

Box 1, S. 6) wird deutlich, was solche Maßnahmen zu berücksichtigen hätten.

Raumwirksame Governance

Da der von den Systemen sowie den Mobilitätssubjekten beanspruchter Raum physisch begrenzt und örtlich gebunden ist, kann Mobilität nur bedingt durch Märkte erbracht werden, zumal die Ressourcen nicht wirklich austauschbar sind und verkehrspolitische Ziele nicht allein ökonomischen Kriterien unterliegen. Dies wird beispielsweise erkennbar an der unterschiedlichen Ausstattung von urbanen und ländlichen Räumen mit Mobilitäts- und digitalen Infrastrukturen, welche in Wechselwirkung individuelle Handlungsoptionen und Raumstrukturen beeinflussen.

Eine Sozial Robuste Orientierung erscheint nur möglich, wenn es im Prozess des sozialen und technischen Wandels gelingt, die verschiedenen Perspektiven und Visionen der beteiligten Akteure in ein produktives Zusammenspiel guter Governance zu bringen. Die daraus resultierenden Maßnahmen, die nicht nur einen geeigneten Umgang mit Unseens oder Reboundeffekten ermöglichen, sondern diese im Prozess der Entwicklung neuer Technologien, wie der Digitalisierung der Mobilitätsformen und -arten, rechtzeitig aufdecken, sind im Detail so vielfältig denkbar, dass eine Aufzählung der

Möglichkeiten den Rahmen jedes Weißbuches sprengen würde.

Gleichwohl lassen sich einige Grundbedingungen beschreiben, ohne die ein produktives Zusammenspiel und ein Ausgleich der Perspektiven nicht möglich erscheint. Eine völlige Liberalisierung und Handlungsfreiheit der Akteure in den einzelnen Teilsystemen wäre weder zielführend noch vorstellbar, ebenso wenig wie der Versuch einer durchgängigen Regulierung aller denkbaren Sach- und Tatbestände auf lokaler, nationaler oder internationaler Ebene zum Scheitern verurteilt scheint.

Selbst wenn man annimmt, das eine gewisse Ausgewogenheit zwischen wirtschaftlichen Einzelinteressen und öffentlichen Gesamtinteresse sich in Gesetzen und Verordnungen regulieren ließen, so blieben die anderen Teilsysteme mehr oder weniger außen vor und das für eine sozial robuste orientierte Entwicklung des Raum-Mobilitätsverhältnisses bliebe gestört, das notwendige, ausgewogen Zusammenspiel käme nicht zustande.

Digitale Mobilität bedarf, wie von Ostrom et al. (1999) hinlänglich beschrieben, eines Frameworks verlässlicher Aushandlungsmechanismen für Raumnutzung und soziale Opportunitäten für die unmittelbar und mittelbar beteiligten Akteure.

Begründung für die sozial robuste Orientierung

SoRO 1.3 Mobilität und Raum: Starke Wechselwirkungen zwischen digitalisierten Mobilitätssystemen und räumlichen Entwicklungen im Mikro- und Makromaßstab sind evident. Digitale Mobilität beansprucht physisch Raum und verändert gleichzeitig Raumwiderstand, Mobilitätsmuster sowie soziale Strukturen. Für eine stark nachhaltige Entwicklung digitaler Mobilität ist Digitalisierung nicht primär als Technologie voranzutreiben, sondern auf individuell-soziale und gesellschaftliche Anforderungen und die Folgen im systemischen Zusammenhang von Raum, Umwelt und Gesellschaft einzugehen und sozialrobuste Lösungen dabei zu präferieren.

(siehe Weißbuchlink Hinweis in SoRO-Box SI1.1)

Da sich Räume in ihrem Wechselspiel zur Mobilität sozialgeografisch mannigfach unter-

scheiden, bedarf es einer entsprechend regionalen oder lokalen Governance-Struktur als gleichsam drittes Element zwischen Einzelinteressen in den einzelnen Teilsystemen und dem gesellschaftlichen bzw. staatlich vermittelten Gesamtinteresse. Eine solche Governancestruktur, die über alle Ebenen – Einzelinteresse, regionales und lokales Interesse, gesamtgesellschaftliches Interesse – vermittelt, ist bislang nur rudimentär entwickelt. Auf diesen Mangel hat auch Elinor Ostrom (1999, 2009) mit ihren empirischen Studien zum Commons Management verwiesen und deswegen den Allmendegedanken für die Entwicklung einer sozial-robusten Governancestruktur im

Ressourcenmanagement als unverzichtbar rekapituliert.

