



**Universität
Zürich** ^{UZH}

GDI

Auswirkungen digitaler Produkte auf den Klimaschutz

Jan Bieser, Deborah Kalte, Lorenz Hilty

August 2022

SW/CO


**SWISS
CLEANTECH**
Wirtschaft klimatauglich.

Impressum

Autoren

Jan Bieser (GDI, UZH), Deborah Kalte (UZH), Lorenz Hilty (UZH)

In Kooperation mit

Judith Bellaiche (Swico), Christian Zeyer (Swisscleantech)

Kontakt

Universität Zürich
Prof. Dr. Lorenz M. Hilty
Forschungsgruppe Informatik und Nachhaltigkeit
Institut für Informatik
Binzmühlestrasse 14
CH-8050 Zürich
hilty@ifi.uzh.ch

© Universität Zürich
Zürich, August 2022

Das diesem Bericht zugrunde liegende Forschungsprojekt wurde in Zusammenarbeit zwischen dem Institut für Informatik der Universität Zürich, dem Gottlieb Duttweiler Institut (GDI), Swico und Swisscleantech durchgeführt und von Swico finanziert.

Vorwort

Digitalisierung gilt allgemein als saubere Technologie. In Anbetracht ihrer Verbreitung ist sie das auch: nur etwa 3% des globalen Treibhausgasausstosses fällt auf sie zurück. Zusätzlich hat sie ein riesiges Potenzial, in vielen Bereichen ältere und ineffiziente Technologien und Anwendungen zu ersetzen und damit einen wesentlichen Beitrag zur Erreichung unserer Klimaziele zu leisten.

Gleichzeitig wächst der Fussabdruck der Digitalisierung unübersehbar. Einerseits ist das auf die wachsende Nachfrage nach digitalen Anwendungen zurückzuführen und kann als positiver Indikator für die fortschreitende Verdrängung von THG-intensiven Produkten interpretiert werden. Andererseits führt diese disruptive Technologie dazu, dass die Anwendungen günstiger, zugänglicher und praktischer werden und deshalb die Nachfrage anheizen. Es kommt zum Reboundeffekt, und die zunächst positive Ökobilanz wird dadurch aufgehoben. Über diese Wechselwirkung wissen wir noch wenig und sind kaum in der Lage zu beurteilen, ob ein spezifisches digitales Produkt oder eine digitale Dienstleistung sich positiv oder negativ auf den THG-Ausstoss auswirkt. Darüber hinaus gibt es diverse Faktoren, wie etwa der Strommix oder kulturell bedingte Unterschiede im Verhalten, die die Bilanz wesentlich beeinflussen können.

Im Sinne der Eigenverantwortung betrachten Swico und Swisscleantech es als Gebot der Stunde, diesen Fragen auf den Grund zu gehen und auf ein wissenschaftliches Fundament zu stellen. Zum ersten Mal werden die Klimaeffekte einzelner digitaler Produkte end-to-end, d.h. von der Bereitstellung bis zur Anwendung, untersucht und gegenübergestellt. Insgesamt wurden elf Produkte oder Dienstleistungen aus fünf verschiedenen Sektoren durchleuchtet und mit möglichen Handlungsoptionen für eine Senkung des THG-Ausstosses versehen.

Die vorliegende Metastudie liefert wertvolle Erkenntnisse in Bezug auf den Fussabdruck und soll als Grundlage für weitere—länder- oder produktspezifische—Vertiefungen dienen, um insbesondere konkrete Massnahmen und Empfehlungen für die Industrie und Konsumentinnen und Konsumenten zu erarbeiten. Wir, Swico und Swisscleantech, sehen darin eine wichtige Sensibilisierung der Wirtschaft und Gesellschaft und möchten damit einen branchenspezifischen Anreiz zur Evaluierung und Senkung des eigenen Fussabdrucks setzen.

Wir danken den Mitwirkenden der Universität Zürich und des Gottlieb Duttweiler Instituts Deborah Kalte, Jan Bieser und Lorenz Hilty.

Judith Bellaiche
Geschäftsführerin Swico

Christian Zeyer
Geschäftsführer Swisscleantech

Zusammenfassung

Die Nutzung digitaler Produkte und Dienstleistungen hat gerade in den letzten Jahren durch die COVID-19 Pandemie sowohl im Arbeits- als auch im Privatleben weiter zugenommen. Beispielsweise nutzen Menschen häufiger denn je Videokonferenz-Systeme und Cloud-Dienste, um von zu Hause zu arbeiten, bestellen immer mehr Produkte im Online-Versandhandel und greifen über Streaming-Plattformen auf eine unerschöpfliche Auswahl an Videos und Musiktiteln zu. Da die Nutzung digitaler Produkte (im Folgenden sind Dienstleistungen mit gemeint) zu tiefgreifenden Veränderungen im Arbeits- und Privatleben führt, stellt sich die Frage, inwiefern diese zu einer Senkung oder Erhöhung der Emissionsrate von Treibhausgasen (THG) beitragen und somit eher eine Chance oder Hürde für die Erreichung von Klimaschutzzielen sind. Die bisherige Forschung zeigt, dass hier eine differenzierte Betrachtung nötig ist und pauschale Abschätzungen zu den Klimafolgen der Digitalisierung nicht zielführend sind. Betrachtet man die THG-Auswirkungen digitaler Produkte, können zwei Effekte unterschieden werden:

- *Bereitstellungseffekt*: Bei der Bereitstellung digitaler Produkte entstehen THG-Emissionen, da die hierfür benötigten Endgeräte (z.B. Laptops, Smartphones) und Infrastrukturen (Telekommunikationsnetze und Rechenzentren) hergestellt, betrieben und entsorgt werden müssen.
- *Anwendungseffekt*: Die Nutzung digitaler Produkte verändert Prozesse in anderen Sektoren mit Auswirkungen auf THG-Emissionen. Einerseits können THG-Emissionen gesenkt werden, indem bestehende Prozesse hinsichtlich Ressourceneinsatz und Energieverbrauch effizienter gestaltet werden (Optimierungseffekt) oder konventionelle Produkte und Dienstleistungen ganz ersetzt werden (Substitutionseffekt). Jedoch können Einsparungen hinsichtlich Ressourcen, Kosten oder Zeit auch zu einer Konsum- und somit THG-Emissionssteigerung führen (Reboundeffekt).

Da die Auswirkungen pauschal weder als positiv noch als negativ beurteilt werden können, haben wir in dieser Studie eine differenzierte Betrachtung der THG-Auswirkungen digitaler Produkte vorgenommen und Handlungsempfehlungen zur Reduktion von THG-Emissionen abgeleitet. Insgesamt haben wir anhand bestehender Literatur die Bereitstellungseffekte von 11 digitalen Produkten in den folgenden fünf Sektoren untersucht:

- (1) *Freizeit und Unterhaltung*: Videostreaming, Musikstreaming, Online-Zeitung, E-Book-Reader
- (2) *E-Commerce*: Online-Versandhandel/Lebensmittellieferdienste und Essenslieferdienste
- (3) *Mobilität*: Multimodale Mobility-as-a-Service(MaaS)-Plattformen, Routenplanung und Navigation
- (4) *Arbeit*: Home Office, Virtuelle Meetings/Konferenzen
- (5) *Landwirtschaft und Ernährung*: Präzisionslandwirtschaft

Unsere Ergebnisse zeigen, dass sich die untersuchten Produkte in drei Kategorien einteilen lassen, die sich hinsichtlich der notwendigen Massnahmen unterscheiden:

- Bei Produkten wie Video- und Musikstreaming spielt vor allem der Bereitstellungseffekt eine Rolle, da das Streamen der Inhalte die Verarbeitung und Übertragung grosser Datenmengen in Rechenzentren und über Telekommunikationsnetze erfordert, deren Betrieb wiederum relevante Mengen an elektrischer Energie benötigt. Daher sollten Massnahmen darauf abzielen, die THG-Effizienz in der Bereitstellung zu erhöhen (insbesondere durch die Erhöhung der Energieeffizienz und durch den Einsatz von Strom aus erneuerbaren Energien) und konsumsteigernde Praktiken (z.B. Autoplay, Addictive Design) zu vermeiden.

- Bei E-Book-Readern und Online-Zeitungen sind Bereitstellungs- und Anwendungseffekt etwa gleich relevant. Bei diesen Produkten besteht die Möglichkeit, dass Nutzer neue Lesegeräte beschaffen, deren Herstellung sehr material- und energieintensiv ist. Der Anteil eines Lesevorgangs an der Herstellung der Geräte kann abhängig von der effektiven Lebensdauer des Geräts mehr THG-Emissionen verursachen als die Herstellung des entsprechenden Print-Produkts. Daher sollten Anbieter von Endgeräten darauf achten, dass deren Herstellung möglichst THG-effizient ist und die Geräte möglichst lang genutzt werden können, so dass in Summe möglichst wenig neue Geräte hergestellt werden müssen. Nutzer sollten Online und Print nicht in Kombination nutzen, möglichst wenige Endgeräte beschaffen und diese möglichst lange nutzen.
- Bei den Produkten MaaS, Routenplanung und Navigation, Home Office, virtuelle Meetings/Konferenzen, Online-Versandhandel und Präzisionslandwirtschaft ist der Anwendungseffekt deutlich relevanter als der Bereitstellungseffekt. Die Produkte bieten zumindest theoretisch ein hohes Potenzial, die THG-Emissionen des Verkehrs, des Gebäudesektors und der Landwirtschaft zu senken. Allerdings ist fraglich, inwiefern sich das Potenzial realisiert, da viele Produkte auch komplementär zu konventionellen Alternativen genutzt werden können (z.B. ersetzt eine Videokonferenz nicht unbedingt eine Flugreise) oder sogar zu Mehrkonsum führen können (z.B. kann MaaS den motorisierten Verkehr erhöhen). Daher ist es hier vor allem wichtig, durch ein geeignetes Produktdesign sowie effektive Regularien zu erreichen, dass die Nutzung des digitalen Produkts tatsächlich zu einer Vermeidung THG-intensiver, konventioneller Alternativen führt.

Bei Essenslieferdiensten konnte nicht eindeutig bestimmt werden, ob der Bereitstellungseffekt relevanter als der Anwendungseffekt ist, oder umgekehrt. Dies liegt daran, dass es nicht genug Studien dazu gibt, ob das Kochen zu Hause weniger THG-Emissionen verursacht als das Kochen in Restaurants und die Lieferung des Essens. Aufgrund der bisherigen Studien ist jedoch klar, dass Essenslieferdienste weniger Emissionen verursachen, wenn sie für die Auslieferung möglichst wenig und möglichst klimafreundliche Verpackungen und möglichst klimafreundliche Lieferfahrzeuge verwenden.

Betrachtet man die zunehmende Nutzung digitaler Produkte aus einer gesamtgesellschaftlichen Perspektive, so lässt sich feststellen, dass die globalen THG-Emissionen trotz Digitalisierung weiter zunehmen. Dies wird in der Literatur unter anderem damit erklärt, dass gerade die digital ermöglichten Effizienzgewinne zu Reboundeffekten führen: Die digitalen Produkte sind im Vergleich zu ihren analogen Vorgängern schneller, bequemer, leichter zugänglich, immer verfügbar, sehr häufig auch gratis, billiger oder werden mit günstigen Flatrates angeboten, so dass der Konsum zunimmt und die Emissionen wieder ansteigen. Daher müssen Massnahmen, die darauf abzielen, die Digitalisierung in den Dienst des Klimaschutzes zu stellen, auch bei den politisch gesetzten Rahmenbedingungen ansetzen, um ausreichende Anreize für klimafreundliche Innovationen zu schaffen, besonders auch für die digitale Wirtschaft.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	7
2 Vorgehensweise	8
2.1 Auswahl der digitalen Produkte	8
2.2 Untersuchungskriterien	9
2.3 Verwendete Literatur	10
3 Wichtigste Erkenntnisse im Überblick	11
4 Wichtigste Erkenntnisse nach Sektoren	14
4.1 Freizeit und Unterhaltung	14
4.2 E-Commerce	16
4.3 Mobilität	17
4.4 Arbeit	17
4.5 Landwirtschaft und Ernährung	18
5 Schlussfolgerungen	22
Danksagung	22
Anhang	23
A. Detaillierte Ergebnisse nach Produkt	23
B. Bereitstellungseffekt der IKT-Endgeräte und -Infrastruktur nach Produkt als Tabelle	63
Literaturverzeichnis	64

1 Einleitung

Digitale Produkte und Dienstleistungen sind heute zu einem festen Bestandteil nahezu aller Bereiche des täglichen Lebens geworden. Gerade in den letzten Jahren hat durch die COVID-19 Pandemie die Nutzung digitaler Technologien im Arbeits- und Privatleben weiter zugenommen. Häufiger denn je arbeiten Menschen von zu Hause oder von unterwegs, nutzen Videokonferenz-Systeme, Messenger-Apps, E-Mail und Cloud-Dienste, um Daten unabhängig vom Standort auszutauschen. Der Online-Versandhandel ist noch beliebter geworden als das Einkaufen in Innenstädten oder Einkaufszentren. Und wenn man eine Reise antritt, so nutzt man häufiger Apps, um den schnellsten Weg und die komfortabelsten Verkehrsmittel zu finden. Zu Hause oder auch unterwegs kann man über Streaming-Plattformen auf eine schier unerschöpfliche Auswahl an Videos und Musiktiteln zugreifen.

Bei der Bereitstellung digitaler Produkte und Dienstleistungen entstehen Treibhausgas(THG)-Emissionen, welche bereits seit mehr als zwei Jahrzehnten in der Wissenschaft und vor dem Hintergrund des Pariser Klimaschutzziels nun auch immer intensiver in der Öffentlichkeit diskutiert werden (Bieser et al., 2020a). Nicht nur der Betrieb digitaler Endgeräte (z.B. Laptop Computer, Smartphones) und Infrastrukturen (z.B. Rechenzentren und Telekommunikationsnetze) benötigt Elektrizität, auch deren Herstellung erfordert Material und Energie und verursacht somit THG-Emissionen (Jattke et al., 2020). Bei der Entsorgung der Geräte und Infrastrukturen müssen Schadstoffe mit hohem Aufwand separiert und wertvolle Metalle zurückgewonnen werden.

Gleichzeitig verändert die Nutzung digitaler Produkte und Dienstleistungen Prozesse in allen Lebensbereichen und hat dadurch Auswirkungen auf die THG-Emissionen in Bereichen wie Verkehr, Gebäude und Ernährung. Diese indirekten Auswirkungen können pauschal weder als positiv noch als negativ beurteilt werden, sie erfordern vielmehr eine differenzierte Betrachtung. Einerseits können THG-Emissionen gesenkt werden, indem bestehende Prozesse hinsichtlich Ressourceneinsatz und Energieverbrauch effizienter gestaltet werden (Optimierungseffekt) oder konventionelle Produkte und Dienstleistungen ganz ersetzen (Substitutionseffekt). Andererseits können Steigerungen in der THG-Effizienz zu Einsparungen hinsichtlich Kosten, Zeit oder anderen Input-Faktoren führen, oder den Zugang zu einem Angebot vereinfachen, wodurch deren Konsum und die damit verbundenen THG-Emissionen steigen können (Reboundeffekt, Hilty & Aebischer, 2015).

Diese Effekte lassen sich gut am Beispiel des Streamens eines Films veranschaulichen. Das Streamen eines Films verursacht weniger THG-Emissionen als eine DVD, die hergestellt und ausgeliefert oder abgeholt werden muss, selbst wenn man die Herstellung und den Betrieb der für das Streaming notwendigen Endgeräte, Netze und Rechenzentren berücksichtigt. Allerdings ist hier der Reboundeffekt schon eingetreten: Während eine DVD früher für 30 Franken im Laden gekauft werden musste, können Videos heute komfortabel und kostengünstig über Internet-Plattformen konsumiert werden. Weil es nun günstiger ist zu streamen, verbringen Menschen einen grösseren Teil ihrer Zeit mit Videos, wodurch Energieverbrauch und THG-Emissionen unter dem Strich sogar steigen können (Coroamă, 2020).

Zahlreiche Studien haben bereits die THG-Auswirkungen digitaler Produkte und Dienstleistungen untersucht, jedoch betrachten sie in der Regel den Informations- und Kommunikationstechnologie(IKT)-Sektor als Ganzes oder sind auf einzelne Produkte und Dienstleistungen (wie z.B. Videostreaming) fokussiert (Bieser & Hilty, 2018b). Für die Anbieter wie für die Nutzer dieser Produkte und Dienstleistungen ist es schwierig, die Erkenntnisse dieser Studien einzuordnen und die effektivsten Massnahmen zur Reduktion von THG-Emissionen daraus abzuleiten. Dies liegt unter anderem daran, dass Studien sich hinsichtlich der Untersuchungsziele und Modellannahmen erheblich unterscheiden, wie zum Beispiel (Bieser et al., 2020a):

- unterschiedliche Bezugsgrößen, wie im Beispiel von Videostreaming etwa THG-Emissionen pro Film, pro Plattform oder pro Nutzer
- unterschiedliche Systemgrenzen, wie zum Beispiel mit oder ohne Berücksichtigung der Herstellung der Geräte
- unterschiedliche länderspezifische Kontexte (z.B. in Bezug auf den Strommix), die es erschweren, Aussagen etwa von den USA auf die Schweiz zu übertragen

Damit Anbieter und Konsumenten von digitalen Produkten und Dienstleistungen zum Klimaschutz beitragen können, ist es notwendig, dass sie verstehen,

- an welcher Stelle in der Bereitstellungskette die meisten THG-Emissionen entstehen (Bereitstellungseffekt) und
- ob durch deren Anwendung THG-Emissionen verringert oder erhöht werden können und wie dieser Effekt optimiert werden kann (Anwendungseffekt).

