5.4.2019. Verfügbar unter: https://www.bee-ev.de/fileadmin/Publikationen/Studien/201604_Second_Life-Batterien_als_flexible_Speicher.pdf
- Richa, K. (2016). *Sustainable management of lithium-ion batteries after use in electric vehicles*. Rochester. Zugriff am 5.4.2019. Verfügbar unter: <https://scholarworks.rit.edu/cgi/viewcontent.cgi?referer=https://www.google.de/&httpsredir=1&article=10463&context=theses>
- Richter, C. (2018, Dezember 11). EnergieSprong Deutschland. Sanierung mit E = 0.
- Romare, M. & Dahlöf, L. (2017). *The life cycle energy consumption and greenhouse gas emissions from Lithium-Ion batteries*. Stockholm. Zugriff am 5.4.2019. Verfügbar unter: <https://www.ivl.se/download/18.5922281715bdaebede9559/1496046218976/C243+The+life+cycle+energy+consumption+and+CO2+emissions+from+lithium+ion+batteries+.pdf>
- RWTH Aachen Campus. (2016, Juni 23). e.GO Life – Bezahlbares Elektroauto durch Industrie 4.0.
- Schebeck, L. (2018, 20.3). Ressourceneffizienz durch Industrie 4.0 – Potenziale für kleine und mittlere Unternehmen (KMU) des verarbeitenden Gewerbes. In: , 19.-20.März 2018, Berlin. Gehalten auf der Berliner Recycling- und Rohstoffkonferenz, Berlin. Zugriff am 3.4.3019. Verfügbar unter: http://www.vivis.de/phocadownload/Download/2018_rur/2018_RuR_065-078_Schebeck.pdf
- Schmelcher, S. (2019, September 14). Energiesprong Deutschland. Serielles Sanieren Hannover, 14.09.2017. Gehalten auf der Regionales Meeting zum seriellen Sanieren in Hannover, Hannover.
- Schuh, G. (2017, März 20). Cut the Loop: Digital ERP Strategy. Gehalten auf der CeBIT 2017, Hannover.
- Schwarz, E. & Gerstl, T. (2018, Juni 8). Transporter bis 2,8 Tonnen Gesamtgewicht im Vergleich. Zugriff am 7.4.2019. Verfügbar unter: <https://www.handwerk-magazin.de/transporter-bis-28-tonnen-gesamtgewicht-im-vergleich/150/517/372537>
- Schwierz, P. (2019, April 20). Experten entlarven Elektroauto-„Studie“ von Hans-Werner Sinn als unwissenschaftliche Meinungsmache. *electrive.net*. Zugriff am 2.9.2019. Verfügbar unter: <https://www.electrive.net/2019/04/20/experten-entlarven-elektroauto-studie-von-hans-werner-sinn-als-unwissenschaftliche-meinungsmache/>
- Spritmonitor.de. (2019). Informationen zur Berechnung des CO2-Ausstoßes. *Spritmonitor*. Zugriff am 18.4.2019. Verfügbar unter: https://www.spritmonitor.de/de/berechnung_co2_ausstoss.html
- Staufen AG & Staufen Digital Neonex. (2018). *Deutscher Industrie 4.0 Index 2018*. Köngen und Stuttgart. Zugriff am 11.4.2019. Verfügbar unter: <https://www.staufen.ag/fileadmin/HQ/02-Company/05-Media/2-Studies/STAUFEN.-Studie-Industrie-4.0-Index-2018-Web-DE-de.pdf>
- strategy& & PricewaterhouseCoopers. (2014). *Industrie 4.0: Chancen und Herausforderungen der vierten industriellen Revolution*. Frankfurt und München.
- StreetScooter. (2018). *Technische Daten Streetscooter*. Aachen. Zugriff am 7.4.2019. Verfügbar unter: <https://www.streetscooter.eu/wp-content/uploads/2018/09/technische-daten.pdf>
- StreetScooter. (2019). *StreetScooter – Total Cost of Ownership*. Aachen.

- Transport & Environment. (2018). *CO2- Emissions from cars. The facts*. Brüssel. Zugriff am 20.12.2018. Verfügbar unter: https://www.vcd.org/fileadmin/user_upload/Redaktion/Themen/Auto_Umwelt/CO2-Grenzwert/2018_04_CO2_emissions_cars_The_facts_report_final.pdf
- Umweltbundesamt (Hrsg.). (2016). *Weiterentwicklung und vertiefte Analyse der Umweltbilanz von Elektrofahrzeugen*. Dessau-Roßlau. Zugriff am 23.6.2017. Verfügbar unter: http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte_27_2016_umweltbilanz_von_elektrofahrzeugen.pdf
- Vodafone Deutschland. (2019, Juni 27). Anzeige: Wie 5G-Technologien die Industrie 4.0 revolutionieren. *Die Zeit*, S. 23.
- Welsch, H. & Kühling, J. (2009). Determinants of pro-environmental consumption: The role of reference groups and routine behavior. *Ecological Economics*, 69(1), 166–176.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2009.08.009>
- Zachary, S. (2017, September 5). \$10,492 Tesla Model S Maintenance Costs After 300,000 Miles, \$0 Charging. Zugriff am 11.4.2019. Verfügbar unter: <https://cleantech-nica.com/2017/09/05/10492-tesla-model-s-maintenance-charging-costs-300000-miles/>