Rechtliche Voraussetzungen müssen mit Priorität geklärt werden und realitätsgerecht sein. Politische Zielvorstellungen auf Projektebene wie in landesplanerischen integrierten Planungsleitlinien sind eine zentrale Voraussetzung. Die mobilitätsbezogenen Zielrichtungen der Digitalisierung unterliegen einer breiten Beteiligungsnotwendigkeit und müssen gesellschaftlich mehrheitsfähig sein und gleichzeitig investitionstauglich bleiben für die öffentliche Hand sowie privatwirtschaftliche Projektentwickler

Literatur zu den wesentlichen Aussagen

- Ertel, W. (2019a). Artificial Intelligence, the spare time rebound effect and how ECG would avoid it. In: *International Conference: Economy for the Common Good*, ECCPW-2019.
- Etzemüller, T. (2009). *Die Ordnung der Moderne – Social Engineering im 20. Jahrhundert*, transcript Verlag, Bielefeld.
- Hofmann, K.-M. (2018). Eine Theorie der Modern Commons – Ansätze für eine nachhaltige Infrastrukturentwicklung: Struktur-funktionale Systemanalyse zur Bedeutung und Transformation von Infrastrukturnetzen, Universität Leipzig.
- Lange, S. & Santarius, T. (2018). Smarte grüne Welt? Digitalisierung zwischen Überwachung, Konsum und Nachhaltigkeit. oekom-Verlag München.
- Levin-Keitel, Meike, et al. (2018). Sustainability Transitions and the Spatial Interface: Developing a Conceptual Perspective, <https://doi.org/10.3390/su10061880>
- Libbe, J. (2014). Smart City: Herausforderung für die Stadtentwicklung. In *Standpunkte DIFU-Berichte 2/2014* S. 2, Deutsches Institut für Urbanistik Berlin.
- Loukopoulos, P., & Scholz, R. W. (2004). Sustainable future urban mobility: using 'area development negotiations' for scenario assessment and participatory strategic planning. *Environment and Planning A*, 36 (12), 2203 – 2226.
- Ostrom, E. (1999). Die Verfassung der Allmende: jenseits von Staat und Markt, Mohr, Tübingen.
- Ostrom, E. (2009): Gemeingütermanagement – Perspektive für bürgerschaftliches Engagement. In Helfrich, Silke und Heinrich-Böll-Stiftung (Hrsg.) *Wem gehört die Welt? Zur Wiederentdeckung der Gemeingüter* S. 218 – 229. oekom-Verlag.
- Serbser, W. H. & Serbser, C. (2019). *Pflegt der Stadt Bestes*, oekom-Verlag.

Erhöhter Ressourcenverbrauch durch Digitalisierung im Kontext der Mobilität im Individualverkehr

Kurztitel

Ressourcenverbrauch und Digitalisierung

AutorInnen

Liselotte Schebek, Susanne Hanesch,
Elke Fischer, Johanna Tiffe, Christoph Wust, Klaus Markus Hofmann

Die zunehmende Miniaturisierung, Automatisierung und Autonomisierung in den Bereichen Computertechnologie sowie digitaler Vernetzung bildet die Grundlage für den Einzug von dynamischem Energiemanagement und Algorithmierung in den Verkehrssektor in Form von digitaler Mobilität.

- Leistungsfähige GPS gesteuerte Sensorik und Computer ermöglichen genaue Positionierung und Steuerung als Voraussetzung für automatisiertes Fahren der Level 2/3 (Industrie 3.0)
- Hoch stabile kabellose Verbindungstechniken wie 5G mit sicheren Datenaustausch oder Techniken wie DLT (Distributed Ledger Technology, z. B. Blockchain) sind die technischen Grundlagen für Autonomes Fahren der Level 4/5. (Industrie 4.0 – Internet of Things).
- Zum voll autonomen Fahren (Level 5) ist die Anwendung von KI-Techniken zur Echtzeiterkennung und -reaktion auf unstrukturierte Verkehrssituationen unumgänglich. Hierbei werden die Techniken aus Video Sensorik sowie Hochleistungsdatenverarbeitung und Echtzeit-datenübertragung maximal gemischt und angewandt.
- Digitalisierung kann eine dynamisch optimierte Steuerung von Verkehrsflüssen ermöglichen. Hierzu werden die Daten der Fahrzeuge analysiert und bewertet (Big Data) und an eine digitalisierte Verkehrsinfrastruktur sowie an vernetzt fahrende Fahrzeuge übermittelt.
- Die technischen Veränderungen durch die Digitalisierung stehen in Interaktion mit der Nutzung von Fahrzeugen und dem Nutzerverhalten im Bereich Mobilität. Dies ist zu beachten im Hinblick auf mögliche Rebound-Effekte bei Effizienzgewinnen durch Digitalisierung. Alle diese Veränderungen wirken auf den Verbrauch von Ressourcen im Lebenszyklus von Produkten für Mobilität und deren Komponenten ein. Dies forciert eine Herausstellung von Handlungsfeldern zur Reduktion des Ressourcenverbrauchs durch Digitalisierung des Individualverkehrs.

Supplementarische Information (SI1.4) zum Kapitel Klaus Markus Hofmann, Denise Baidinger, Susanne Hanesch, Meike Levin-Keitel, Florian Krummheuer, Wolfgang H. Serbser, Karl Teille, Thomas Thiele, Christoph Wust (2021). Auswirkungen von Digitalisierung auf persönliche Mobilität und vernetzte Räume – Zusammenfassende Betrachtung der Unseens digitaler Mobilität DOI:10.5771/9783748924111-01. In Scholz, R. W., Beckedahl, M., Noller, S., Renn, O., unter Mitarbeit von Albrecht, E., Marx, D., & Mißler-Behr, M (Eds.), (2021). DiDaT Weißbuch: *Verantwortungsvoller Umgang mit digitalen Daten – Orientierungen eines transdisziplinären Prozesses* (S. 69 – 96). Baden-Baden: Nomos. DOI:10.5771/9783748924111

Beschreibung der Unseens von digitaler Mobilität und erhöhtem Ressourcenverbrauch

Jede Form von Mobilität verbraucht Energie und beeinträchtigt die Umwelt. Das Projekt Di-DaT untersucht im Vulnerabilitätsraum Mobilitätseffekte von digitaler Mobilität auf Raumstrukturen und Ressourcenverbrauch, letzteres mit Fokus auf motorisiertem Individualverkehr (MIV). Andere Formen von Mobilität durch den ÖVNP, intermodale Mobilitätskonzepte oder Substitution von Transportleistungen durch digitale Dienstleistungen (etwa Video-Konferenzen) werden in diesem Beitrag nicht weiter vertieft. Der Schwerpunkt liegt auf dem

veränderten Verbrauch natürlicher Ressourcen im Individualverkehr.