Mit dieser Studie möchten wir einen Beitrag zu diesem differenzierten Verständnis leisten. Die Studie stützt sich ausschliesslich auf bestehende Literatur und versucht aus dem bestehenden Wissen abzuleiten, wo die grössten Handlungsspielräume für Anbieter und Konsumenten liegen, um THG-Emissionen bei und mit Hilfe der Nutzung digitaler Produkte zu senken. Wir sprechen im Folgenden nur noch von «digitalen Produkten», Dienstleistungen sind eingeschlossen.

Die Studie ist folgendermassen aufgebaut: Kapitel 2 beschreibt unsere Vorgehensweise, Kapitel 3 die wichtigsten übergreifenden Erkenntnisse, Kapitel 4 die wichtigsten Erkenntnisse nach Sektor (z.B. Freizeit und Unterhaltung, Arbeit) und Kapitel 5 die generellen Schlussfolgerungen. Der Anhang enthält eine detaillierte Beschreibung der verwendeten Literatur und der daraus gewonnenen Aussagen.

2 Vorgehensweise

In dieser Studie untersuchen wir die Auswirkungen digitaler Produkte auf THG-Emissionen anhand einer Literaturrecherche. Im Folgenden beschreiben wir, wie wir die Produkte ausgewählt, nach welchen Kriterien wir diese untersucht und wie wir relevante Literatur gefunden und ausgewählt haben.

2.1 Auswahl der digitalen Produkte

Wir haben auf Basis einer Literaturrecherche eine Liste von digitalen Produkten und Dienstleistungen erstellt und diese nach Sektoren kategorisiert. Insgesamt haben wir 57 Produkte in den Sektoren Freizeit und Unterhaltung, E-Commerce, Mobilität, Arbeit, Gebäude, Gesundheit, Landwirtschaft und Ernährung, Logistik, Öffentlicher Sektor, Industrieproduktion, Energie, und Finanzen identifiziert. Gemeinsam mit den Projektpartnern (Swico und Swisscleantech) haben wir daraus 11 Produkte für eine detailliertere Literaturrecherche ausgewählt (Tabelle 1). Bei der Auswahl der Produkte haben wir berücksichtigt, ob sie für die Mitglieder des Branchenverbands Swico von Interesse sind, ob Literatur zu den Produkten vorhanden ist und ob danach ein relevanter Einfluss auf THG-Emissionen erwartbar ist (unabhängig vom Vorzeichen dieses Einflusses).

Sektor	Produkt
Freizeit und Unterhaltung	Videostreaming
	Musikstreaming
	Online-Zeitung
	E-Book-Reader
E-Commerce	Online-Versandhandel inkl. Lebensmittellieferdienste
	Essenslieferdienste
Mobilität	Multimodale Mobility-as-a-Service(MaaS)-Plattformen
	Routenplanung und Navigation
Arbeit	Home Office
	Virtuelle Meetings
Landwirtschaft und Ernährung	Präzisionslandwirtschaft

Tabelle 1: Die untersuchten digitalen Produkte nach Sektor.

2.2 Untersuchungskriterien

Die ausgewählten Produkte haben wir anhand der vorhandenen Literatur auf die folgenden Aspekte hin untersucht.

Verbreitung

Sofern möglich haben wir dokumentiert, wie gross der Anteil der Bevölkerung ist (nach Möglichkeit in der Schweiz, sonst in Europa oder global), der die Produkte nutzt und/oder wie sich der mit den Produkten generierte Umsatz entwickelt.

Bereitstellungseffekt

Der Bereitstellungseffekt beschreibt die THG-Emissionen, welche bei der Bereitstellung des digitalen Produkts entstehen. Dazu gehören die THG-Emissionen, welche durch die Herstellung, den Betrieb und die Entsorgung der digitalen Endgeräte (z.B. Smartphone, E-Book-Reader) und Infrastrukturen (z.B. Rechenzentren, Telekommunikationsnetze) anteilig verursacht werden. Bei manchen Produkten sind weitere Prozesse zur Bereitstellung notwendig, wie z.B. die Auslieferung von Waren beim Online-Versandhandel. Diese haben wir auch dem Bereitstellungseffekt zugeordnet.

Anwendungseffekt

Als Anwendungseffekt werden die Auswirkungen auf THG-Emissionen bezeichnet, welche sich durch die Anwendung bzw. Nutzung der digitalen Produkte ergeben. Dabei wurden zwei Arten von Anwendungseffekten unterschieden:

Optimierungs- und Substitutionseffekt

Durch die Anwendung des digitalen Produkts können THG-Emissionen in anderen Bereichen verringert werden, in dem die Effizienz eines Prozesses erhöht wird (Optimierungseffekt, z.B. Optimierung von Fahrtwegen durch Routenplaner) oder ein Produkt ersetzt wird (Substitutionseffekt, z.B. E-Book-Reader statt gedruckte Bücher).

Reboundeffekt

Durch die Anwendung des digitalen Produkts ergeben sich Effizienzsteigerungen (z.B. Preissenkungen, verringerter Zeitaufwand), welche zu einer Erhöhung der nachgefragten Mengen und damit auch THG-Emissionen führen können (z.B. wird durch Musikstreaming der Zugang zu Musik vereinfacht, was dazu führt, dass mehr Menschen länger Musik hören). Es gibt Unterkategorien von Reboundeffekten (Bieser, 2020), welche wir im Folgenden jedoch nicht differenzieren.

Nettoeffekt

Der Nettoeffekt vergleicht den Bereitstellungseffekt mit dem Anwendungseffekt. Basierend auf diesem Vergleich haben wir, je nach Studienlage, eine Aussage darüber getroffen, ob ein digitales Produkt eher zu einer Netto-Reduktion oder einer Netto-Zunahme von THG-Emissionen führt bzw. führen kann. Aufgrund von Datenlücken und mangelnder Vergleichbarkeit der Daten aus den vorhandenen Untersuchungen würde die explizite Berechnung von Nettoeffekten aber einen Eindruck von quantitativer Exaktheit erzeugen, der durch die Datenlage nicht gerechtfertigt ist. Deshalb beschränken wir uns auf eine qualitative Diskussion der Nettoeffekte.

Hebel zur Beeinflussung der THG-Emissionen

Auf Basis der aus der Literatur gewonnenen Erkenntnisse wurde für jedes Produkt eine Einschätzung getroffen, über welche Hebel THG-senkende Effekte gefördert und THG-steigernde Effekte abgeschwächt werden könnten. Dabei haben wir unterschieden, welche Hebel die *Anbieter* und welche die *Nutzer* in der Hand haben. Unter Anbietern verstehen wir dabei alle in die Bereitstellung eines Produkts involvierten Akteure und unter Nutzern Endkonsumenten oder Unternehmen, welche die Produkte verwenden.

2.3 Verwendete Literatur

Für die Untersuchung haben wir wissenschaftliche Literatur aus den einschlägigen Zeitschriften und Konferenzen sowie sogenannte graue Literatur identifiziert. Dazu gehören insbesondere von Unternehmen, Wirtschaftsverbänden oder NGOs in Auftrag gegebene Studien. Bei der Auswahl der Quellen war das Kriterium entscheidend, dass diese möglichst umfassend die THG-Auswirkungen der jeweiligen digitalen Produkte untersuchen und die getroffenen Modellannahmen möglichst transparent darstellen. Dies ist zum einen ein grundlegendes Kriterium für Wissenschaftlichkeit, zum anderen erhöht es die Chancen auf Vergleichbarkeit und Kombinierbarkeit der Ergebnisse. Die Studien wurden so ausgewählt, dass die Erkenntnisse, wenn möglich, auf die Schweiz bezogen oder auf den Schweizer Kontext übertragbar sind. Zusätzlich zu den Studien über THG-Emissionen digitaler Produkte haben wir Marktstatistiken verwendet, insbesondere um Aufschluss über die Verbreitung der digitalen Produkte zu erhalten.

Falls zu einem Produkt oder zu einem bestimmten Effekt eines digitalen Produkts keine Studien zu finden waren, haben wir dies entsprechend vermerkt. In Ausnahmefällen haben wir selbst begründete Einschätzungen vorgenommen, um Lücken zu schliessen. Substanzielle eigene Erhebungen oder Berechnungen zu den THG-Auswirkungen der digitalen Produkte haben wir für diese Literaturstudie jedoch nicht durchgeführt. In sehr seltenen Fällen haben wir Studien berücksichtigt, deren Ergebnisse nur in Form von Abbildungen (z.B. Balkendiagrammen) angegeben sind. In diesen Fällen haben wir die Werte bestmöglich aus der Abbildung abgelesen.

Bei der Interpretation der Ergebnisse haben wir soweit wie möglich die methodische Vorgehensweise der herangezogenen Studien berücksichtigt. Dies betrifft insbesondere den Umgang mit Allokationsproblemen (z.B. wie die THG-Emissionen, welche die Herstellung eines Geräts verursacht, auf mehrere Verwendungszwecke des Geräts aufgeteilt wurden), aber auch die Grenzen der Übertragbarkeit von Ergebnissen internationaler Studien auf Schweizer Verhältnisse.

Basierend auf den Erkenntnissen haben wir die untersuchten Produkte miteinander verglichen und zentrale sowie produktübergreifende Handlungsempfehlungen zur Reduktion von THG-Emissionen abgeleitet.

3 Wichtigste Erkenntnisse im Überblick

Zur Darstellung der wichtigsten Erkenntnisse haben wir die untersuchten Produkte in drei Kategorien eingeteilt, abhängig davon, ob der Bereitstellungseffekt oder der Anwendungseffekt bedeutender für den Nettoeffekt auf THG-Emissionen ist. In eine vierte Kategorie fallen Produkte, für die sich diese Frage derzeit nicht klar beantworten lässt. Tabelle 2 zeigt, in welche Kategorie die digitalen Produkte fallen und welche Massnahmen zur Reduktion von THG-Emissionen empfohlen werden. Die Kategorien implizieren deutlich unterschiedliche Massnahmen.

	Der Bereitstellungseffekt ist deutlich relevanter als der Anwendungseffekt	Der Bereitstellungseffekt und der Anwendungseffekt sind etwa gleich relevant	Der Anwendungseffekt ist deutlich relevanter als der Bereitstellungseffekt
Produkte	Videostreaming, Musikstreaming	E-Book-Reader, Online-Zeitungen	MaaS, Routenplanung und Navigation, Home Office, virtuelle Meetings/ Konferenzen, Online-Versandhandel, Präzisionslandwirtschaft
Beschreibung	Die Produkte verursachen hohen Datenverkehr, der erhebliche THG-Emissionen auslöst. Ein Zurück zu konventionellen Alternativen ist unwahrscheinlich.	Die Bereitstellung des digitalen Produkts kann mehr THG-Emissionen (pro Leser) verursachen als konventionelle Alternativen. In der Bereitstellung verursacht die Herstellung der genutzten Endgeräte am meisten THG-Emissionen.	Durch den Anwendungseffekt können deutlich mehr THG-Emissionen vermieden werden, als die Bereitstellung der IKT-Dienstleistung verursacht. Allerdings hängt der Anwendungseffekt stark vom Design der Lösung ab.
Reduktionsmassnahmen	Anbieter	THG-Effizienz in der Bereitstellung erhöhen und konsumsteigernde Praktiken (z.B. Autoplay, Addictive Design) vermeiden.	THG-Effizienz in der Herstellung der Geräte erhöhen und möglichst langlebige Geräte herstellen.
	Nutzer	Unnötigen Konsum vermeiden (z.B. keine Videos im Hintergrund streamen), Videos eher auf kleineren Geräten abspielen und unnötig hohe Auflösung vermeiden.	Online und Print nicht in Kombination nutzen, möglichst wenige Endgeräte beschaffen und diese möglichst lange nutzen.
			Sicherstellen, dass die Nutzung des digitalen Produkts tatsächlich die Nutzung konventioneller, THG-intensiverer Alternativen vermeidet.
			Digitale Produkte gezielt einsetzen, um THG-intensive Prozesse wie Reisen zu vermeiden oder den Transport von Gütern zu bündeln.

Tabelle 2: Untersuchte Produkte und wichtigste Massnahmen zur THG-Reduktion nach Kategorie. Essenslieferdienste sind nicht dargestellt, da die Studienlage nicht ausreichend ist.

Kategorie 1: Der Bereitstellungseffekt ist deutlich relevanter als der Anwendungseffekt

Streaming, speziell Videos, aber auch Musik, erzeugen grosse Datenmengen, welche über Telekommunikationsnetze übertragen und in Rechenzentren verarbeitet werden müssen, deren Betrieb erhebliche Energieverbräuche und somit THG-Emissionen verursacht. Rund 80% des Datenverkehrs über Telekommunikationsnetze wird von Videos verursacht (Cisco, 2018; Köhn et al., 2020; Marks et al., 2021), das meiste davon durch kostenpflichtige Video on Demand Angebote wie Netflix oder Amazon Prime, gefolgt von Pornographie, «Tubes» (speziell YouTube) und sozialen Netzwerken wie Facebook oder Instagram (The Shift Project, 2019). Ein Zurück zu konventionellen Alternativen wie CDs, DVDs, oder ausschliesslich linearem Fernsehen scheint nicht mehr realistisch. Daher sollten bei diesen Produkten drei Arten von Massnahmen getroffen werden:

- Erstens sollten die Inhalte möglichst emissionsarm bereitgestellt werden. Dies kann erreicht werden, indem die Menge der übertragenen Daten gesenkt wird (z.B. durch die Anpassung der Standardauflösung an die Displaygrösse der Endgeräte), die Energieeffizienz in den dafür genutzten Telekommunikationsnetzen und Rechenzentren erhöht wird und diese mit Elektrizität aus erneuerbaren Energien betrieben werden. Hier sind vor allem die an der Bereitstellung beteiligten Akteure in der Pflicht, wie z.B. Anbieter von Streaming-Plattformen und Betreiber von Telekommunikationsnetzen.

- Zweitens sollten konsumsteigernde Praktiken, die das übertragene Datenvolumen unnötig erhöhen, vermieden werden. Anbieter sollten Mechanismen, die darauf abzielen, dass Nutzer möglichst lange Inhalte streamen, sowie das automatische Abspielen von Videos (Autoplay) vermeiden. Heute ist es übliche Praxis von Anbietern digitaler Plattformen, Nutzer möglichst lange für sich einzunehmen (sog. «Addictive Design», Marks et al., 2021).
- Nutzer sollten Videos nicht im Hintergrund laufen lassen, wenn sie nur Musik hören wollen, sondern Musik ohne Video streamen. Beim Videostreaming sollte man sich bewusst sein, dass die Bildschirmgrösse den Energieverbrauch des Abspielgeräts und die Auflösung (Gesamtzahl der Pixel) die Höhe des übertragenen Datenvolumens entscheidend beeinflussen. Im Zweifel ist also ein kleinerer Bildschirm von Vorteil. Konsumenten sollten sich bewusst werden, dass der Konsum digitaler Medien – trotz ihrer Immaterialität – mit THG-Emissionen verbunden ist. Eine Ablösung von Gratisangeboten und Abos durch «Pay-per-use»-Abrechnungsmodelle wäre sicherlich eine marktwirtschaftlich effiziente Massnahme, erscheint jedoch nicht realistisch.

Kategorie 2: Der Bereitstellungseffekt und der Anwendungseffekt sind etwa gleich relevant

Für das Lesen von Büchern oder Online-Zeitungen werden deutlich weniger Daten als für das Streamen von Videos und Musik verarbeitet. Daher fällt hier der Energieverbrauch für den Betrieb der Telekommunikationsnetze und Rechenzentren kaum ins Gewicht. Hingegen rückt die Herstellung des Endgeräts in den Vordergrund, da die Möglichkeit besteht, dass Nutzer neue Geräte hierfür anschaffen (z.B. E-Book-Reader) deren Herstellung material- und THG-intensiv ist. Der Anteil eines Lesevorgangs an der Herstellung der Geräte kann unter bestimmten – gar nicht so unrealistischen – Bedingungen mehr THG-Emissionen verursachen als die Herstellung des entsprechenden Print-Produkts. Dies ist insbesondere dann der Fall, wenn das gedruckte Exemplar eines Buchs oder einer Zeitung von mehreren Personen gelesen wird oder wenn Nutzer sowohl digitale als auch gedruckte Formate lesen. Daher sollten bei diesen Produkten folgende Massnahmen priorisiert verfolgt werden:

- Hersteller von Lesegeräten sollten THG-Emissionen in der Produktion verringern, zum Beispiel durch die Erhöhung der Material- und Energieeffizienz und den Einsatz von Energie aus erneuerbaren Quellen. Zusätzlich sollten Hersteller es den Nutzern leicht machen, möglichst wenig Geräte parallel zu besitzen und diese möglichst lange zu nutzen. Dies kann dadurch erreicht werden, dass die Geräte auf eine lange Lebensdauer ausgelegt sind (z.B. durch austauschbare Akkus und widerstandsfähiges Design) und alle gängigen Dateiformate auf den Geräten angezeigt werden können. Eine Studie, welche an der Konferenz zu «Product Lifetimes and the Environment» vorgestellt wurde, gibt einen Überblick über mögliche Massnahmen zur Lebensdauerverlängerung digitaler Geräte (Bieser et al., 2021a).
- Nutzer sollten sich entscheiden und entweder nur gedruckte Formate lesen oder möglichst komplett auf digitale Formate umsteigen. Sollten sich Leser für gedruckte Formate entscheiden, so sollten Exemplare möglichst mit anderen Lesern geteilt werden. Sollten sie sich für digitale Formate entscheiden, so sollten sie die Anschaffung von dedizierten Geräten vermeiden und bereits vorhandene Geräte verwenden. Generell sollte man Endgeräte so lange wie möglich nutzen und am Ende der Nutzungsdauer entweder einer Sekundärnutzung zuführen oder fachgerecht entsorgen (was in der Schweiz gewährleistet ist, wenn die Geräte korrekt zu entsprechenden Verkaufs- oder Sammelstellen zurückgebracht werden).