Der Begriff Ressourcen wird interpretiert als „natürliche Ressourcen“¹ (Abb. 1), d. h. er umfasst sowohl die Entnahme von Ressourcen aus der Umwelt, für Mobilität primär Rohstoffe und Energie, als auch die Beanspruchung der Tragfähigkeit der natürlichen Umwelt beispielsweise aufgrund von Emissionen oder Flächenverbrauch.

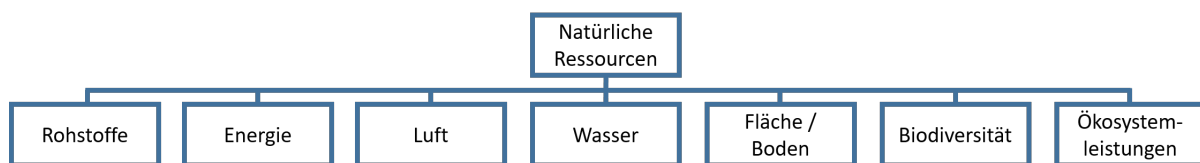


Abbildung 1: Definition natürlicher Ressourcen (Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von (Europäische Kommission, 2005) und in Anlehnung an VDI 4800 Blatt 1, Feb. 2016: Ressourceneffizienz – Methodische Grundlagen, Prinzipien und Strategien)

Dieses Papier fokussiert auf die Umwelteffekte und Rebounds digitaler Mobilität, welche sich in die Stoffkreisläufe der folgenden Felder kategorisieren lassen:

- (1) Fahrzeuge (Lebenszyklus, Energie- und Schadstoffbilanz)
- (2) Antriebe & Energieverbrauch (Transportleistung)
- (3) Infrastruktur für Verkehr und mobilitätsspezifische Datenverarbeitung (Car-to-X²Kommunikation, etc.)
- (4) Mobilitätsinduzierte Emissionen (CO₂, NO_x, Schall, Ruß-Nanopartikel u. a.)
- (5) Energieverbrauch für Datenflüsse (z. B. Apps, Datenerfassung, Verarbeitung und Übertragung)

¹ Der Begriff natürliche Ressourcen ist definiert in Anlehnung an KOM (2005) 670: Thematische Strategie zur Nutzung natürlicher Ressourcen als: "Ressource, die Bestandteil der Natur ist; hierzu zählen erneuerbare und nicht erneuerbare Primärrohstoffe, physischer Raum (Fläche), Umweltmedien (Wasser, Boden, Luft), strömende Ressourcen (z. B. Erdwärme, Wind-, Gezeiten- und Sonnenenergie) sowie Ökosystemleistungen und Biodiversität."

² Echtzeitbasierter Austausch von Informationen zur Kommunikation von Fahrzeugen untereinander, beispielsweise zur Gefahrenaufdeckung oder Unfallvermeidung (<https://www.daimler.com/innovation/case/connectivity/car-to-x.html>).