Kategorie 3: Der Anwendungseffekt ist deutlich relevanter als der Bereitstellungseffekt

Bei den Produkten MaaS, Routenplanung und Navigation, Home Office, virtuelle Meetings/Konferenzen, Online-Versandhandel und Präzisionslandwirtschaft ist laut Literatur der Anwendungseffekt deutlich relevanter als der Bereitstellungseffekt. Dies liegt daran, dass die Nutzung der Produkte zu einer Veränderung in der Nutzung konventioneller Alternativen führt, die deutlich

THG-intensiver sind als die Bereitstellung der dazu notwendigen IKT-Infrastruktur. Im Falle aller Produkte (ausser Präzisionslandwirtschaft) betrifft dies vor allem den (motorisierten) Personentransport und im Falle von Home Office auch die Bewirtschaftung von Büroflächen.

Sollte die Nutzung der Produkte zu einer Reduktion von motorisiertem Transport führen, ist davon auszugehen, dass absolut gesehen THG-Emissionen vermieden werden. Dies ist zum Beispiel der Fall, wenn durch Home Office oder Online-Versandhandel Fahrten mit dem Auto, durch virtuelle Meetings und Konferenzen Geschäftsreisen mit dem Flugzeug oder mit dem Auto, und durch MaaS Autoverkehr generell vermieden wird.

Allerdings ist nicht immer zwingend gegeben, dass dies auch der Fall ist. So können neue MaaS-Angebote anstatt Autoverkehr auch nicht-motorisierten Verkehr ersetzen (z.B. kann man einen E-Scooter nutzen anstatt zu laufen) oder zu Mehrverkehr führen, da der Komfort des Transports steigt und die Kosten sinken. Vor der COVID-19 Pandemie wurde auch in Frage gestellt, inwiefern virtuelle Meetings tatsächlich Geschäftsreisen vermeiden oder eine komplementäre Form des Austauschs zu physischen Meetings sind und vielleicht sogar zu mehr Geschäftsreisen führen, da die internationale Zusammenarbeit durch Videokonferenzen intensiviert wird. Beim Online-Versandhandel besteht zusätzlich die Gefahr, dass der Konsum und die THG-Emissionen in der Herstellung und Auslieferung von Produkten zunehmen, aufgrund finanzieller Vorteile, der Bequemlichkeit und der grossen Auswahl im Online-Handel. Auch wird die Lieferung zur eigenen Haustür meist einer Lieferung zu einer nahegelegenen Abholstation vorgezogen, was die effiziente Bündelung von Güterströmen erschwert, besonders in Verbindung mit sehr kurzen Lieferfristen. Durch Präzisionslandwirtschaft kann die THG-Effizienz in der Produktion von Nahrungsmitteln erhöht werden. Allerdings besteht auch die Gefahr, dass dadurch die Produktion intensiviert wird, was vor allem bei tierischen Nahrungsmitteln zu einer THG-Steigerung führen würde.

Daher ist es bei all diesen Produkten wichtig, dass im ersten Schritt sichergestellt wird, dass deren Nutzung tatsächlich zu einer Vermeidung THG-intensiver, konventioneller Alternativen führt, und erst dann die Lösungen skaliert werden. Dies kann wie folgt erreicht werden:

- Erstens kann eine THG-Reduktion durch das Design der Lösung gefördert werden. Beispielsweise sollten MaaS-Apps so gestaltet werden, dass sie hauptsächlich klimafreundliche Verkehrsmittel fördern (z.B. durch die Preisgestaltung), keine Anreize für Mehrverkehr setzen und gleichzeitig so attraktiv und komfortabel sind, dass sie tatsächlich zu einer Abkehr vom privaten Auto führen. Dies ist eine Herausforderung, die bis heute in vielen Fällen nicht gelöst werden konnte.
- Zweitens können durch effektive Regularien klimafreundliche Alternativen gefördert und THG-Emissionen reduziert werden. Dies beinhaltet beispielsweise eine ausreichend hohe Bepreisung klimaschädlicher Verkehrsmittel oder eine Förderung pflanzlicher Nahrungsmittel durch den Gesetzgeber, die Einschränkung von Geschäftsreisen und den Abbau von Bürofläche durch Arbeitgeber. Die COVID-19 Pandemie hat auf eindrückliche Weise gezeigt, dass die Verfügbarkeit geeigneter IKT-Lösungen in Kombination mit effektiven Regularien zu einer Reduktion von THG-Emissionen führen kann.
- Drittens sollten auch Nutzer darauf achten, dass sie seltener reisen, THG-effiziente Verkehrsmittel nutzen und im Falle des Online-Versandhandels nicht mehr Produkte online bestellen als notwendig. Diese sollten nach Möglichkeit gebündelt, mit zeitlicher Toleranz und zu einem Abholpunkt in fussläufiger Entfernung bestellt werden, denn die «letzte Meile» zur eigenen Haustür hat die schlechteste Energieeffizienz.
- Schliesslich sollten Anbieter von Lösungen für MaaS, Routenplanung und Navigation, Home Office, virtuelle Meetings/Konferenzen, Online-Versandhandel und Präzisionslandwirtschaft weiterhin darauf achten, dass die Bereitstellung der dafür notwendigen IKT-Infrastruktur möglichst

wenig THG-Emissionen verursacht, auch wenn der Anwendungseffekt für den Klimaschutz wichtiger ist.

Kategorie 4: Es ist unklar, welcher Effekt relevanter ist

Für Essenslieferdienste konnte nicht eindeutig bestimmt werden, ob der Bereitstellungseffekt relevanter als der Anwendungseffekt ist oder umgekehrt. Dies liegt daran, dass es nicht genug Studien dazu gibt, ob das Kochen zu Hause weniger THG-Emissionen verursacht als das Kochen in Restaurants und die Lieferung des Essens. Auch könnten Essenslieferdienste zu einer Veränderung der Ernährungsgewohnheiten (z.B. mehr oder weniger Fleisch) und des Anteils an Lebensmittelabfällen führen, was relevante Konsequenzen für THG-Emissionen in der Bereitstellungskette der Nahrungsmittel hat. Dennoch sollten Essenslieferdienste darauf achten, für die Auslieferung möglichst wenig und möglichst klimafreundliche Verpackungen und möglichst klimafreundliche Lieferfahrzeuge zu verwenden.

Quervergleich der absoluten Effekte

Die digitalen Produkte unterscheiden sich wesentlich in der absoluten Höhe der THG-Emissionen, die sie verursachen oder zu vermeiden helfen. Die vorhandene Literatur zeigt, dass Videostreaming in der Summe deutlich mehr THG-Emissionen verursacht als Musikstreaming oder die Nutzung von E-Book-Readern und Online-Zeitungen. Dies ist durch das hohe Datenvolumen zu erklären, welches mit Videos verbunden ist.

Auf Grundlage der vorhandenen Literatur ist allerdings kein abschliessender Vergleich mit anderen Produkten wie MaaS, Routenplanung und Navigation, Home Office, virtuellen Meetings/Konferenzen, Online-Versandhandel, Essenslieferdiensten und Präzisionslandwirtschaft möglich. Allerdings ist davon auszugehen, dass die Bereitstellungseffekte dieser Produkte absolut gesehen deutlich niedriger sind als die des Videostreamings, da sie deutlich weniger Datenverkehr verursachen und Konsumenten nur selten neue Geräte für die Nutzung der Produkte kaufen.

Hinzu kommt, dass der Einfluss des Anwendungseffekts dieser Produkte auf THG-Emissionen (Erhöhung oder Senkung) deutlich grösser ist als der Bereitstellungseffekt von Videostreaming. Dies liegt daran, dass diese Produkte sehr THG-intensive Prozesse beeinflussen (z.B. Transport, Gebäude), die insgesamt deutlich mehr Emissionen verursachen als der IKT-Sektor. Beispielsweise verursacht der Verkehr allein rund 32% der THG-Emissionen in der Schweiz, der Gebäudesektor 24% und die Landwirtschaft 15% (Bundesamt für Umwelt, 2022a, 2022b), während der IKT-Sektor im Jahr 2015 für weniger als 3% der Schweizer THG-Emissionen verantwortlich war (Hilty & Bieser, 2017). Richtig eingesetzt, kann die Digitalisierung also helfen deutlich mehr THG-Emissionen zu vermeiden, als sie selbst verursacht.

4 Wichtigste Erkenntnisse nach Sektoren

Im Folgenden beschreiben wir die wichtigsten Erkenntnisse pro Sektor und fassen diese in Tabelle 3 am Ende des Kapitels zusammen. Die detaillierte Zurückführung der in diesem Kapitel gemachten Aussagen auf die Quellen wird hier aus Gründen der Lesbarkeit weggelassen; sie ist im Anhang wiedergegeben.

4.1 Freizeit und Unterhaltung

In diesem Sektor haben wir vier Produkte untersucht: Videostreaming, Musikstreaming, Online-Zeitungen und E-Book-Reader.

Von den vier untersuchten Produkten verursacht Videostreaming die meisten THG-Emissionen. Die Datenübertragung der Videoinhalte über Telekommunikationsnetze sowie der Betrieb der Abspielgeräte stellen die Hauptursachen der THG-Emissionen dar. Rund 80% des Datenverkehrs über Telekommunikationsnetze wird von Videos verursacht. Den meisten Datenverkehr verursachen kostenpflichtige Video on Demand Angebote wie Netflix oder Amazon Prime, gefolgt von Pornographie, «Tubes» (speziell YouTube) und sozialen Netzwerken wie Facebook oder Instagram (The Shift Project, 2019). Daher ist es besonders wichtig, die Menge der übertragenen Daten zu senken (z.B. durch die Anpassung der Standardauflösung an die Displaygrösse der Endgeräte), die Energieeffizienz in Telekommunikationsnetzen zu erhöhen und diese mit Elektrizität aus erneuerbaren Energien zu betreiben. Nutzer können die THG-Emissionen dadurch senken, in dem sie unnötigen Konsum von Videoinhalten reduzieren (z.B. Videos im Hintergrund abspielen), und effiziente Abspielgeräte nutzen (z.B. mit kleinen Displays).

Musikstreaming verursacht zwar weniger Datenverkehr als Videostreaming, ist aber dennoch verantwortlich für erhebliche THG-Emissionen. Zum Beispiel hat das Lied «Despacito» mit weltweit 4,6 Milliarden Streams innerhalb von weniger als einem Jahr so viel Strom verbraucht wie Tschad, Guinea-Bissau, Somalia, Sierra Leone, und die Zentralafrikanische Republik zusammen (Varghese, 2020). Wie bei Videostreaming verursachen hier die Datenübertragung und der Betrieb der Abspielgeräte die meisten THG-Emissionen. Neben den unter Videostreaming genannten THG-Reduktionsmassnahmen sollten Anbieter von Video- und Musikstreaming (z.B. YouTube) ermöglichen, die Übertragung des Videos abzuschalten, wenn eigentlich nur Musik gehört wird.

Auch wenn es Vergleiche von Video- und Musikstreaming mit konventionellen Alternativen gibt (z.B. klassisches Fernsehen, DVDs, CDs), so ist zu erwarten, dass kein «Zurück» zu diesen Alternativen realistisch ist. Die Tatsache, dass heutzutage praktisch überall, zu jeder Zeit und nahezu umsonst Videos und Musik gestreamt werden können, führt zu einer Steigerung des Musik- und Videokonsums. Es sollte ein Bewusstsein dafür geschaffen werden, dass der Konsum digitaler Medien, trotz ihrer Immaterialität, mit THG-Emissionen verbunden ist. Das Ziel sollte sein, diese möglichst emissionsarm bereitzustellen, und Praktiken zu vermeiden, welche deren Konsum und das Datenvolumen unnötig erhöhen (z.B. Autoplay von Videos oder «Addictive Design»).

Aufgrund der geringeren Datenmengen ist davon auszugehen, dass Online-Zeitungen und E-Book-Reader in absoluten Zahlen deutlich weniger THG-Emissionen verursachen als Video- und Musikstreaming. Bei Online-Zeitungen mit geringer Leserzahl verursacht die Inhaltsproduktion die meisten THG-Emissionen, bei hoher Leserzahl verursachen die Speicherung und Verteilung der Daten sowie die Herstellung der Lesegeräte die meisten THG-Emissionen. Beim Vergleich von Online- und Print-Ausgaben ist somit relevant, wie viele Personen sie lesen und für wie lange. Grundsätzlich wird angenommen, dass im Durchschnitt die THG-Emissionen der Online-Ausgaben «eher» geringer sind als die der Print-Ausgaben. Wird jedoch eine Ausgabe von mehr als drei Personen gelesen oder dauert das Lesen der Inhalte länger als eine halbe Stunde, ist die Print-Ausgabe laut Plüss (2015) ökologischer als eine Online-Ausgabe. Online-Zeitungsanbieter können in Bezug auf die Inhaltsproduktion die THG-Emissionen senken, ebenso führen Effizienzsteigerungen der Telekommunikationsnetze zu Emissionseinsparungen. Nutzer sollten für das Lesen von Online-Zeitungen die Anschaffung von dedizierten Geräten vermeiden und bereits bestehende Geräte verwenden, diese so lange wie möglich nutzen, und am Ende der Nutzungsdauer entweder einer Sekundärnutzung zuführen oder fachgerecht entsorgen.

E-Book-Reader verursachen die meisten THG-Emissionen in der Herstellung. Laut Moberg et al. (2011) lohnt sich die Anschaffung eines E-Book-Readers aus Sicht des Klimaschutzes erst, wenn dadurch mindestens die Produktion von 30-40 konventionellen Büchern vermieden wird. Anbieter von E-Book-Readern können THG-Emissionen reduzieren, indem sie die THG-Effizienz in deren Herstellung

steigern und darauf achten, dass diese eine möglichst lange Lebensdauer haben. Ein anderer wichtiger Punkt ist, Dateiformate von E-Books kompatibel mit allen E-Book-Readern anzubieten. Nutzer sollten, analog zu Online-Zeitungen, bereits vorhandene Geräte für das Lesen von E-Books nutzen, diese möglichst lange nicht durch neue Geräte ersetzen und am Ende der Nutzungsdauer einer Sekundärnutzung zuführen oder fachgerecht entsorgen.

4.2 E-Commerce

In diesem Sektor haben wir zwei Produkte untersucht: Online-Versandhandel inkl. Lebensmittellieferdienste, sowie Essenslieferdienste. Letztere liefern frisch zubereitete, häufig warme Mahlzeiten.

Die THG-Emissionen von IKT-Endgeräten und -Infrastruktur, welche für die Bestellung von Gebrauchsgütern, Lebensmitteln und Fertigmahlzeiten verwendet werden, fanden nur in einer einzigen Studie Berücksichtigung. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass die IKT nur geringfügig zu den THG-Emissionen von E-Commerce Produkten beiträgt.

Die Herstellung der Verpackung sowie die Auslieferung auf der letzten Meile (sofern diese durch ein Fahrzeug mit Verbrennungsmotor erfolgt) verursachen den grössten Anteil der THG-Emissionen in der Kategorie Online-Versandhandel/Lebensmittellieferdienste (wobei die Herstellung der versandten Güter nicht berücksichtigt ist). Laut einer US-Studie verursacht die Herstellung der Verpackung sogar mehr THG-Emissionen als die Auslieferung (Fernández Briseño et al., 2020). Anbieter können daher einerseits THG-Emissionen reduzieren, indem sie den Gebrauch von (oftmals zusätzlichen) Verpackungsmaterialien minimieren oder darauf ganz verzichten und klimafreundliche Transportmittel für die Auslieferung nutzen und Lieferungen bündeln. Nutzer können darauf achten, Produkte gebündelt zu bestellen, so dass diese zusammen und möglichst in einem einzigen Karton geliefert werden. Ausserdem können sie durch Abholung bei einer Pickup-Station zu Fuss oder per Fahrrad die Ineffizienz der letzten Meile vermeiden. Gegenüber dem stationären Handel scheint der Versandhandel THG-effizienter zu sein, sofern damit (Auto-)Fahrten zu den Geschäften vermieden werden. Darin sind allerdings keine potenziellen Reboundeffekte berücksichtigt, wie eine Steigerung des Konsums aufgrund finanzieller Vorteile, der Bequemlichkeit und der grossen Auswahl im Online-Handel.

Bei Essenslieferdiensten verursachen die Verpackungsmaterialien ebenfalls den grössten Anteil der THG-Emissionen. Aus welchem Material die Verpackung besteht, ist hier von grosser Relevanz. Polypropylen-Behälter verursachen zum Beispiel rund das Doppelte an THG-Emissionen wie Aluminium-Behälter. Die Anbieter können somit durch die Wahl des Verpackungsmaterials Einfluss auf die THG-Emissionen nehmen. Kunden haben einen Hebel, indem sie nicht benötigte Materialien, wie z.B. Besteck, wenn möglich nicht mitbestellen und das Verpackungsmaterial entweder wiederverwenden oder fachgerecht recyceln bzw. entsorgen. Ferner verursacht der Liefervorgang einen beachtlichen Teil der THG-Emissionen. Auch hier können die Anbieter darauf achten, das Essen mittels klimafreundlicher Transportmittel (z.B. Lastenfahrrad) zu liefern.

Ein Vergleich von Essenslieferungen mit einem Besuch in einem Restaurant zeigt, dass letzterer weniger THG-Emissionen verursacht, sofern das Restaurant zu Fuss aufgesucht wird. Ein Vergleich von Essenslieferdiensten mit dem Kochen zu Hause konnte nicht gefunden werden. Würden Essenslieferdienste zu einer Veränderung der Ernährungsgewohnheiten (z.B. mehr oder weniger Fleisch) und des Anteils an Lebensmittelabfällen führen, wäre dies sicherlich entscheidend für den Anwendungseffekt auf THG-Emissionen.

4.3 Mobilität

In diesem Sektor haben wir zwei Produkte untersucht: Multimodale MaaS-Plattformen sowie Routenplanung und Navigation.

Die THG-Emissionen von IKT-Endgeräten und -Infrastruktur, welche für die Nutzung von MaaS, Routenplanern und Navigation in Gebrauch sind, wurden in keiner Studie berücksichtigt. Die meisten Studien gehen implizit (und teilweise explizit) davon aus, dass Veränderungen im Mobilitätsverhalten weitaus relevanter für THG-Emissionen sind als die Bereitstellungseffekte der IKT-Dienstleistung.

Studien zu Pilotprojekten von MaaS deuten darauf hin, dass diese zu THG-Emissionsreduktionen führen könnten. Diese Studien beruhen jedoch häufig auf Potenzialschätzungen und nicht auf konkreten Ergebnissen aus der Praxis. Entscheidend ist, ob MaaS tatsächlich zu einem Wechsel zu THG-effizienteren Verkehrsmitteln (speziell weg vom Auto) führt. Dies ist nicht zwingend der Fall, z.B. da E-Scooter auch Fusswege oder Fahrten mit dem Fahrrad ersetzen können. Berücksichtigt werden muss auch, dass MaaS den Transport bequemer und ggf. auch günstiger macht, wodurch Mehrverkehr erzeugt werden kann (Reboundeffekt). Speziell Mobilitätsabos können Anreize für Mehrverkehr setzen. MaaS-Anbieter sollten Wege finden, um gezielt einen klimafreundlichen Wandel im Mobilitätsverhalten zu bewirken. Dies könnte z.B. durch Preisvorteile bei der Nutzung klimafreundlicher Verkehrsmittel erreicht werden.

Aus der Literatur zu Routenplanung und Navigation zeigt sich, dass die bisherigen Routenvorschläge bezüglich Entfernung, Fahrzeit und pünktlicher Ankunftszeit nicht zwingend die klimafreundlichsten sind. Somit fördern Routenplaner nicht automatisch klimafreundliche Mobilität. Um dies zu erreichen, sollten Routenplaner die THG-Emissionen der Reise als Hauptkriterium bei der Routenwahl berücksichtigen und Nutzer dafür sensibilisieren, diese Option zu wählen.

4.4 Arbeit

In diesem Sektor haben wir zwei Produkte untersucht: Home Office und virtuelle Meetings/Konferenzen. In Bezug auf den Klimaschutz zielt Home Office vor allem darauf ab, THG-Emissionen aus dem Pendelverkehr zu vermeiden, virtuelle Meetings/Videokonferenzen ersetzen dagegen Geschäftsreisen. Da Pendelverkehr in der Summe deutlich mehr THG-Emissionen verursacht als Geschäftsreisen, ist das theoretische Potenzial von Home Office zur Vermeidung von THG-Emissionen deutlich höher.

Die THG-Emissionen der IKT-Infrastruktur, welche für das Arbeiten von zu Hause aus benötigt wird, haben nur wenige Studien untersucht und sie kommen zu dem Schluss, dass diese vernachlässigbar gegenüber dem THG-Einsparpotenzial aus der Vermeidung von Pendelfahrten sind. Gleiches gilt auch für virtuelle Meetings und Konferenzen, da die Geschäftsreisen in der Regel mit deutlich mehr THG-Emissionen verbunden sind, als die Bereitstellung und der Betrieb der Videokonferenz-Systeme und der Datenübertragungsnetze. Allerdings hängt die Grösse der Potenziale von den für das Pendeln oder für Geschäftsreisen genutzten Verkehrsmitteln, sowie dem Energieverbrauch für das Heizen, Kühlen und Beleuchten von Büroflächen ab. Wird in der Regel das Auto oder das Flugzeug genutzt, ist das Einsparpotenzial deutlich höher, als wenn Bahnfahrten ersetzt werden. Pendelt man normalerweise zu Fuss oder mit dem Fahrrad, so ist das Einsparpotenzial gleich Null. Allerdings ist das Auto bis heute in vielen Ländern das beliebteste Verkehrsmittel, weswegen generell von einem THG-reduzierenden Effekt ausgegangen werden kann.

Während beim Home Office jeder Arbeitstag von zu Hause direkt eine Pendelfahrt vermeidet, ist bei virtuellen Meetings und Konferenzen nicht klar, zu welchem Grad diese tatsächlich zur Vermeidung von Geschäftsreisen beitragen. Eine Schwedische Studie geht davon aus, dass vor der COVID-19 Pandemie die Substitutionsrate zwischen Videokonferenzen und Geschäftsreisen eher gering war. Die

COVID-19 Pandemie hat allerdings sehr eindrücklich gezeigt, dass Home Office und Videokonferenzen in Kombination mit effektiven Regularien zur Beschränkung von Pendelverkehr und Geschäftsreisen ein sehr grosses Potenzial zur Vermeidung von THG-Emissionen haben. Daher ist es wichtig, dass Unternehmen auch nach der COVID-19 Pandemie daran arbeiten, Pendelverkehr und Geschäftsreisen durch geeignete Massnahmen zu reduzieren und für unvermeidbare berufsbedingte Wege ihre Mitarbeitenden dabei unterstützen, klimafreundliche Verkehrsmittel zu nutzen.

4.5 Landwirtschaft und Ernährung

In diesem Sektor haben wir das Produkt Präzisionslandwirtschaft untersucht.

Die THG-Emissionen von Endgeräten und Infrastruktur, welche für die Nutzung von Präzisionslandwirtschafts-Technologien verwendet werden, wurden in nur einer Studie berücksichtigt. Hier zeigte sich, dass diese gering sind im Verhältnis zu den erwarteten Anwendungseffekten, z.B. die Reduktion eingesetzter Düngemittel.

Die THG-Reduktionspotenziale dieser Technologien unterscheiden sich deutlich nach Region und Anwendung. Vor allem die teilflächenspezifische Düngung und die variable Bewässerung scheinen hohe THG-Reduktionspotenziale aufzuweisen. Eine Untersuchung in der Schweiz zeigte zum Beispiel, dass durch teilflächenspezifische Düngung rund 10% der benötigten Düngermenge und entsprechend der durch die Düngung verursachten THG-Emissionen vermieden werden können (Zehner et al., 2019). Für die Realisierung der Potenziale ist entscheidend, dass landwirtschaftliche Betriebe bei der Anwendung der Technologien und der Ausschöpfung der Potenziale unterstützt werden. Zudem sollte vermieden werden, dass die Anwendungen nicht für eine vermehrte Produktion tierischer Nahrungsmittel genutzt werden, was zu einer Erhöhung anstatt einer Reduktion der THG-Emissionen führen würde. Zu berücksichtigen ist, dass Veränderungen in der Struktur der Landwirtschaft (u. a. weniger Tierhaltung, mehr Pflanzenbau) deutlich höhere THG-Reduktionspotenziale aufweisen als technologische Verbesserungen der bestehenden landwirtschaftlichen Produktionsprozesse.

Kategorie	Produkt	THG-Hotspots in der Bereitstellung	Optimierungs-/Substitutionseffekt	Reboundeffekt	THG-Reduktionsmassnahmen	
					Anbieter	Nutzer
Freizeit und Unterhaltung	Videostreaming	- Datenübertragung - Betrieb der Abspielgeräte	- Vergleich mit klassischem Fernsehen und DVDs/Blu-Rays nicht mehr zeitgemäss	- Konsumsteigerung, da praktisch jederzeit, nahezu umsonst Videos aus einem unbegrenzt erscheinenden Angebot gestreamt werden können	- Reduktion der übertragenen Datenmengen (z.B. Vermeidung unnötiger Auflösung) - Steigerung der THG-Effizienz der Telekommunikationsnetze - Verzicht auf konsumsteigernde Praktiken (wie z.B. Autoplay von Videos)	- Nutzung effizienter Abspielgeräte und kleiner Displays - Vermeidung von unnötigem Konsum (z.B. Abspielen im Hintergrund)
	Musikstreaming	- Datenübertragung - Betrieb der Abspielgeräte	- Vergleich mit CDs nicht mehr zeitgemäss - Beim mehrfachen Abspielen einer Audiodatei ist der einmalige Download klimafreundlicher als das mehrfache Streamen	- Konsumsteigerung, da praktisch jederzeit, nahezu umsonst Titel aus einem unbegrenzt erscheinenden Angebot gestreamt werden können	- Reduktion der übertragenen Datenmengen (z.B. nur Musik ohne Video über YouTube) - Steigerung der THG-Effizienz der Telekommunikationsnetze - Verzicht auf konsumsteigernde Praktiken	- Nutzung effizienter Abspielgeräte und kleiner Displays - Vermeidung von unnötigem Konsum
	Online-Zeitung	- Bei geringer Leserschaft: Inhaltsproduktion - Bei hoher Leserschaft: Bereitstellung und Verteilung der Daten sowie Herstellung der zum Lesen verwendeten Geräte	- Online-Ausgaben verursachen tendenziell weniger THG-Emissionen pro Leser als Print-Ausgaben - Bei mehreren Lesern pro Exemplar oder langer Lesedauer kann die Print-Ausgabe jedoch die klimafreundlichere Variante sein	- Potenziell Mehrkonsum von Zeitungen/News, da der Zugang einfacher und ggf. auch günstiger wird	- Senkung der THG-Emissionen der Inhaltsproduktion - Steigerung der THG-Effizienz der Telekommunikationsnetze	- Nutzung vorhandener Geräte für das Lesen von Online-Zeitungen statt Neuanschaffung - Lange Nutzung der Geräte und fachgerechte Entsorgung oder Weitergabe am Ende der Nutzungsdauer
	E-Book-Reader	- Herstellung E-Book-Reader	- Die Anschaffung eines E-Book-Readers aus Sicht des Klimaschutzes lohnt sich, wenn dadurch die Produktion von mindestens 30-40 konventionellen Büchern vermieden wird	- Potenziell Mehrkonsum von Büchern, da der Bezug von Büchern einfacher und ggf. auch günstiger wird	- Steigerung der THG-Effizienz in der Herstellung der Lesegeräte - Verlängerung der Lebensdauer der Lesegeräte - Kompatibilität mit allen gängigen Dateiformaten	- Nutzung vorhandener Geräte für das Lesen von E-Books statt Neuanschaffung - Lange Nutzung der Geräte und fachgerechte Entsorgung oder Weitergabe am Ende der Nutzungsdauer - Entweder Online- oder Print-Ausgaben lesen, nicht beides
E-Commerce	Online-Versandhandel/Lebensmittel-lieferdienste	- Lieferung - Herstellung von Verpackungsmaterialien - Benötigte IKT-Endgeräte und -Infrastrukturen verursachen deutlich geringere THG-Emissionen	- Online-Versandhandel ist THG-effizienter als das Einkaufen mit dem eigenen Auto im stationären Handel. Bei anderen Verkehrsmitteln nicht unbedingt. - Gelieferte Kochboxen sind THG-effizienter als selbst einzukaufen, da Lebensmittel-abfälle vermieden werden	- Potenzielle Konsumsteigerung, da auf einfachere und schnellere Weise Bestellungen aus einer grossen Auswahl an Produkten online aufgegeben werden können	- Vermeiden von unnötigen Verpackungsmaterialien - Ökologische Transportmöglichkeiten nutzen (z.B. elektrische Fahrzeuge) - Bündelung von Lieferfahrten	- Pakete wenn möglich gebündelt bestellen - Pakete wenn möglich vor Haustüre deponieren lassen (um erneute Zustellung zu vermeiden) - Rückgabequote verringern durch vorheriges Informieren über Produkte

	Essenslieferdienste	<ul style="list-style-type: none"> - Lieferung - Herstellung von Verpackungsmaterialien - Benötigte IKT-Endgeräte und Infrastrukturen verursachen deutlich geringere THG-Emissionen 	<ul style="list-style-type: none"> - Ein zu Fuss erreichter Restaurantbesuch verursacht weniger THG-Emissionen als eine Essenslieferung - Ein Vergleich zwischen Essenslieferungen und dem Kochen zu Hause konnte nicht gefunden werden - Neben Transport- und Verpackungsmaterialien sind Veränderungen in der Ernährung und der Menge an Lebensmittelabfällen entscheidend 	<ul style="list-style-type: none"> - Potenzielle Steigerung von Essensbestellungen, da der Bestell- und Lieferprozess durch digitale Technologie einfach und bequem ist - Möglich wäre eine Veränderung der Essensgewohnheiten durch Essenslieferdienste, welche Auswirkungen auf THG-Emissionen hat (z.B. mehr oder weniger Fleisch) 	<ul style="list-style-type: none"> - Vermeiden von unnötigen Verpackungsmaterialien - Erhöhung des Recyclinganteils der Behälter - Option anbieten, auf gewisse Materialien zu verzichten (z.B. Taschen oder Besteck) - Ökologische Transportmöglichkeiten nutzen (z.B. Fahrräder, E-Scooter) - Bündelung von Lieferfahrten - Klimafreundliche Gerichte fördern 	<ul style="list-style-type: none"> - Auf nicht benötigte Materialien wie Besteck oder zusätzliche Verpackungen verzichten - Verpackungen rezyklieren
Mobilität	Mobility-as-a-Service(MaaS)-Plattformen	<ul style="list-style-type: none"> - Ein Bereitstellungseffekt konnte in der Literatur nicht identifiziert werden - Mit grosser Wahrscheinlichkeit ist der Bereitstellungseffekt deutlich kleiner als der Anwendungseffekt 	<ul style="list-style-type: none"> - MaaS könnte geteilte Mobilität attraktiver machen, damit die Nutzung von privaten Autos und THG-Emissionen verringern - Dies ist allerdings in der Praxis nicht zwingend gegeben und hängt von der MaaS-Anwendung und Veränderungen im Mobilitätsverhalten in der Bevölkerung ab 	<ul style="list-style-type: none"> - Potenziell vermehrte Nutzung von Transportmitteln, welche zu Mehrverkehr führen würde - Im Falle von Mobilitätsabos entstehen Anreize für Mehrverkehr 	<ul style="list-style-type: none"> - Integration von Anreizen für klimafreundliche Mobilität in MaaS-Plattformen - Erhöhung der Verbreitung durch nutzerfreundliche und finanziell attraktive Angebote - Arbeitgeber könnten finanzielle Anreize für die Nutzung von ÖV bieten 	<ul style="list-style-type: none"> - Nutzung klimafreundlicher Verkehrsmittel; speziell Verzicht auf Autobesitz - Vermeiden von unnötigen Reisen
	Routenplanung und Navigation	<ul style="list-style-type: none"> - Ein Bereitstellungseffekt konnte in der Literatur nicht identifiziert werden - Mit grosser Wahrscheinlichkeit ist der Bereitstellungseffekt deutlich kleiner als der Anwendungseffekt 	<ul style="list-style-type: none"> - Die kürzesten oder schnellsten Routen sind nicht zwingend die klimafreundlichsten - Wenn Routen hinsichtlich Klimafreundlichkeit optimiert werden, ist von einer THG-Reduktion auszugehen 	<ul style="list-style-type: none"> - Ein Reboundeffekt konnte in der Literatur nicht identifiziert werden - Wie bei MaaS könnten Routenplaner Mobilität bequemer machen und so den Verkehr erhöhen 	<ul style="list-style-type: none"> - Förderung klimafreundlicher Routen und Verkehrsmittel in Routenplanern 	<ul style="list-style-type: none"> - Gezielte Wahl klimafreundlicher Routen und Verkehrsmittel