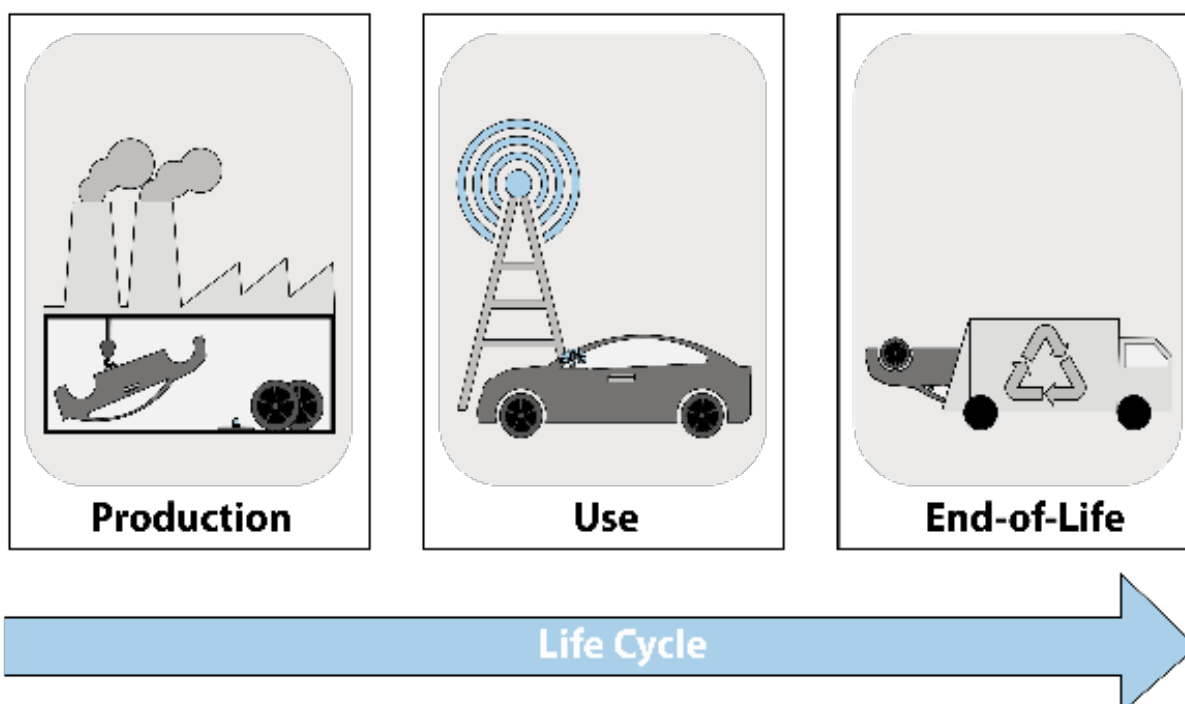


Abbildung 2: Lebenszyklus von Produkten (Quelle: Eigene Darstellung)

Um die Umweltauswirkungen von Fahrzeugen aller Art (Pkw, Lkw, Bus, Bahn, Schiffe und Flugzeuge) abschätzen zu können, müssen die einzelnen Phasen des Lebenszyklus betrachtet werden (Abb. 2). Bei der Produktion der Fahrzeuge inklusive aller darin verbauten Komponenten entsteht ein hoher Materialeinsatz, bei dem auch kritische Rohstoffe benötigt werden, beispielsweise seltene Erden für die Herstellung von Bildschirmen oder Elektromotoren. Während der Nutzenphase tritt ein hoher Energiebedarf aufgrund dem Einsatz von Energieträgern und verbauter Elektronik auf. Nach dem Lebensende der Produkte fallen Abfälle an, die behandelt werden müssen.

Eine allumfassende Betrachtung des Verbrauchs natürlicher Ressourcen und hieraus folgenden Umweltwirkungen über den Lebensweg von allen dargestellten Teilaspekten wäre

notwendig, um eine hinreichende Antwort über die ökologischen Folgen des Gesamtsystems zu erhalten³.

Die komplexe Materie der Ressourcenintensität digitaler Mobilität lässt sich in einem schematischen Überblick zusammenfassen, welcher in einer Delta-Betrachtung eine grobe Quantifizierung der Umweltauswirkungen digitaler Mobilität ermöglicht (Abb. 3). Hauptfelder für Inanspruchnahme natürlicher Ressourcen im Produktlebenszyklus digitaler Mobilität sind die Rohstoffe für Infrastruktur und Fahrzeugherstellung, Energiebedarf für Antrieb und Daten und letztlich die Emissionen. Im Folgenden werden Unseens für digitale Mobilitätsysteme aufgrund von primären Eingriffen in das Mobilitätssystem sowie Rebound-Effekten exemplarisch für alle die Digitalisierung betreffenden Bereiche aufgezeigt.

³ Eine ganzheitliche Analyse und Bewertung von Ressourcenverbräuchen und resultierenden Umweltwirkungen kann beispielsweise mithilfe einer Lebenszyklusanalyse und dem Einsatz komplexer Ökobilanzmodelle erfolgen.



Abbildung 3: Bereiche der Ressourcenintensität im Lebenszyklus digitaler Mobilität (Schematische Darstellung) (Quelle: Eigene Darstellung)

Wechselwirkung von Mensch, Umwelt und Mobilitätssystemen

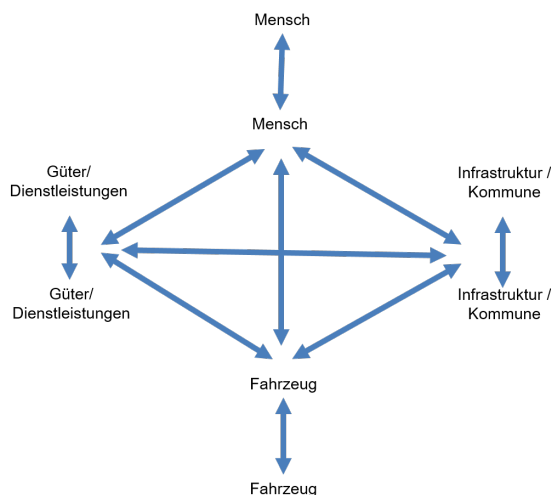


Abbildung 4: Vernetzung mobiler Räume (Quelle: Eigene Darstellung)

Damit die Unseens aus dem Ressourceneinsatz der digitalen Mobilität detailliert betrachtet

werden können, wird noch ein Überblick über den Systemaufbau und die digitale Vernetzungen innerhalb des Verkehrssektors gegeben (Abb. 4). Bei einem digitalen Fahrzeug wird unterschieden zwischen einer mens- oder maschinengesteuerten Fahrweise, welche sich aus den Mischformen des assistierten oder vernetzt autonomen Fahrens zusammensetzt (Abb. 5). Zusätzlich fällt die Nutzung von digitalen Dienstleistungen während eines herkömmlichen Betriebs an. Folglich treten verschiedene Vernetzungs- und Technologiebedarfe für den Verkehrssektor mit nicht unerheblichen ökologischen Auswirkungen auf.