Arbeit	Home Office	<ul style="list-style-type: none"> -Herstellung der Endgeräte für das Home Office vermutlich am relevantesten -Nur wenige Studien vorhanden, diese haben nur Teilaspekte untersucht 	<ul style="list-style-type: none"> -Reduktion des Pendelverkehrs -Reduktion des Energieverbrauchs für das Heizen oder Kühlen von Büroräumen 	<ul style="list-style-type: none"> -Zusätzlicher Verkehr für andere Zwecke oder von Haushaltsmitgliedern -Zusätzlicher Energiebedarf zu Hause -Zusätzlicher Platzbedarf für das Home Office 	<ul style="list-style-type: none"> -Mitarbeitern erlauben häufig von zu Hause zu arbeiten -Förderung klimafreundlicher Verkehrsmittel für das Arbeiten -Reduktion von Bürofläche 	<ul style="list-style-type: none"> -Reduktion der Wege, speziell mit dem Auto -Nutzung klimafreundlicher Verkehrsmittel -Effiziente Raum- und Energienutzung zu Hause
	Virtuelle Meetings/ Konferenzen	<ul style="list-style-type: none"> -Studien haben in der Regel nicht die Hotspots identifiziert, sondern den gesamten Bereitstellungseffekt geschätzt -Datenübertragung über das Internet steht meist im Fokus, vor der Herstellung der genutzten Geräte 	<ul style="list-style-type: none"> -Hauptsächlich Vermeidung von Geschäftsreisen -Bei virtuellen Konferenzen können zusätzlich Emissionen vermieden werden, wie z.B. aus der Bereitstellung der Verpflegung 	<ul style="list-style-type: none"> -Mehr Meetings und mehr Teilnehmer bei virtuellen Konferenzen da die Teilnahme einfach und günstig ist -Intensiverer internationaler Austausch könnte zu einer Zunahme der Reisen führen 	<ul style="list-style-type: none"> -Hochqualitative und nutzerfreundliche Videokonferenz-Systeme entwickeln, die eine geeignete alternative zu physischen Meetings sind 	<ul style="list-style-type: none"> -Wenn möglich Videokonferenzen durchführen statt zu reisen -Arbeitgeber sollten Regelungen zur Förderung von Videokonferenzen und Vermeidung von Geschäftsreisen einführen -Geeignete Videokonferenz-Infrastruktur aufbauen
Landwirtschaft und Ernährung	Präzisions- landwirtschaft	<ul style="list-style-type: none"> -Der Bereitstellungseffekt wurde in der Literatur kaum untersucht -Eine Schweizer Studie zeigte, dass Bereitstellungseffekte von Systemen für teilflächenspez. Düngung und Farmmanagement deutlich niedriger als Anwendungseffekte sind 	<ul style="list-style-type: none"> -Vielzahl von Applikationen können THG-Emissionen reduzieren (z.B. teilflächenspez. Düngung, variable Bewässerung, Präzisionsfütterung) -Grösse der Reduktionspotenziale variiert stark nach Anwendung und Region -Veränderungen in der Struktur der Landwirtschaft (weniger Tierhaltung, mehr Pflanzenbau) haben höhere Potenziale 	<ul style="list-style-type: none"> -Ressourceneffizienz könnte zu einer weiteren Intensivierung der Produktion und somit Emissionssteigerung führen 	<ul style="list-style-type: none"> -Aufklärung und Unterstützung von landw. Betrieben bei der Anschaffung, Installation und Nutzung von Technologien zur Reduktion von THG-Emissionen -Einführung von Gesetzen und/oder Marktmechanismen, die sicherstellen, dass Präzisionslandwirtschaft zur Reduktion von THG-Emissionen führt und nicht zur weiteren Intensivierung der Produktion, insbesondere Tierhaltung 	<ul style="list-style-type: none"> -Landw. Betriebe sollten sich über klimafreundliche Produktionstechniken informieren und diese nutzen -Konsumenten sollten klimafreundliche Lebensmittel bevorzugen, sofern die notwendigen Informationen vorliegen

Tabelle 3: Übersicht der wichtigsten Erkenntnisse pro Sektor und Produkt.

5 Schlussfolgerungen

Digitale Produkte (einschliesslich Dienstleistungen auf der Grundlage digitaler Infrastrukturen und Endgeräte) haben sehr unterschiedliche Effekte auf die THG-Emissionen. Je nach Produkt kann eine Reduktion oder eine Erhöhung der Emissionen im Vergleich zu konventionellen Produkten resultieren. In vielen Fällen hat auch die konkrete Ausprägung eines Produkts durch Anbieter und Konsumenten erheblichen Einfluss darauf, ob eine Chance für die Erreichung der Schweizer Klimaschutzziele wahrgenommen oder umgekehrt sogar eine neue Hürde auf dem Weg zu klimafreundlichen Formen von Produktion und Konsum geschaffen wird. Die Massnahmen, welche notwendig sind, um die untersuchten digitalen Produkte in den Dienst des Klimaschutzes zu stellen, unterscheiden sich je nach Produkt.

In dieser Studie haben wir 11 Produkte auf der Grundlage vorhandener Literatur untersucht und die Massnahmen identifiziert, die Anbieter und Nutzer ergreifen können, um zum Klimaschutz beizutragen. Hinsichtlich der notwendigen Massnahmen lassen sich die Produkte in drei Kategorien einteilen:

- Bei Produkten wie Video- und Musikstreaming geht es vor allem darum, sie möglichst THG-effizient bereitzustellen und gleichzeitig zu vermeiden, dass der Konsum massiv ansteigt.
- Bei E-Book-Readern und Online-Zeitungen sollten Anbieter und Nutzer vor allem darauf achten, dass wenige neue Geräte für deren Konsum beschafft werden (müssen), da deren Produktion material- und energieintensiv ist.
- Die Produkte MaaS, Routenplanung und Navigation, Home Office, virtuelle Meetings/Konferenzen, Online-Versandhandel, Essenslieferdienste und Präzisionslandwirtschaft bieten ein hohes theoretisches Potenzial, die THG-Emissionen des Verkehrs, des Gebäudesektors und der Landwirtschaft zu senken. Allerdings ist fraglich, inwiefern sich das Potenzial realisiert, da diese Produkte auch komplementär zu konventionellen Alternativen genutzt werden können oder sogar zu Mehrkonsum führen können. Daher ist es hier vor allem wichtig, durch ein geeignetes Produktdesign sowie effektive Regularien zu erreichen, dass die Nutzung des digitalen Produkts tatsächlich zu einer Vermeidung THG-intensiver, konventioneller Alternativen führt.

Betrachtet man die zunehmende Nutzung digitaler Produkte aus einer gesamtgesellschaftlichen Perspektive, so lässt sich feststellen, dass die globalen THG-Emissionen trotz Digitalisierung weiter zunehmen. Dies wird in der Literatur unter anderem damit erklärt, dass gerade die digital ermöglichten Effizienzgewinne zu Reboundeffekten führen: Die digitalen Produkte sind im Vergleich zu ihren analogen Vorgängern schneller, bequemer, leichter zugänglich, immer verfügbar, häufig auch gratis, billiger oder werden mit günstigen Flatrates angeboten, so dass der Konsum zunimmt und die vermiedenen Emissionen in der Summe kompensiert oder sogar überkompensiert werden (Coroamă & Mattern, 2019; Santarius, 2017). Daher können Massnahmen, die darauf abzielen, die Digitalisierung in den Dienst des Klimaschutzes zu stellen, nicht allein auf Produktebene ansetzen, sondern müssen mit der Gestaltung der politisch gesetzten Rahmenbedingungen einhergehen, die Anreize in Richtung Klimaschutz schaffen.

Danksagung

Die Autoren danken Judith Bellaiche von Swico und Christian Zeyer von Swisscleantech für die Unterstützung und die gute Zusammenarbeit bei der Erstellung der Studie.

Anhang

A. Detaillierte Ergebnisse nach Produkt

Im Folgenden beschreiben wir die aus der Fachliteratur verwendeten Ergebnisse gegliedert nach Sektoren und Produkten.

1 Freizeit und Unterhaltung

1.1 Videostreaming

Verbreitung

Das Streamen von Videos, d.h. Video auf Abruf zum Beispiel über YouTube, Amazon oder Netflix, hat in den letzten Jahren massiv zugenommen und wurde durch die COVID-19-Pandemie noch weiter angekurbelt. Zahlen aus Deutschland aus dem Jahr 2020 zeigen, dass 54% der Gesamtbevölkerung mindestens einmal im Monat bei einem kostenpflichtigen Anbieter streamen. Klassisches TV bleibt jedoch mit 88% die beliebteste Form Videoinhalte zu konsumieren (Horizont Online, 2020). Videostreaming macht etwa 80% des Datenverkehrs und somit einen grossen Teil des Energieverbrauchs von Telekommunikationsnetzen aus (Cisco, 2018; Köhn et al., 2020; Marks et al., 2021).

Bereitstellungseffekt

Stephens et al. (2021) haben die durchschnittlichen THG-Emissionen pro Stunde Videostreaming in Europa für das Jahr 2020 geschätzt. Darin berücksichtigt wurden der Betrieb der für das Videostreaming genutzten Rechenzentren, Telekommunikationsnetze (inkl. Heimrouter und TV-Peripherie) und Endgeräte (Mix aus TV, Smartphone und Laptop). Insgesamt verursacht Videostreaming 56 g CO₂e/Stunde Video. Davon entfallen 28 g CO₂e/Stunde auf Endgeräte (inkl. Peripherie), 21 g auf Heimrouter, 6 g auf die Telekommunikationsnetze (ohne Heimrouter) und weniger als 1 g auf die Rechenzentren. Der zugrunde gelegte Elektrizitätsmix beeinflusst die THG-Emissionen signifikant: Für Schweden ergeben sich nur 3 g CO₂e/Stunde für Videostreaming, für Frankreich 10 g und für Deutschland 76 g. Auch das Endgerät spielt eine entscheidende Rolle. Wird über ein TV gestreamt, entstehen im europäischen Durchschnitt 58 g CO₂e/Stunde, über ein iPhone dagegen nur 8 g CO₂e/Stunde: mit Ausnahme von Smartphones verursachen die Endgeräte einen erheblichen Teil der THG-Emissionen des Videostreamings (Stephens et al., 2021). Die Nutzung kleinerer Endgeräte kann auch die THG-Emissionen der Telekommunikationsnetze senken, da aufgrund der geringeren Auflösung weniger Daten übertragen werden müssen.

Köhn, Gröger und Stobbe (2020) unterscheiden zusätzlich die Art des Telekommunikationsnetzes, welches für die Datenübertragung genutzt wird. Darin berücksichtigt wurden ausschliesslich die Transport-, Aggregations- und Zugangsnetze, jeweils für eine Stunde Videostreaming in HD-Qualität. Während das Glasfasernetz (FTTH) mit 2 g CO₂e/Stunde als Zugangsnetz am effizientesten ist, verursacht das Streaming via konventionellem Breitbandanschluss (Kupfer, VDSL) mit 4 g CO₂e/Stunde doppelt so viel THG-Emissionen. Mobile Zugangsnetze verursachen generell höhere THG-Emissionen als kabelgebundene Zugangsnetze. Das Streamen via modernem 5G-Mobilfunknetz ist unter den mobilen Netzen am günstigsten und verursacht rund 5 g CO₂e/Stunde. Beim derzeit gängigen 4G-Netz sind es rund 13 g und beim älteren 3G-Netz sogar 90 g. Allerdings berücksichtigen Köhn, Gröger und Stobbe (2020) anscheinend nicht die THG-Emissionen des Heimrouters, welche bei den kabelgebunden Telekommunikationsnetzen hinzugerechnet werden müssen und laut Stephens et al. (2021) erheblich sind.

In einer japanischen Studie von Tabata und Wang (2021) wurden die CO₂-Emissionen pro MB Video- oder Musikstreaming für 2019 geschätzt. Dabei berücksichtigten die Autoren den Bau bzw. die Herstellung von Rechenzentren und ihren Servern, den Betrieb von Rechenzentren und Kommunikationsnetzwerken sowie der Endgeräte, sowie den Entsorgungsprozess von Rechenzentren und ihren Servern. Die Ergebnisse zeigen, dass der Betrieb des Computers (Mix aus Desktop und Laptop Computer) mehr THG-Emissionen verursacht (von 17 mg CO₂/MB bis 32.3 mg CO₂/MB), als der Betrieb der Smartphones (von 0.113 mg bis 0.215 mg CO₂/MB). Der Bau bzw. die Herstellung von Rechenzentren und ihren Servern verursacht 4.09 mg CO₂/MB. Der Betrieb der Rechenzentren verursacht 5.48 mg, der Betrieb der Telekommunikationsnetze 53.5 mg CO₂/MB, und die Entsorgung von Rechenzentren und ihren Servern 76.8 mg CO₂/MB. Videostreaming verursacht damit in Summe zwischen 140 und 172 mg CO₂/MB. Insgesamt wurden die CO₂-Emissionen durch Videostreaming in Japan im Jahr 2019 auf etwa 809 kt CO₂ geschätzt.

Insgesamt verursachte das Videostreaming laut einer Studie des Shift-Projects weltweit über 300 Mt CO₂ in 2018, was in etwa den THG-Emissionen von Spanien entspricht (The Shift Project, 2019). Die in dieser Studie getroffenen Annahmen werden seit deren Veröffentlichung allerdings von verschiedenen Autoren kritisch diskutiert, insbesondere, dass die Annahme über den Energieverbrauch für die Datenübertragung über das Internet deutlich zu hoch sei (Kamiya, 2020).

In den meisten der oben zitierten Studien wurde ausschliesslich der Stromverbrauch für den Betrieb der Geräte und Infrastrukturen (ausser bei Tabata und Wang, 2021) berücksichtigt. Für eine ganzheitliche Betrachtung müssten mindestens die durch die Herstellung der Geräte und Infrastrukturen verursachten THG-Emissionen ergänzt werden. Speziell bei Endgeräten verursacht die Herstellung normalerweise den grössten Teil der THG-Emissionen des gesamten Lebenszyklus. Dabei muss jedoch berücksichtigt werden, dass die Geräte auch für andere Zwecke genutzt werden (Preist et al., 2019). Daher müssen die THG-Emissionen zum Beispiel nach Nutzungsdauer auf die verschiedenen Zwecke aufgeteilt werden (Allokation). Bei Infrastrukturen (Rechenzentren, Telekommunikationsnetze) ist die Vernachlässigung der Herstellungsphase jedoch weniger gravierend, da bei Servern der Betrieb den grössten Teil der THG-Emissionen verursacht (Hilty & Bieser, 2017).

Anwendungseffekt

Optimierungs- und Substitutionseffekt

In einer Studie aus den USA von 2014 wird Videostreaming mit DVDs verglichen. Diese zeigt, dass der Konsum von Videos ab DVD mit 0.40 kg CO₂e/Stunde in etwa gleich klimabelastend wie Videostreaming (0.42 kg CO₂e/Stunde) ist. Wird jedoch angenommen, dass die DVD eine Autofahrt zu einem Kaufhaus oder zu einem Verleih auslöst, dann ist Videostreaming deutlich effizienter (Shehabi et al., 2014).

In einer Studie aus Grossbritannien wurde der durchschnittliche CO₂e-Ausstoss des Fernsehkonsums pro Gerät und Stunde ermittelt. Am meisten THG-Emissionen werden durch das Streaming (BBC Streaming-Portal iPlayer, 98 g CO₂e/Stunde) verursacht. Wenn das Fernsehsignal über Satellit empfangen wird, werden 82 g CO₂e/Stunde verursacht, und 78 g CO₂e/Stunde, wenn es über Kabel empfangen wird. Am effizientesten ist die Übertragung via Antenne, mit 31 g CO₂e/Stunde (Schien et al., 2020).

Reboundeffekt

Gemäss einer umfassenden Sekundärstudie über die THG-Emissionen von Videostreaming (Marks et al., 2021) zeigt sich hier ein klassischer Reboundeffekt: Durch Videostreaming auf Abruf haben Nutzer auf einfache Weise Zugang zu einer für Einzelpersonen unerschöpflichen Menge an Videomaterial und

nutzen dieses auch (Marks et al., 2021). Gleichzeitig steigen die Auflösungen von Endgeräten, wodurch der Datenverkehr zusätzlich ansteigt (Köhn et al., 2020; Marks et al., 2021). Schliesslich wird der Konsum von Videostreaming durch «Addictive Design», personalisierte Angebote und Autoplay von Videostreaming-Anbietern weiter angekurbelt (Marks et al., 2021; The Shift Project, 2019). Daten- und Streamingflatrates sorgen gleichzeitig dafür, dass der Mehrkonsum keine zusätzlichen Kosten für die Nutzer verursacht. Dies wird unter anderem durch die stetige Erhöhung der Datenverarbeitungs- und -übertragungsraten sowie der Energieeffizienz der Rechenzentren und Telekommunikationsnetze ermöglicht.