Automation / Autonomie Grad		Fahrzeug Sensorik	Echtzeit Computing	Daten-speicherung	Daten-netzwerk	Digitale Infrastruktur	Big Data
INFRASTRUKTUR							
Zentrale Verkehrssteuerung		-----	High Performance Computing im Fahrzeug	Gestaffelte Datenhaltung und Datenaustausch	Stabiler bidirektionaler Datenaustausch	Verkehrsinfrastruktur ist mit Sensoren und Aktoren digitalisiert	High Performance Computing für KI basierte Echtzeitsteuerung
SAE J3016 Level of Autonomous Driving	FAHRZEUG				Netzwerk		
	L5 Volle Autonomie für allen Bedingungen	Video gesteuerte KI zur Erkennung menschlicher Reaktionen	KI Echtzeit Erfassung, Bewertung und Reaktion auf Umgebungs-situationen	Fahrzeug speichert KI Daten über Entscheidungen (Blackbox)	Volle sichere high speed Anbindung Digitalisierung (5G, Distributed Ledger)		
	L4 Hohe Automation eingeschränkten	↑	↑	↑	↑		
	L3 Konditional zB Stau-Assistent		Computerunterstützte Automation	Speicherung von Basis Konditionen zB Licht an	Basis Datenaustausch Störsperrungen...	Fahrzeuge und Infrastruktur tauschen Daten aus	
	L2 Partielle Automation Steuern UND Bremsen		↑	-----	-----	↑	↑
	L1 Driver Assistance Steuern ODER Bremsen	Steuer- und Regeltechnische Sensoren und Aktoren	Computerunterstützte Mess- und Regeltechnik	-----	-----	↑	↑
	L0 Keine Automation	-----	-----	-----	-----	Analoge Infrastruktur Ampeln, Schilder, ...	

Abbildung 5: Technologiebedarf der Automationsgrade im Verkehrssektor (Quelle: Eigene Darstellung)

Komplementäre Unseens in der Transformation des Verkehrssektors

Klimaziele verändern Energiebedarf

Erklärtes Ziel aus Klimaschutzplan und Klimaschutzprogramm sind hohe Einsparungen von Treibhausgasemissionen im Verkehrssektor (BMU, 2016 und 2019). Diese Emissionsreduktion stellt in den kommenden Jahren einen großen Treiber für die Transformation zu elektrifizierten und digitalisierten Verkehrssystemen dar und verändert den Energieeinsatz für die Erfüllung des Mobilitätsbedürfnisses. Aus der Veränderung folgt ein großer Digitalisierungsbedarf. Im Falle des Mobilitätsfeldes Pkw⁴ kommen neue Anwendungsfelder wie die digitale Unterstützung bei der Planung und Umsetzung der Kraftstoffbereitstellung hinzu.

Mehrbedarf durch Digitalisierung

Neben der zunehmend benötigten elektrischen Antriebsenergie, deren Bereitstellung über ver-

netzte Ladestationen einer digitalen Administration sowie intelligenter Netze, wird für die Rechnerleistung an Bord sowie die Übertragung großer Datenmengen – einschließlich der dafür benötigten Rechenzentren – wesentlich mehr elektrische Energie als bisher benötigt, deren Erzeugung wiederum Ressourcen beansprucht. Durch die wachsende Digitalisierung und Vernetzung werden aus Pkw zunehmend cyber-physikalische Systeme. Der digitale Zwilling eines Pkw ist essentiell für automatisiertes und zukünftig autonom vernetztes Fahren.

⁴ Gleiche Szenarien gelten auch für weitere Oberflächenverkehrsmittel im öffentlichen Straßenraum wie Busse und TRAM. Micromobilität mit eScooter-, eBike- oder eRoller-Verleih ergänzen traditionelle Transportmethoden. Die Organisation und Ladung der Akkus benötigten jedoch ebenfalls digitale Überwachung.

Rebound-Effekte durch Verhaltensveränderungen

Wann immer NutzerInnen durch die digitale Mobilität Zeit und Geld einsparen können⁵, ist zu erwarten, dass dies zu einer erhöhten Nachfrage an Mobilität führt. (Girod et al., 2011) Aus diesem direkten Rebound-Effekt treten negative Umweltbeeinträchtigungen als Folge des resultierenden Mehrverkehrs auf.

Darüber hinaus können Moral Licensing Effekte⁶ auftreten, wenn die Verwendung digitaler Systeme ein positives ökologisches Verhalten im Bewusstsein der NutzerInnen erzeugt – beispielsweise durch die fehlende Verknüpfung von der Nutzung digitaler Systeme und dem Verbrauch physischer Rohstoffe und daraufhin in einem anderen Sektor ein ökologisch schadhafteres Verhalten gezeigt wird.

Ursachen und Erklärung zur Entstehung dieser Unseens

Rohstoff- und Energieverbrauch steigen

Der Mehraufwand an Elektrizität und Rohstoffen bedingt eine detaillierte Betrachtung dieser notwendigen digitalen Prozesse. Mit einem digitalisierten Pkw sind neue Leistungen des Fahrens, des Ladens, der Buchung und Abrechnung verbunden, bei denen zur Vernetzung von Datenübertragungsgeräten und automatischen Prozessberechnungen virtuelle IT-Plattformen benötigt werden (Doleski, 2020)⁷. Zusätzlich zum Bedarf von physischen Komponenten am Fahrzeug erfordert die Bereitstellung und Verwaltung des digitalen Zwillings erhebliche energetische Ressourcen. Fahrzeuginterne, autonome Computer verursachen einen stetigen Stromverbrauch⁸.

Durch autonomes Fahren entstehen zusätzliche passive Zeiten für VerkehrsteilnehmerInnen, die Fahrzeuginsassen mittels digitaler Medien wie Streaming Diensten oder Infotainment kompensieren⁹.

Zusammenhang zwischen Digitalisierung und physischen Verbräuchen

Sensoren, Aktoren, eingesetzte Computer für Software, Datenspeicher im Fahrzeug, Datenübertragungsgeräte zu zentralen Computern und zentrale Datenverarbeitung werden aus einer Vielzahl seltener und teurer Rohstoffe hergestellt. Diese Ressourcen sind schwer wiederverwendbar. Durch die rapiden Lebenszyklen in der Computerindustrie ist anzunehmen, dass gegebene zentrale Systeme eine kurze Lebensdauer haben werden.

⁵ Weitere positive Folgen von (teil-)autonomen Fahrzeugen sind die gesteigerte Flexibilität und der Komfort. Maurer, M., Gerdes, J. C., Lenz, B. & Winner, H. (Hrsg.). (2015). Autonomes Fahren. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-45854-9>

⁶ Die Verwendung eines umweltfreundlichen Produkts kann eine Nachfrage nach anderen umweltschädlichen Produkten schaffen, dies zählt zu den indirekten Rebound-Effekten. Der Moral Licensing Rebound-Effekt gilt als kognitiver Prozess, bei dem eine moralische Tat als Lizenz für eine im Anschluss getätigte weniger moralische Tat dient. (<https://www.isi.fraunhofer.de/de/blog/2019/rebound-moral-licensing.html>)

⁷ An den einzelnen Fahrzeugen werden in zunehmender Anzahl Sensoren verbaut, die technische und physische Daten aufnehmen können. Diese sind mit einer Aktorik zur Steuerung der Komponenten (u. a. Mikrokontroller) im Fahrzeug verbunden.

⁸ Die gewonnenen Daten müssen über hochstabile und performante kabellose Übertragungswege wie 5G realisiert werden. Da diese Übertragung ohne Kommunikationsabbrüche erfolgen muss, wird eine hohe Anzahl von Antennen, Antennenstandorten und Basisstationen benötigt. Die Auswertung und das Datenmanagement der zentralen Datenhaltung (Cloud) kann zur aktiven Verkehrssteuerung durch Big-Data Analysen eingesetzt werden.

⁹ Streaming Dienste stellen bereits heute das größte Volumen bei Datenübertragungen im Internet dar und für den damit verbundenen Energieverbrauch. Erhebliche Anteile dieser Energie wird in Ländern mit einem umweltbelastenden Energie-Mix erzeugt.

Zusätzlich zu den schnell veraltenden Systemen entsteht durch die Integration von Hardware und Software (Embedded Systems) eine weitere Abhängigkeit hinsichtlich technischer Hardwarelebenszyklen¹⁰. Das kann im komplexen Hardware-System eines Autos zusätzliche Probleme, ergo erhöhten Ressourcenverbrauch verursachen.

Rebound-Effekte durch Zunahme digitaler Services

Neben dem steigenden Bedarf an Rohstoffen für die Hightech-Geräte des Verkehrssektors resultiert bereits in der Herstellungsphase ein hoher Stromverbrauch durch die teilweise sehr aufwendig produzierten Komponenten¹¹. Ebenfalls muss die benötigte elektrische Energie aus dem Betrieb der elektronischen Geräte berücksichtigt werden. Die elektronischen Bauteile der Datenübertragung werden zwar immer leistungsfähiger, es werden jedoch immer mehr Prozesse und Abläufe in den Verkehrsmitteln durch digitale Informationen unterstützt (Doleski, 2020)¹².

Im Verkehrssektor entstehen stetig neue Einsatzfelder, beispielsweise wird durch das autonome Fahren eine automatische Unterstützung in den Bereichen Ortung, Hinderniser-

kennung und Problemstrategieplanung benötigt¹³. Zur physischen Fortbewegung muss zudem eine ausfallsichere Ansteuerung von Lenkung, Bremse und Fahrpedal im Fahrzeug erfolgen (Schiekofer, 2020)¹⁴.

Weitere Rebound-Effekte im Bereich des mobilen Nutzerverhaltens

Beispiele anderer Branchen belegen, dass NutzerInnen, die durch eine neue Technik Zeit und Geld sparen, diese Einsparung in Mehrverbrauch von dem gleichen Gut oder anderen Gütern verwenden. Ebenso warnen Forscher davor, dass autonome Fahrzeugflotten im Dauerbetrieb zwar einerseits keine Parkplätze mehr beanspruchen, aber andererseits Leerfahrten und Mehrverkehr erzeugen¹⁵. So entstehen neben verhaltensbedingten auch systeminduzierte Rebound-Effekte. Sobald ein Anstieg der Verkehrsleistung durch Digitalisierung und Automatisierung erfolgt, steigt durch erhöhte Abnutzung und Ersatzbedarf auch der physische Verbrauch an Rohstoffen. Durch ubiquitäre Verfügbarkeit von Mikromobilität kann die Verlagerung von umweltfreundlicher Rad- und Fußgänger-mobilität hin zu digital und elektrisch unterstützten Mobilitätssystemen der letzten Meile zunehmen.