Daten aus Deutschland zeigen, dass der tägliche Konsum von Videoinhalten von 4:08 Stunden in 2018 auf 4:19 Stunden in 2020 angestiegen ist, vor allem weil die Nutzung von Streaming-Portalen zugenommen hat, während die Nutzung des klassischen TVs stabil geblieben ist (Horizont Online, 2020).

Nettoeffekt

In ihrer Studie fassen Marks et al. (2021) zusammen, dass die Reboundeffekte gegenüber den Substitutionseffekten überwiegen und Videostreaming somit zu einer Zunahme des Energieverbrauchs führt. Obwohl die Endgeräte immer energieeffizienter werden, werden aufgrund steigender Auflösung sowie Mehrkonsum von Videos durch entsprechende Anreize von Streaming-Plattformen keine absoluten Energieeinsparungen erzielt. Telekommunikationsnetze werden zwar auch immer energieeffizienter, die Zunahme des Datenverkehrs, unter anderem aufgrund von Videostreaming, hebt die Effizienzgewinne jedoch aus. Es ist ausserdem zu erwarten, dass die Betreiber von Rechenzentren deren Energieeffizienz aufgrund physikalischer Grenzen nicht mehr in der gleichen Geschwindigkeit steigern können wie in der Vergangenheit.

Möglichkeiten zur Beeinflussung von THG-Emissionen

Anbieter

Telekommunikationsunternehmen sollten weiter die Energieeffizienz der Netze (z.B. durch den Einsatz von Glasfaser und 5G) steigern (Köhn et al., 2020), und diese mit Elektrizität aus erneuerbaren Energien betreiben. Zusätzlich könnten Anreize zum Datensparen geschaffen werden, indem Vertragsmodelle angeboten werden, welche datensparende Kunden belohnen.

Videostreaming-Anbieter sollten darauf achten, dass die Standardauflösung von Videos an die Displaygrösse und -auflösung der Endgeräte angepasst wird, vor allem in Hinblick auf Smartphones oder Tablets (Köhn et al., 2020). Die für den Betrieb der Plattform genutzten Rechenzentren sollten möglichst energieeffizient sein und mit Elektrizität aus erneuerbaren Energien betrieben werden. Besonders wichtig ist es, Praktiken, welche sich konsumsteigernd auswirken (z.B. «Addictive Design», über die automatische Wiedergabe von Videoinhalten auf Webseiten und Apps), zu vermeiden (Marks et al., 2021; The Shift Project, 2019).

Nutzer

Die THG-Emissionen des Videostreamings entstehen vor allem aufgrund des Betriebs der hierfür benötigten Endgeräte, der Telekommunikationsnetze und der Rechenzentren. Nutzer können vor allem über die Wahl des Endgeräts und der genutzten Telekommunikationsnetze die THG-Emissionen des Videostreamings beeinflussen. Dabei sind kleine, mobile Endgeräte mit kleinen Bildschirmen sowie kabelgebundene Netze oder mobile 5G-Netze die klimafreundlichste Wahl (Köhn et al., 2020; Stephens et al., 2021). Eine klimafreundliche Variante zu Videostreaming ist zudem das Fernsehen über die Antenne (Schien et al., 2020). Letztlich besteht der grösste Einfluss des Konsumenten in der Drosselung des eigenen Konsums.

1.2 Musikstreaming

Verbreitung

Streaming ist heute die beliebteste Art, Musik zu hören. Eine Studie von Bitkom (Klöß et al., 2019) zeigt, dass im Jahr 2018 fast die Hälfte (47%) des weltweiten Musikumsatzes mit Streaming-Modellen erzielt wurden, wohingegen physische Tonträger 25%, und Downloads 8% des Umsatzes ausmachen. Ähnlich ist es in Deutschland: 46% des Musikumsatzes wird durch Musikstreaming erwirtschaftet, 43% durch physische Tonträger, und 8% durch Downloads.

Bereitstellungseffekt

In der bereits unter Videostreaming diskutierten Studie von Tabata und Wang (2021) wurden die CO₂-Emissionen im Zusammenhang mit dem Hören und/oder Ansehen von Musik und Videos im Internet für das Jahr 2019 geschätzt. Diese zeigt, dass auch bei Musikstreaming das Endgerät entscheidend ist. Streaming über Desktop-Computer verursacht deutlich mehr THG-Emissionen (449 mg CO₂/MB mit und ohne Streaming Abo) als über Smartphones (2,98 mg CO₂/MB mit und ohne Streaming Abo). Die CO₂-Werte des Betriebs der Rechenzentren und Telekommunikationsnetze sowie der Herstellung und Entsorgung von Rechenzentren und Telekommunikationsnetzen sind die gleichen wie bereits unter Videostreaming erwähnt. Musikstreaming verursacht damit in Summe zwischen 143 und 588 mg CO₂/MB. Insgesamt wurden die CO₂-Emissionen durch Musikstreaming in Japan im Jahr 2019 auf etwa 113 kt CO₂ geschätzt.

Preist et al. (2019) schätzen den Stromverbrauch und die dadurch verursachten THG-Emissionen des Hörens und Ansehens von Musikvideos über YouTube global für 2016. Sie berücksichtigten die YouTube Rechenzentren, die Kern- und Randnetzwerke, die Mobilfunknetze, die Zugangsnetze der Privathaushalte, sowie die Endgeräte. Insgesamt errechnen sie einen Stromverbrauch von 19,6 TWh und 10,1 Mt CO₂e. Die Emissionen sind etwa vergleichbar mit denen eines Stadtgebiets wie Glasgow, Frankfurt, oder Quito. Darin berücksichtigten sie auch die Einsparungen von 116 kt CO₂e, die Google durch die Nutzung von erneuerbaren Energien für Rechenzentren erzielt hat. Mobilfunknetze verursachen den grössten Stromverbrauch (ca. 8'500 GWh/Jahr), gefolgt von den Endgeräten (ca. 6'100 GWh/Jahr), den Zugangsnetzen der Privathaushalte (ca. 4'200 GWh/Jahr), den Kern- und Randnetzwerken (ca. 1'900 GWh/Jahr) und den Rechenzentren (ca. 200 GWh/Jahr). Sie zeigen in ihrer Studie auch, dass das Streaming von Musikvideos über YouTube unnötigen Datenverkehr verursacht, wenn nur Musik gehört und das Video gar nicht angeschaut wird.

In einer US-Amerikanischen Studie analysieren Weber et al. (2010) den Download eines Musikalbums über das Internet. Dabei berücksichtigten sie den Stromverbrauch der Rechenzentren für den Betrieb des Online-Musikgeschäfts, die Datenübertragung über das Internet sowie der «Heim-Computer» für die Online-Bestellung. Nicht berücksichtigt wurden der Stromverbrauch für das Abspielen der Musik (z.B. über den Computer), sowie die Herstellung der Geräte und Infrastrukturen. Die Ergebnisse zeigen, dass ein heruntergeladenes Album 400 g CO₂ verursacht. Wird das heruntergeladene Album jedoch auf eine CD gebrannt, entstehen insgesamt ca. 700 g CO₂, und 1'300 g CO₂ falls noch eine Hülle verwendet wird. Hier wurden weder die Endgeräte für das Anhören der Musik berücksichtigt noch die Herstellung der Infrastrukturen und Endgeräte. Für eine ganzheitliche Betrachtung müssten diese noch ergänzt werden. Beim Musikstreaming ist eine besondere Herausforderung, dass dies häufig auch parallel zu anderen Nutzungsarten der Endgeräte stattfindet. Man kann z.B. den ganzen Tag lang über einen Computer oder ein Smartphone Musik hören und gleichzeitig arbeiten, lesen oder surfen.

Anwendungseffekt

Optimierungs- und Substitutionseffekt

Weber et al. (2010) analysierten eine Reihe von Szenarien eines Musikalbums, von der Aufnahme- bis zum Kauf resp. Downloads in CD- oder digitaler Form. Sie kamen zu dem Ergebnis, dass der Download eines digitalen Musikalbums trotz des erhöhten Energie- und Emissionsverbrauchs, der durch den Datenverkehr über das Internet verursacht wird, die CO₂-Emissionen im Vergleich zur Bereitstellung der Musik in Form einer physischen CD um 40% bis 80% reduziert.

George von der Keele University referenziert in einem Nachrichtenartikel (Peirson-Hagger & Swindells, 2021) auf zwei Untersuchungen (Peirson-Hagger, 2021; Stephens et al., 2021) und zeigt, dass eine Stunde Medienstreaming (55 g CO₂e/Stunde) deutlich weniger THG-Emissionen verursacht, als das Musikhören via CD (288 g CO₂e), und via Vinyl-Schallplatte (979,2 g CO₂e). Jedoch steigen die Emissionen des Musikstreamings bei längerer Hördauer, und entsprechen bereits nach fünf Stunden den CO₂e-Emissionen einer physischen CD, und nach 17 Stunden denen einer Vinyl-Schallplatte.

Quantis erhob für das Bundesamt für Umwelt Daten zum CO₂-Fussabdruck von Alltagshandlungen (ohne Angabe der Methode), unter anderem für eine Stunde lang Musik hören. Gemäss den Berechnungen verursacht eine Stunde FM-Radio hören am wenigsten Emissionen (10 g CO₂e/Stunde), gefolgt von Musikstreaming auf dem Smartphone (22 g), Live-Radio auf dem Laptop (31 g), und Replay-Radio auf dem Laptop (39 g, Radio Télévision Suisse, 2020).

Reboundeffekt

Streamen von Musik über das Internet verbraucht gegenüber der Bereitstellung von Musik über CDs pro abgespielter Minute weniger Energie. Die Kosten für den Konsum von Musik sind dadurch ebenfalls gesunken (Bieser & Coroamă, 2021). Eine Studie der Universität Glasgow und der Universität Oslo zeigt, dass ein Album auf einer Schallplatte im Jahr 1977 etwa 29 US-Dollar (Spitzenjahr des Schallplattenverkaufs) kostete, auf Kassette im Jahr 1988 etwa 17 US-Dollar (Spitzenjahr des Kassettenverkaufs), auf CD im Jahr 2000 etwa 22 US-Dollar (Spitzenjahr des CD-Verkaufs) und als digitales Album im Jahr 2013 etwa 11 US-Dollar (Brennan, 2019).

Die Tatsache, dass heutzutage praktisch überall, zu jeder Zeit, und nahezu umsonst Musik gehört werden kann, verändert das Musikkonsumverhalten grundlegend und führt zu einer Steigerung des Musikkonsums. Musikstreaming ist für einen Grossteil der Internetnutzer zu einem festen Bestandteil ihres Alltags geworden. Entsprechend der Aussage von George im oben genannten Nachrichtenartikel übersteigen die THG-Emissionen des Musikstreamings diejenigen von CDs bereits nach fünf Stunden Musik hören (Peirson-Hagger & Swindells, 2021).

In der oben genannten Bitkom-Studie (Klöß et al., 2019) wurden auch die Nutzerzahlen und das Musikkonsumverhalten für Deutschland ermittelt. In einer Umfrage, welche unter Internetnutzer ab 16 Jahren durchgeführt wurde, gaben 72% der Befragten an, Musik zu streamen. Davon gab ein Viertel (26%) davon an, mehrfach täglich oder dauerhaft Musik via Streaming zu hören, und 39% davon tun dies täglich. Musikstreaming ist somit für einen grossen, und immer grösser werdenden, Teil der Bevölkerung ein relevanter Bestandteil ihres Alltags. Eine globale Studie von IFPI (2021) zeigte, dass der wöchentliche Musikkonsum von 18 Stunden in 2019 auf 18,4 Stunden in 2021 gestiegen ist, wobei Streaming-Angebote die beliebteste Quelle sind (in der Studie wurden allerdings nur Internetnutzer befragt und die COVID-19 Pandemie könnte einen Effekt gehabt haben). Laut einer Studie von Nielsen (2017) ist der Musikkonsum in den USA von 23.5 Stunden/Tag in 2015 auf 32.1 Stunden/Tag in 2017 gestiegen, wobei Smartphones und Computer die beliebtesten Abspielgeräte waren.

Nettoeffekt

Die grundsätzlich geringeren THG-Emissionen des Musikstreamings werden durch das enorm gestiegene Konsumverhalten aufgehoben. Die mit dem Musikvertrieb verbundenen THG-Emissionen in den USA sind dementsprechend von 140 kt CO_{2e} 1977 (Herstellung von Plastik für Vinyl-Schallplatten) auf 200-350 kt CO_{2e} 2016 (Speicherung und Verteilung digitaler Musik) gestiegen (Brennan, 2019). Darin berücksichtigt sind allerdings nicht die THG-Emissionen, welche durch das Abspielen von Musik erzeugt werden.

Als Beispiel des angestiegenen digitalen Musikkonsums dient der Befund, dass das populäre Lied «Despacito» mit 4,6 Milliarden Streams innerhalb von sieben Monaten im Jahr 2017 so viel Strom verbraucht hatte wie der jährliche Stromverbrauch von Tschad, Guinea-Bissau, Somalia, Sierra Leone, und der Zentralafrikanischen Republik zusammen (Varghese, 2020).

Grundsätzlich gelten die Erkenntnisse von Marks et al. (2021) bezüglich Videostreaming auch für Musikstreaming. Der wichtigste Unterschied ist jedoch, dass Musikstreaming weniger Datenverkehr als Videostreaming verursacht.

Möglichkeiten zur Beeinflussung von THG-Emissionen

Anbieter

Analog zu den Erkenntnissen über Videostreaming sollten Telekommunikationsunternehmen weiter die Energieeffizienz der Netze und Rechenzentren steigern (Köhn et al., 2020), und diese mit Elektrizität aus erneuerbaren Energien betreiben (Marks et al., 2021; The Shift Project, 2019). Zusätzlich könnten Anreize zum Datensparen geschaffen werden, indem Vertragsmodelle angeboten werden, welche datensparende Kunden belohnen. Praktiken, welche Mehrkonsum fördern (z.B. Autoplay) und das Datenvolumen erhöhen (z.B. zwingende Übertragung von Videoinhalten) sollten vermieden werden. Hierzu sind vermutlich verbindliche Vorgaben von Gesetzgebern notwendig, da es laut Varghese (2020) unwahrscheinlich ist, dass Unternehmen, welche mit Musik Geld verdienen, Massnahmen zur Senkung des Musikkonsums ergreifen.

Nutzer

Wenn jemand mehr als fünf Stunden Musik hört, ist es nach George's Berechnungen emissionssparender, wenn dies über eine CD geschieht als über Streaming (Peirson-Hagger & Swindells, 2021). Zu traditionellen Medienformaten zurückzukehren oder die Verbraucher davon zu überzeugen, ihre Gewohnheiten zu ändern ist jedoch keine sinnvolle Lösung. Vielmehr sollten unter Nutzern ein Bewusstsein für die Umweltauswirkungen des Musikkonsums geschaffen werden, und Möglichkeiten zur Reduktion dieser aufgezeigt werden (Brennan & Devine, 2020). Wenn jemand zum Beispiel Musik über YouTube hört, werden automatisch Videodaten gesendet, auch wenn man sich nur für den Ton interessiert (welcher nur ein Zehntel der Datenmenge beträgt im Vergleich zum Video). Somit wird unnötig Energie verbraucht (Coroamă, 2020).

Nutzer können vor allem über die Wahl des Endgeräts und der genutzten Telekommunikationsnetze die THG-Emissionen des Videostreamings beeinflussen. Dabei sind kleine, mobile Endgeräte mit kleinen Bildschirmen sowie kabelgebundene Netze oder mobile 5G-Netze die klimafreundlichste Wahl (Köhn et al., 2020; Stephens et al., 2021). Eine klimafreundliche Möglichkeit, Musik zu streamen, vor allem wenn man sich nur für die Musik interessiert, ist es, eine «Audio-only» Variante zu wählen, oder, wenn via YouTube Musik gehört werden will, die entsprechende Browser-Registerkarte im Hintergrund laufen zu lassen (Preist et al., 2019). Auch für das Musikstreaming gilt, je kleiner das Endgerät, desto weniger THG-Emissionen werden verursacht (Stephens et al., 2021; Tabata & Wang, 2021). Musik herunterladen anstatt zu streamen kann die THG-Emissionen auch senken (Varghese, 2020), was allerdings heute nicht mehr als eine realistisch Option erscheint.

1.3 Online-Zeitung

Verbreitung

In der Schweiz werden laut zwei Studien aus den Jahren 2020/2021 Zeitungen und Zeitschriften vorwiegend in gedruckter Form (Print) gelesen. Die Reichweite von gedruckten Ausgaben, d.h. der Anteil an Personen ab 14 Jahren, der mit einer Zeitung in Kontakt gekommen ist, betrug in der Deutschschweiz aufgerundet 91%, in der Französischsprachigen Schweiz 84%, und in der Italienischsprachigen Schweiz 85%. Online-Ausgaben haben gemäss den Studien eine Reichweite von 64%, 61%, beziehungsweise 62%. Betrachtet man ausschliesslich die Tagespresse, so ist der Unterschied zwischen Print- und Online-Ausgaben geringer, und teilweise sogar umgekehrt: in der Deutschschweiz betrug die Reichweite von Print-Ausgaben 55% und von Online-Ausgaben 49%, in der französischsprachigen Schweiz 50% und 52%, und in der italienischsprachigen Schweiz 59% und 54% (Schweizer Medien, 2021).