¹⁰ Ein eingebettetes System (englisch embedded system) stellt ein Computersystem dar, welches in ein umgebendes technisches System integriert ist und mit diesem in Wechselwirkung steht. (<https://www.embedded-software-engineering.de/was-ist-ein-embedded-system-a-665424/>). Die Lebenszeit von Hardware kann sowohl durch verschleißintensive Programmierung als auch durch geplante Obsoleszenz verkürzt werden. UBA (2018): Entwicklung und Anwendung von Bewertungsgrundlagen für ressourceneffiziente Software unter Berücksichtigung bestehender Methodik. Poppe, E. (2017): Die zwei Seiten der geplanten Obsoleszenz.

¹¹ Hierbei sollte eine energie- und materialeffiziente Produktion aus ökonomischen und ökologischen Gründen angestrebt werden.

¹² Diese aus der erhöhten Nutzung resultierenden Rebound-Effekte des Strombedarfs müssen verinnerlicht werden, um den Verbrauch der digitalen Mobilitätssysteme auf ein notwendiges Minimum zu reduzieren.

¹³ Dies macht Ortungs- und Umfelderkennungssysteme mithilfe von Kameras, Lidarsystemen und Ultraschallsensoren notwendig sowie eine leistungsfähige Prozessierung (Boardcomputer u. a.).

¹⁴ Daraus entstehen neue Anforderungen an die Ausfallüberwachung, wodurch für die digitale Mobilität neue Arbeitsfelder etabliert werden müssen. Ein erhöhtes Ausfallrisiko macht neue Überwachungsmechanismen und computergesteuerte Einstörungsstrategien notwendig, die wiederum Prozessoren und Kommunikation erfordern.

¹⁵ Koellner, C., 2019 | Automatisiertes Fahren, Im Fokus, Springer Onlineartikel <https://www.springerprofessional.de/automatisiertes-fahren/nachhaltigkeit/begrenztes-klimaschutz-potenzial-durch-automatisiertes-fahren/16578216>.

Problemfeld steigender Strombedarf

Aktuell tragen alle Informations- und Kommunikationstechnologien in Europa, je nach Quelle, zu rund 3 % bis 4 % der Treibhausgasemissionen bei. Durch den vermehrten Datenaustausch wird von einem exponentiellen Anstieg des Stromverbrauchs der IKT ausgegangen, bei der eine Erhöhung der CO₂-Emissionen auf 26 Mrd. Tonnen CO₂-Äq. in naher Zukunft möglich werden könnte¹⁶.

Rechnerleistung für Mobilität hat starke Auswirkungen auf Stromverbrauch

Die wachsenden Stromverbräuche resultieren auch aus der Nutzung von Datenzentren, die für die Durchführung der digitalen Services im Verkehrssektor benötigt werden. Die Anzahl der großen Rechenzentren in Deutschland hat sich im Zeitraum von 2007 und 2017 verdoppelt. Im Jahr 2010 lag der elektrische Energieeinsatz von Rechenzentren in Deutschland bei 10,5 Twh/a, im Jahr 2015 bereits bei 12 Twh/a (Hintemann, 2017; Hintemann & Clausen, 2016).

Eine Zunahme an digitalen Aktivitäten im Verkehrssektor durch leistungsintensivere und vielfältigere Services bedingt zwangsläufig eine künftig weiterhin steigende Anzahl von Rechenzentren. Obwohl sie stetig effizienter werden, müssen durch die Zunahme an benötigten Rechen- und Speicherleistungen diese

im Umkehrschluss aber auch immer höhere Kapazitäten abdecken (Dörr, 2020)¹⁷.

Steigender Strombedarf durch KI-Anwendungen

Lange waren neuronale Netze¹⁸ wegen des hohen Energiebedarfs eher Fiktion. Dank der Hardwareentwicklungsgeschwindigkeit der letzten Jahre kommen sie verstärkt zum Einsatz. In Pkws werden so komplexe Steuerungsprobleme gelöst. Auch wenn ihr Strom- und Ressourcenbedarf relativ gesunken ist, ist der Absolutverbrauch dieser digitalen Technologie weiterhin sehr hoch.

Die Algorithmus Kompositionen benötigen zur Aufgabenlösung (Training der Modelle/Machine-Learning) oftmals große Datenmengen, die auf Servern vorgehalten werden müssen (kontinuierlicher Hardware- und Stromeinsatz). Zudem bedeutet der Einsatz der komplexen Berechnungsvorschriften (Modelle) einen extrem hohen Rechenaufwand, der die Hardware sehr beansprucht und viel Strom verbraucht¹⁹. Fahren mit Level 5 wird erst in Zukunft möglich sein, der Ressourcenverbrauch muss aber schon jetzt berücksichtigt werden.

Die Entwicklung der wachsenden Verbräuche von Strom und Ressourcen basiert daher nicht nur auf der durch die aktuelle Transformation des Verkehrssektors notwendigen Zunahme der Digitalisierung, sondern wird auch durch

¹⁶ Dies würde circa eine Verdopplung gegenüber der Jahrtausendwende bedeuten (Dörr, 2020). Auch in Deutschland nimmt der IKT-bedingte Stromverbrauch einen immer größeren Anteil am Gesamtenergieverbrauch ein. Die notwendigen Voraussetzungen müssen dafür in der Energieinfrastruktur geschaffen werden, da sich die kritische Abhängigkeit von Stromausfällen auf die Verkehrssysteme ausweitet.

¹⁷ Auch den hier entstehenden Reboundeffekten muss entgegengewirkt werden, um die indirekte Umweltwirkung der digitalen Mobilität zu begrenzen.

¹⁸ Künstliche Neuronale Netze (KNN) sind dem menschliche Gehirn nachempfunden und können für maschinelles Lernen und die Künstliche Intelligenz genutzt werden. Neuronale Netze müssen zunächst trainiert werden, damit sie Informationen aufnehmen und modifiziert an andere Neuronen weiterleiten bzw. als Endergebnis ausgeben, um somit computerbasiert Problemstellungen lösen zu können. (<https://www.bigdata-insider.de/was-ist-ein-neuronales-netz-a-686185/>).

¹⁹ Aus Zeitgründen werden zudem Ergebnisse öfter schlecht dokumentiert und ungenügend allgemein zugänglich gemacht werden, z. B. als Template oder zur Weiterverwendung. Das bedeutet einen zusätzlichen Ressourcenverbrauch, da Modelle unnötig oft durchprozessiert werden. MIT (2019): Training A Single AI Model Can Emit As Much Carbon As Five Cars in Their Lifetimes. ACM Careers. Tyborski, Roman (2019): Das sind die fünf Hürden auf dem Weg zum autonomen Fahren. In: Handelsblatt.

diese verstärkt. Hierbei wird absehbar, dass auch künftig durch Veränderungsprozesse im

Bereich der Mobilität weitere Bedarfssteigerungen auftreten werden.

An welchen Zielen orientiert sich ein Umgang mit den Unseens?

Systemische Prävention zur Vermeidung von Rebound-Effekten

Um Klima- und verkehrspolitische Ziele nicht zu gefährden, sind neben der Aufklärung von NutzerInnen auch die Anreizsysteme so anzupassen, dass umweltschonendere Mobilitätssysteme bevorzugt gewählt werden und NutzerInnen von umweltschädlichen Mobilitätsformen auch die wahren Kosten dafür zu tragen haben. Die Internalisierung externer Kosten kann über Steuern, Anreize oder Privilegien je nach Mobilitätsart digital sehr differenziert gestaltet werden.

Eingebaute Umweltverträglichkeit für Fahrzeuge und Softwaresysteme

Als wesentliche Ziele für den Umgang mit den Unseens von digitaler Mobilität gilt es, die Umweltverträglichkeit der Systeme zu verbessern und den Kohlenstoff-Fußabdruck gemäß den Zielen der Bundesregierung weiter zu reduzie-

ren. Die Verringerung des Ressourceneinsatzes mit dem anvisierten Ziel der Ressourcenneutralität (BMUB, 2016) kann in einem ersten Schritt angestrebt werden, wenn ein breiteres Verständnis über das Vorhandensein von Ressourcenströmen ermöglicht wird. Natürliche Ressourcen müssen, sofern dies möglich ist, vermieden werden und alle durch die Produktion anfallenden Rohstoffe gemäß eines cradle-to-cradle Ansatzes in geschlossenen Kreisläufen wiederverwendet werden. Erst wenn der gesamte Lebenszyklus der digitalen Verkehrssysteme betrachtet wird, können alle Stoffströme adäquat erfasst werden, die zu Emissionen, Materialverlusten und weiteren Umweltwirkungen führen. Wichtig ist dabei auch, auf eine Softwarerobustheit und – effizienz zu achten und die Langlebigkeit der Komponenten zu erhöhen, um die Ressourcensparsamkeit der Verkehrssysteme zu gewährleisten.

Welche Maßnahmen sind für welche Ziele sinnvoll?

Es werden folgende Handlungsrichtlinien als notwendig erachtet: Um den Strombedarf und die Hardwarebeanspruchung und -menge so angemessen wie möglich zu halten, ist eine sinnvolle Datenverwaltung und -prozessierung wichtig²⁰. Die Standortwahl für Serverzentren sollte von vornherein im Fokus von Projektplanungen liegen²¹.

Außerdem ist eine hohe Hardwarequalität gefordert. Wichtig ist zudem eine ressourcenschonende Software. Sie kann durch Zertifikate begünstigt (Anreizfunktionen) und erkennbar gemacht werden. Eine weitere Strategie ist, verstärkt Algorithmen (inkl. KNNs) zur Optimierung über den Lebenszyklus aller in die Mobilitätskette involvierten Produkte einzusetzen²².

²⁰ KNNs ebenso. Statt KNNs können situativ einfachere Algorithmen in Betracht gezogen werden.

²¹ Zudem ist eine sinnvolle Balance zwischen Größe und Anzahl der Serverzentren wichtig und muss in die Planung von Mobilitätsanwendungen einfließen.

²² Die bei einigen Produkten einprogrammierte Obsoleszenz sollte zurückgenommen oder – noch besser – verboten werden.