In einer Umfrage aus dem Jahr 2017 unter Schweizer Medienkonsumenten wurden elektronische Printmedien von 29% der Befragten als wichtige Informationsquelle genannt, gefolgt von traditionellen Printmedien mit 24%. Online-Printmedien würden gemäss 39% der Befragten einen Zuwachs in den nächsten fünf Jahren erleben. Anders wurden Printmedien eingeschätzt: lediglich 7% waren der Meinung, dass die Nutzung zunehmen würde, während 54% von einer Abnahme ausging (Admeira, 2022).

Bereitstellungseffekt

In der Studie von Ahmadi Achachlouei et al. (2015) wurden die THG-Emissionen eines auf einem Tablet gelesenen Online-Magazins in Schweden für das Jahr 2010 ermittelt. Es wurden zwei Szenarien miteinander verglichen: die damals aufkommende Version des Magazins basierend auf den Zahlen für 2010 (mehr Print- als Online-Inhalte), und eine hypothetische, ausgereifte Version (gleich viel Print- wie Online-Inhalte). Die aufkommende Version umfasste pro Jahr 2'212 Online-Exemplare (9 Minuten Lesezeit) und 1'307'600 Print-Exemplare (41 Minuten Lesezeit). Die ausgereifte Version umfasste pro Jahr jeweils 653'500 Online- und Print-Exemplare (jeweils 41 Minuten Lesezeit). In der Studie berücksichtigten die Autoren die Inhaltsproduktion (z.B. Fotosessions, Geschäftsreisen, Gebäudeheizung sowie -kühlung), die elektronische Speicherung des Magazins in Rechenzentren, die Verteilung über Telekommunikationsnetze (einschliesslich Heimnetzwerk), sowie die Herstellung, den Betrieb und die Entsorgung (Recycling und Verbrennung) des Tablets (anteilig entsprechend der Zeit, in der das Tablet für das Lesen von Online-Zeitungen genutzt wird). Die Ergebnisse zeigen, dass die aufkommende digitale Version insgesamt 0.193 kg CO₂e pro Leser verursachte. Die Inhaltsproduktion verursachte mit Abstand am meisten THG-Emissionen (0.152 kg CO₂e/Leser), gefolgt von der elektronischen Speicherung und Verteilung (0.038 kg) und der Bereitstellung (Herstellung, Betrieb und Entsorgung) des Tablets (0.002 kg). Der im Verhältnis grosse Anteil an THG-Emissionen der Inhaltsproduktion ist darauf zurückzuführen, dass die Emissionen auf wenige Leser verteilt wurden. Für das hypothetische Szenario der ausgereiften digitalen Version errechneten die Autoren dementsprechend geringere Emissionen mit insgesamt 0.074 kg CO₂e/Leser. Bei diesem Szenario machte die Speicherung und Verteilung mit 0.045 kg CO₂e/Leser den verhältnismässig grössten Anteil aus, gefolgt von der Inhaltsproduktion (0.019 kg) und der Bereitstellung (Herstellung, Betrieb und Entsorgung) auf dem Tablet (0.009 kg).

Arushanyan et al. (2014) verglichen die THG-Emissionen einer finnischen Morgen- und Abendzeitung, welche beide gedruckt und online publiziert wurden. Die Online-Version der Morgenzeitung wurde von geschätzt 237'196 Personen gelesen, die Online-Version der Abendzeitung von geschätzt 1'796'684 Personen. Bei der Online-Zeitung wurden die THG-Emissionen pro Leser und Woche unter Berücksichtigung der Inhaltsproduktion, der Speicherung und der Verteilung der Inhalte (Hochladen

der Inhalte auf einen Server und Zugriff der Nutzer auf die Zeitungen vom Server), sowie der Herstellung, des Betriebs und der Entsorgung der Lesegeräte (Desktop-Computer oder Laptop, zu Hause oder im Büro) geschätzt. Die mit der Herstellung und Entsorgung der Lesegeräte verbundenen THG-Emissionen wurden anteilig nach der Nutzungsdauer für das Lesen von Online-Zeitungen zugeordnet. Bei der Morgenzeitung verursachte die Inhaltsproduktion den grössten Anteil der THG-Emissionen (ca. 50%), gefolgt von der Herstellung und Entsorgung der Lesegeräte (31%), und deren Betrieb (ca. 18%). Die elektronische Verteilung verursachte kaum THG-Emissionen (ca. 1%). Bei der Abendzeitung verursachten die Herstellung und Entsorgung der Lesegeräte die meisten THG-Emissionen (ca. 41%), gefolgt von deren Betrieb und der elektronischen Verteilung (je ca. 24%). Die Inhaltsproduktion verursachte die wenigsten THG-Emissionen (ca. 10%) pro Leser und Woche, da sie von mehr Personen gelesen wurde.

Beide Studien zeigen, dass die Inhaltsproduktion bei Online-Ausgaben mit einer relativ geringen Leserzahl den grössten Anteil an THG-Emissionen verursacht. Bei hohen Leserzahlen ist dies jedoch nicht der Fall, da die THG-Emissionen der Inhaltsproduktion auf mehrere Personen verteilt werden.

Arushanyan et al. (2014) zeigen, dass bei hohen Leserzahlen die Bereitstellung von Computern und Bildschirmen am meisten THG-Emissionen verursacht, gefolgt von der Verteilung. Bei Ahmadi Achachlouei et al. (2015) verursacht die elektronische Speicherung und Verteilung bei hohen Leserzahlen die meisten THG-Emissionen, gefolgt von der Inhaltsproduktion und dem Tablet. Daher sollte für eine Reduktion der Emissionen auf THG-effiziente Lesegeräte (z.B. E-Book-Reader anstatt Computer) zurückgegriffen und diese möglichst lange genutzt werden. Zusätzlich können die THG-Emissionen der Infrastrukturen (Rechenzentren und Telekommunikationsnetze) für die Speicherung und Verteilung der Online-Zeitung gesenkt werden, z.B. über die Verringerung des Datenvolumens pro Ausgabe, die Erhöhung der Energieeffizienz und den Einsatz von Elektrizität aus erneuerbaren Energien im Betrieb.

Anwendungseffekt

Optimierungs- und Substitutionseffekt

Ahmadi Achachlouei und Moberg (2015) verglichen ein Referenzszenario der Print-Ausgabe mit der aufkommenden Online-Ausgabe sowie der hypothetischen, ausgereiften Online-Ausgabe des Magazins pro Leser. Ihren Berechnungen zufolge entsteht während dem gesamten Lebenszyklus der Print-Ausgabe 0,149 kg CO₂e/Leser. Die aufkommende Version des Online-Magazins verursachte mehr THG-Emissionen (0,193 kg CO₂e/Leser), und die ausgereifte Online-Version weniger THG-Emissionen (0,074 kg CO₂e/Leser). Dies ist darauf zurückzuführen, dass bei der ausgereiften Version mit wesentlich mehr Lesern gerechnet wird, die das Magazin pro Ausgabe länger lesen. Die Autoren gehen davon aus, dass, wenn die Hälfte der Print-Exemplare durch Online-Exemplare ersetzt werden würde, wie im hypothetischen, ausgereiften Szenario, Einsparungen in der Grössenordnung von 380 t CO₂e pro Jahr erzielt werden könnten. Zum Vergleich, die gesamten THG-Emissionen des schwedischen Konsums im Jahr 2003 beliefen sich auf 95 Mt CO₂e. Die Autoren weisen jedoch darauf hin, dass die Gesamtzahl der Leser für die Online-Ausgabe, die Anzahl der Leser pro Exemplar der Print-Ausgabe, die Dateigrösse und die allgemeine Nutzung des Tablets ausschlaggebende Annahmen sind. Bei grösserer Dateigrösse oder kürzerer Gesamtnutzung des Tablets (inkl. der Nutzung für andere Zwecke) steigt die THG-Auswirkung pro Exemplar. Auch kommt es auf die funktionale Einheit an: Pro Exemplar verursacht die Print-Ausgabe mehr THG-Emissionen als die beiden Online-Ausgaben, pro Lesestunde verursacht die aufkommende Online-Ausgabe deutlich mehr THG-Emissionen als die ausgereifte Online- sowie Print-Ausgabe. Dies liegt daran, dass die aufkommende Online-Ausgabe nur kurz (im Durchschnitt 9 Minuten) von wenigen Personen gelesen wird und somit die Emissionen der Inhaltsproduktion pro Zeiteinheit sehr ins Gewicht fallen.

In der Studie von Arushanyan et al. (2014) wurden die Morgen- und Abendexemplare der Online-Ausgabe mit der Print-Ausgabe verglichen. Vergleicht man die THG-Emissionen pro Leser und Woche für die Print- und Online-Ausgabe der Morgenzeitung (einschliesslich der Sonntagsbeilage für die Print-Ausgabe), zeigt sich, dass die Online-Ausgabe weniger als 5% der THG-Emissionen der Print-Ausgabe verursacht. Bei der Abendzeitung ist der Unterschied geringer, aber die Online-Ausgabe hat nach wie vor eine deutlich geringere THG-Auswirkung als die Print-Ausgabe. Vergleicht man die THG-Emissionen der Online- und Print-Ausgabe in Bezug auf eine Lesestunde fielen die Ergebnisse jedoch anders aus. Bei der Morgenzeitung verursachte die Online-Ausgabe weiterhin geringere THG-Emissionen als die Print-Ausgabe. Für die Abendzeitung verursachte die Online-Ausgabe deutlich mehr THG-Emissionen als die Print-Ausgabe. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Print-Ausgabe der Abendzeitung mehr Leser pro Exemplar als die Abendzeitung hatte (und länger gelesen wurde) wodurch die Emissionen pro Lesestunde fallen. Zusätzlich wurde die Online-Ausgabe der Abendzeitung länger gelesen, wodurch der Stromverbrauch für die Verteilung der Daten und das Lesegerät steigt. Letzteres verdeutlicht einen inhärenten Unterschied zwischen den beiden Medienangeboten. Bei der Online-Ausgabe steigen die Emissionen, je länger eine Person liest (und herunterlädt), während bei der Print-Ausgabe die Klimaauswirkungen nicht von der Lesedauer abhängen.

Reboundeffekt

Wir konnten keine Studie finden, welche den Reboundeffekt von Online-Zeitungen quantifiziert. Ein konsumsteigernder Effekt erscheint jedoch als wahrscheinlich, da das Internet den Zugang zu Artikeln einer grossen Anzahl an Medienunternehmen (aber auch von Privatpersonen) oft umsonst ermöglicht. Durch Verlinkungen zwischen Artikeln können Nutzer schnell von Artikel zu Artikel springen und kontinuierlich weiterlesen. Zusätzlich können in Online-Zeitungen auch weitere Medienformate (wie Videos) auf einfache Weise eingebettet werden, wodurch das Datenvolumen und die damit verbundenen THG-Emissionen steigen kann.

In Deutschland hat sich die Auflage verkaufter Online-Zeitungen zwischen 2015 und 2021 mehr als verdreifacht (Statista Research Department, 2022d). Statista schätzt, dass im Jahr 2017 etwa 46 Millionen Menschen in Deutschland Print-Zeitungen und -Magazine und 31 Millionen Online-Zeitungen lasen, und sich das Verhältnis bis 2025 umkehrt, mit 25 Millionen Print-Lesern und 40 Millionen Online-Lesern (Statista Research Department & Brandt, 2021). Insgesamt würde dies bedeuten, dass die Anzahl an Lesern von 97 Millionen in 2017 auf 65 Millionen abnimmt. Ein etwaiger Reboundeffekt kann hier jedoch nicht isoliert betrachtet und quantifiziert werden, da mehrere Effekte, wie die Zunahme online veröffentlichter Inhalte durch Unternehmen und Privatpersonen oder Leserschwund gleichzeitig auftreten.

Nettoeffekt

Der Nettoeffekt lässt sich nicht eindeutig bestimmen, da dieser von vielen Faktoren abhängt. Die wichtigsten sind:

- Die Anzahl der produzierten Print-Ausgaben vor und nach der Einführung der Online-Ausgabe
- Die Dateigrösse der Online-Ausgabe
- Die Anzahl der Leser der Online-Ausgabe und deren Lesedauer
- Das für das Lesen genutzte Gerät

Werden Online-Zeitungen jedoch lange und häufig gelesen, so steigen die THG-Emissionen, da für die Datenübertragung und das Lesegerät Strom benötigt wird. Dies ist bei der Print-Ausgabe nicht der Fall, da nur in der Herstellung und Verteilung THG-Emissionen anfallen. Zusätzlich kann ein Print-Exemplar auch von mehreren Personen gelesen werden, wodurch die THG-Emission pro Leser fallen

(Plüss, 2015). Gleichzeitig sinken bei steigender Anzahl Leser jedoch auch die Emissionen der Inhaltsproduktion pro Leser, in der Print- als auch in der Online-Ausgabe.

In den oben betrachteten Beispielen verursachen die Online-Ausgaben tendenziell weniger THG-Emissionen pro Leser oder pro Exemplar, jedoch mehr pro Lesestunde. Greenpeace geht davon aus, dass im Durchschnitt die THG-Emissionen der Online-Ausgaben «eher» geringer sind als die der Print-Ausgaben. Jedoch gilt laut Greenpeace auch: «Wird eine Papierzeitung von mehr als drei Leuten oder mehr als eine halbe Stunde lang gelesen, ist sie ökologischer als eine elektronische» (Plüss, 2015). Generell ist auch davon auszugehen, dass Online-Ausgaben in vielen Fällen Print-Ausgaben gar nicht ersetzen sondern zusätzlich gelesen werden (Arushanyan et al., 2014).

Möglichkeiten zur Beeinflussung von THG-Emissionen

Anbieter

Medienunternehmen können vor allem die THG-Emissionen der Inhaltsproduktion, der Speicherung und Verteilung von Print- und Online-Ausgaben beeinflussen. Arushanyan et al. (2014) empfehlen die THG-Emissionen der Inhaltsproduktion zum Beispiel über die Reduktion von Geschäftsreisen, die Nutzung erneuerbarer Energien, der Einführung von Energieeffizienzlösungen (z.B. von Rechenzentren), oder die längere Nutzung von IT-Geräten in der Redaktion, zu senken. Um die Emissionen der Speicherung von Online-Zeitungen zu senken, sollten (analog zu E-Books) datensparsame Dateiformate verwendet, und energieeffiziente Rechenzentren eingesetzt werden, welche mit Strom aus erneuerbaren Energien betrieben werden. Telekommunikationsunternehmen können über THG-effiziente Netze, die THG-Emissionen der Verteilung senken.

Medienunternehmen sollten ihre Web-Auftritte so gestalten, dass möglichst wenig Daten verarbeitet werden müssen, z.B. durch das Vermeiden von Autoplay, falls Videos eingebettet sind. Zusätzlich können Medienunternehmen ihre Leser durch die Bereitstellung von Informationen zu den Klimaauswirkungen der Mediennutzung für das Thema sensibilisieren. Die Praxis von Medienunternehmen, Print- und Online-Ausgaben gebündelt zu verkaufen (z.B. durch Online-Zugangscodes in den Print-Ausgaben), wirkt sich eher emissionssteigernd aus und sollte aus Sicht des Klimaschutzes vermieden werden.

Nutzer

Gemäss Arushanyan et al. (2014) tragen von Seiten der Leser die Lesegeräte (Herstellung und Nutzung) am meisten zur Klimabelastung des Lesens von Online-Zeitungen bei. Daher sollten, analog zu E-Book-Readern, möglichst wenig neue Geräte für das Lesen von Online-Zeitungen beschafft, diese möglichst lang genutzt, für möglichst viele Zwecke eingesetzt, und umweltgerecht entsorgt werden. Lesegeräte können auch in einem Haushalt geteilt werden. Wird ein neues Gerät beschafft, sollte das Gerät möglichst energieeffizient in der Herstellung und im Betrieb sein (z.B. E-Book-Reader anstatt Computer) und die Inhalte über kabelgebundene Anschlüsse oder energieeffiziente Mobilfunknetze (z.B. 5G) heruntergeladen werden.

Ideal wäre es, wenn sich Leser entscheiden würden, und entweder die Print- oder Online-Ausgabe, jedoch nicht beides, lesen. Tendenziell sollten Personen, welche sehr lange Zeitung lesen, eher Print-Ausgaben nutzen, und diese idealerweise mit mehreren Personen teilen. Personen, die in jedem Fall Online-Zeitung lesen, sollten vermeiden, zusätzlich Print-Ausgaben zu kaufen. Ab welcher Anzahl Leser und welcher Lesedauer welche Variante vorteilhaft ist, lässt sich auf Basis der bestehenden Literatur jedoch nicht eindeutig sagen und hängt auch von der Dateigrösse und dem genutzten Lesegerät ab.

Schliesslich können durch die Verringerung des Lesens von Online-Zeitungen Emissionsreduktionen erzielt werden. Der Nutzen der Emissionsreduktion müsste allerdings mit dem Nutzen des Lesens von

Zeitungen verglichen werden, was kaum möglich ist. Um zielgerichtete Massnahmen ergreifen zu können, sollte das Leseverhalten genauer untersucht werden und verschiedene Zukunftsszenarien und deren Auswirkungen auf die gesamten THG-Emissionen des Medienkonsums (Print, Online, Video, Radio, etc.) bestimmt werden.

1.4 E-Book-Reader

Verbreitung

Eine Bibliotheksstatistik zeigt, dass der Anteil von E-Books am gesamten Büchermarkt steigt: während 2013 noch 370'000 Bücher in elektronischer Form in Bibliotheken ausgeliehen wurden, waren es 2017 zwei Millionen (Wermelinger, 2018) und 2020 über 8 Millionen (Bundesamt für Statistik, 2021b). Einer Erhebung des Bundesamts für Statistik (2020) zufolge nimmt der Anteil Personen, die E-Books lesen, deutlich zu. Während 2014 etwas über 15% elektronische Bücher gelesen haben, waren es 2019 bereits 25%. Diese Entwicklung findet sowohl im Privaten (von 12% auf 19%) als auch in der Arbeit oder Ausbildung statt (von 6% auf 11%). Da der stationäre Buchhandel zu Beginn der COVID-19-Pandemie geschlossen wurde, ist davon auszugehen, dass der Absatz von E-Books in den letzten Jahren weiter zugenommen hat (Börsenblatt, 2020). Der Anteil an E-Books am gesamten Büchermarkt liegt jedoch weiterhin unter 10% (Statista Research Department, 2022e; Wermelinger, 2018). Für die Zukunft wird angenommen, dass Papierbücher den Büchermarkt dominieren werden (Wermelinger, 2018).

Zum Absatz von E-Book-Readern in der Schweiz konnten keine öffentlich verfügbaren Statistiken gefunden werden. In Deutschland ist der jährliche Absatz von E-Book-Readern zwischen 2013 und 2015 gesunken (Statista Research Department, 2022a), und im Jahr 2016 waren in etwa 13% der deutschen Haushalte E-Book-Reader vorhanden (Statista Research Department, 2022b).

Bereitstellungseffekt

In einer schwedischen Studie von Moberg et al. (2011) wurden die THG-Emissionen der Bereitstellung eines E-Book-Readers mit denen eines 360-seitigen konventionellen Papierbuchs verglichen, in Bezug auf ein gelesenes Buch als funktionale Einheit. Darin berücksichtigt wurden die THG-Emissionen der Herstellung, des Betriebs sowie der Entsorgung des E-Book-Readers, die redaktionelle Arbeit für die Erstellung und elektronische Veröffentlichung des Buchs sowie die Downloads des E-Books. Gemäss der Studie beträgt der gesamte Bereitstellungseffekt des Lesens eines E-Books 0,87 kg CO₂e (bei durchschnittlich 48 gelesenen E-Books während der Nutzungsdauer eines E-Book-Readers). Die Produktion der E-Book-Reader verursacht dabei mit grossem Abstand die meisten THG-Emissionen, absolut und pro gelesenen Buch. Durch das Recycling von Metallen und durch Energierückgewinnung aus der Abfallverbrennung können geringfügig THG-Emissionen vermieden werden.

In einer Masterarbeit zu E-Books in den USA aus dem Jahr (2003) verglich Kozak die Bereitstellung eines 500-seitigen Papierbuchs mit der eines E-Book-Readers. Er kam zu dem Ergebnis, dass die Bereitstellung eines E-Book-Readers 60 kg CO₂e verursacht. Die Nutzungsphase verursacht dabei mit 38 kg CO₂e den grössten Teil der THG-Emissionen des E-Book-Readers. Zu erwähnen ist, dass die Studie vor fast 20 Jahren durchgeführt wurde. Aufgrund des technologischen Fortschritts sind die Ergebnisse heute hauptsächlich von historischem Interesse. Zudem wurde im Vergleich zu der Studie von Moberg et al. (2011) eine andere funktionale Einheit gewählt.

Beide Studien betrachten ausschliesslich E-Book-Reader. Allerdings können E-Books auch auf anderen Geräten wie Smartphones, Tablets oder Laptops gelesen werden. Da bei allen diesen Geräten die meisten THG-Emissionen in der Herstellung verursacht werden (Hilty & Bieser, 2017), können THG-Emissionen eingespart werden, wenn möglichst wenig Geräte hergestellt werden. Wenn Konsumenten

also bereits einen Laptop oder ein Tablet besitzen, so ist es vorteilhaft, wenn diese Geräte für das Lesen von E-Books genutzt werden, anstatt einen neuen E-Book-Reader anzuschaffen (Moberg et al., 2011).

Anwendungseffekt

Optimierungs- und Substitutionseffekt

Würde ein E-Book-Reader nur für ein einziges E-Book genutzt, so verursachen die Bereitstellungseffekte dieses E-Books etwa gleich viel THG-Emissionen wie 30-40 Papierbücher (Moberg et al., 2011). Geht man davon aus, dass ein Papierbuch zwei Mal gelesen wird, so verursacht das E-Book schon gleich viel Emissionen wie 60-80 Papierbücher. In der Studie von Kozak (2003) verursacht die Bereitstellung eines E-Book-Readers mit 60 kg CO_{2e} deutlich weniger THG-Emissionen als ein Papierbuch, welches er auf 218 kg CO_{2e} schätzte. Somit lohnt sich die Anschaffung eines E-Book-Readers laut Moberg et al. (2011) dann, wenn dadurch die Herstellung von etwa 30-40 Papierbüchern vermieden wird, und laut Kozak bereits, wenn die Herstellung eines Papierbuchs vermieden wird. Da die Studie von Kozak deutlich älter und nicht aus Europa ist, sind die Ergebnisse der Studie von Moberg et al. (2011) aussagekräftiger für die derzeitige Situation in der Schweiz.

Reboundeffekt

Es wurde keine Studie gefunden, welche den Reboundeffekt von E-Books bzw. E-Book-Readern systematisch untersucht hat. Da durch den E-Book-Reader der Bezug von Büchern einfacher und ggf. auch günstiger wird, gehen wir davon aus, dass die Anzahl an gelesenen Büchern durch E-Book-Reader steigen könnte.

Nettoeffekt

Gemäss Moberg et al. (2011) lohnt sich die Anschaffung und Nutzung eines E-Book-Readers, sofern der Kauf und die Herstellung von 30-40 neuen Büchern vermieden wird. Es wurde jedoch nicht untersucht, ob die Anschaffung eines E-Book-Readers tatsächlich den Kauf und damit die Herstellung von Papierbüchern vermeidet, und somit der Substitutionseffekt tatsächlich eintritt. Auch werden zunehmend mehr Bücher in Form von Hörbüchern gestreamt (SBVV, 2022).

Ob sich ein Wechsel von Papierbüchern zu einem E-Book-Reader lohnt, hängt vor allem von vier Faktoren ab:

- Ob für das Lesen von E-Books ein neues Gerät beschafft wird
- Die THG-Emissionen der Herstellung des Geräts
- Die Nutzungsdauer des Geräts
- Wie viele Papierbücher durch die Nutzung von E-Book-Readern weniger hergestellt werden

Möglichkeiten zur Beeinflussung von THG-Emissionen

Anbieter

Da die Herstellung des E-Book-Readers die meisten THG-Emissionen verursacht, absolut und pro gelesenem Buch, sollten vor allem die THG-Emissionen in der Herstellung gesenkt werden, zum Beispiel durch die Nutzung von erneuerbaren Energien in der Produktion. Zusätzlich sollten die Geräte für eine lange Lebensdauer ausgelegt sein. Die Geräte sollten so entworfen werden, dass Konsumenten möglichst wenig Geräte besitzen. Zum Beispiel sollten sich E-Books in allen gängigen Formaten (z.B. PDF, ePUB) und von allen Anbietern beziehen und anzeigen lassen (Wermelinger, 2018). Unternehmen, welche E-Books zum Download bereitstellen, sollten möglichst datensparsame Dateiformate nutzen, die Daten in energieeffizienten Rechenzentren speichern, welche mit Elektrizität

aus erneuerbaren Energien betrieben werden. Zusätzlich können Anreize geschaffen werden, um auf den Kauf von Papierbüchern zu verzichten, z.B. durch Abonnements für E-Books.

Nutzer

Ein E-Book-Reader sollte hauptsächlich von Menschen genutzt werden, die viele konventionelle Papierbücher lesen und diese in der Regel neu beschaffen. Sofern jemand schon ein Gerät, welches für das Lesen von E-Books geeignet ist, besitzt (z.B. ein Tablet), sollte kein weiterer E-Book-Reader beschafft werden. Auch können Geräte von mehreren Personen in einem Haushalt geteilt werden. Die Geräte sollten dann auch für möglichst viele Zwecke, wie das Lesen von Büchern, Zeitungen, Zeitschriften und anderen Dokumenten verwendet werden. Das Lesegerät sollte auch möglichst lange genutzt werden und am Ende der Lebensdauer einer Zweitnutzung zugeführt oder ordnungsgemäss entsorgt werden, so dass eine stoffliche Wiederverwertung möglich ist (Moberg et al., 2011). Personen, die E-Books lesen, sollten möglichst darauf verzichten, Papierbücher zu kaufen und diese wenn möglich ausleihen.

2 E-Commerce

2.1 Online-Versandhandel inkl. Lebensmittellieferdienste

Verbreitung

Online einzukaufen ist in der Schweiz sehr beliebt. Mehr als zwei Drittel (67%) der Schweizer Bevölkerung im Alter von 15 bis 88 Jahren hat zur Zeit einer Befragung des Bundesamts für Statistik im Jahre 2021 angegeben, in den letzten drei Monaten mindestens einen Online-Einkauf getätigt zu haben. Im Vergleich zu 2019 ist diese Zahl um ca. 3 Prozentpunkte leicht zurückgegangen (Bundesamt für Statistik, 2021a). Gemäss der Medienmitteilung des Bundesamts für Statistik (2021a) liegt der Grund für diesen Rückgang in der Pandemie, die zu einem Verkaufseinbruch von Produkten wie Flugtickets, Ferienunterkünften, Eintrittskarten für Sport- oder Kulturveranstaltungen u. ä. geführt hat. Andere Segmente haben jedoch einen Aufschwung erhalten. Laut einer Befragung der ZHAW haben Bestellungen in den Bereichen Garten & Do It Yourself, Computer & Zubehör, Sport, sowie Lebensmittel zugenommen (Zumstein & Oswald, 2020).

Der Umsatz des Online-Handels hat seit Beginn der COVID-19-Pandemie massiv zugenommen (Zumstein & Oswald, 2020). Im Jahr 2021 verzeichnete der Online-Handel gegenüber 2019 einen fast 40%-igen Zuwachs, von 10.3 Milliarden CHF in 2019 auf 14.4 Milliarden CHF in 2021 (Handelsverband.swiss, 2022). Vor allem Online-Lebensmittelhändler konnten ihre Umsätze im Jahr 2020 gegenüber dem Vorjahr massiv steigern, allen voran Migros Online (von 190.0 Millionen CHF auf 266.0 Millionen CHF), Coop Online (von 159.4 Millionen CHF auf 231.8 Millionen CHF), und Farmy.ch (von 9.6 Millionen CHF auf 26.0 Millionen CHF, Lang, 2021).

Bereitstellungseffekt

Bei der Analyse der THG-Emissionen von Online-Versandhandel und/oder Lebensmittellieferungen befassen sich die meisten wissenschaftlichen Arbeiten mit der Auslieferung auf der letzten Meile sowie der Verpackung der gelieferten Ware (Frick & Matthies, 2020).

In einer Schweizer Studie analysierte Hischier (2018) den Online-Versandhandel von Kleidung anhand einer Lebenszyklusanalyse. Als funktionale Einheit wurde «der Gesamtkauf von neuer Kleidung einer Person über den Zeitraum von einem Jahr» definiert. Berücksichtigt wurden der Betrieb eines Laptops sowie der nötigen Internetinfrastruktur für den Online-Kauf, der Transport der Kleidung von der Produktionsstätte zum Verteilzentrum, der Transport der Kleidung vom Verteilzentrum zur Verkaufsstelle, der Transport der Kleidung zum Kunden sowie zurück zur Verkaufsstelle, und die Herstellung und Entsorgung von Kartonschachteln. Etwas mehr als ein Drittel der THG-Emissionen

entsteht im Zusammenhang mit den Kartonschachteln (34,8%), gefolgt vom Transport der Kleidung vom Verteilzentrum zur Verkaufsstelle (17,5%), von der Produktionsstätte zum Verteilzentrum (17,4%) und der Lieferung zum Kunden (17,2%). Das Retournieren der Kleidung ist verantwortlich für 9% der THG-Emissionen, und der Online-Kauf für 4,2%.

Im Rahmen einer Masterarbeit wurden die THG-Emissionen der letzten Meile zweier Online-Versandhandel-Szenarien in Deutschland berechnet (Borowsky et al., 2019). Dafür wurde ein Warenkorb als Vorlage genommen, welcher die Menge und Zusammensetzung eines typischen Haushaltseinkaufs beinhaltete, wobei Bekleidung und Elektronik als Hauptproduktkategorien betrachtet wurden. Im ersten, konventionellen Online-Versandhandel-Szenario wurde die online bestellte Ware durch einen Paketdienstleister mit Lieferwagen an den Endkunden geliefert. Im zweiten Online-Versandhandel-Szenario wurden die Pakete mit LKWs an ein Mikrodepot, und dann mit elektrischen Lastenrädern zu den Kunden geliefert. Insgesamt verursachte das konventionelle Online-Versandhandel-Szenario deutlich mehr THG-Emissionen (0,8278 kg CO_{2e} pro Paket) als das Lastenrad-Szenario (0,4899 kg CO_{2e} pro Paket). Dies ist vor allem darauf zurückzuführen, dass der Transport der letzten Meile mit den Mikrodepots und dem Lastenrad weniger THG-Emissionen verursacht als die Verteilung mit einem Lieferwagen.

Eine weitere Studie zeigt, dass Pickup-Stationen, bei denen die Waren an einer Abholstelle hinterlegt und von den Konsumenten selbst abgeholt werden, THG-effizienter als die Auslieferung der Produkte zu den Haushalten ist (CityLogistics, 2020).

In einer Studie haben Siikavirta et al. (2008) die möglichen THG-Emissionen von Online-Lebensmittellieferungen anhand unterschiedlicher Szenarien in Finnland untersucht. In zwei Szenarien wird die Lebensmittellieferung vom Käufer zu unterschiedlichen, jedoch bestimmten Zeiten zuhause entgegengenommen (Lieferung in einem 1-stündigen Zeitfenster zwischen 12-21 Uhr; Lieferung in einem von drei angebotenen 2-stündigen Zeitfenstern zwischen 17-21 Uhr). In zwei anderen Szenarien werden die bestellten Lebensmittel in einer Empfangsbox vor der Haustüre hinterlegt, einmal zu einer bestimmten Zeit (Zeitfenster zwischen 8-18 Uhr), und einmal wird der bestmögliche Lieferzeitpunkt aus Sicht des Lieferdienstes gewählt (Lieferung innerhalb einer Woche zwischen 8-18 Uhr). Die Empfangsbox ist mit einer Kühl- Gefrier- und Raumtemperatureinheit ausgestattet. Für die Berechnungen eines typischen Warenkorbes wurden Daten aus einer Stichprobe von Lebensmitteleinkäufen bei einem der grössten Lebensmittelhändler in Finnland angenommen. Als Transportmittel wurde ein dieselbetriebener Lieferwagen verwendet. Die Herstellung der Verpackung wurde nicht berücksichtigt. Ihre Berechnungen zeigen, dass die effizienteste Zustelloption mit den geringsten THG-Emissionen diejenige ist, bei der die Lieferung zum aus Sicht des Zustelldienstes bestmöglichen Zeitpunkt an eine Empfangsbox erfolgt. Die Zustellung an eine Empfangsbox zu einer bestimmten Zeit ist ebenfalls THG-effizient. Darauf folgt die Lieferung in einem von drei angebotenen 2-stündigen Zeitfenster zwischen 17 und 21 Uhr. Die energieaufwendigste Option ist es, wenn der Lebensmittellieferdienst den Kunden in einem Zeitfenster von einer Stunde beliefert. In diesem Fall sind die Möglichkeiten des Lieferdienstes, die Route des Lieferwagens zu optimieren, stark eingeschränkt, wodurch mehr gefahren werden muss.

Eine Studie vom Massachusetts Institute of Technology (MIT) untersuchte den THG-Fussabdruck des Online-Versandhandels anhand unterschiedlicher Simulationen in den USA (Fernández Briseño et al., 2020). Für ihre Berechnungen verwenden sie einen durchschnittlichen Warenkorb des Online-Handels aus den USA. In der Studie fokussieren sich die Autoren auf die für die Lieferung auf der letzten Meile notwendigen Schritte: die THG-Emissionen aus dem Energieverbrauch von Gebäuden (z.B. Verteilzentren), der Treibstoffverbrauch der Transportmittel, sowie die Herstellung der Verpackung. Gemäss den Berechnungen sind die grössten THG-Emissionsverursacher die Verpackung, gefolgt vom Transport der Waren (inkl. Retouren), und den Gebäuden.

Zusammengefasst lässt sich feststellen, dass beim Online-Versandhandel und Lebensmittellieferdiensten die Verpackung der zu liefernden Produkte sowie die Lieferung über die letzte Meile (sofern sie mit einem mit fossilen Brennstoffen betriebenen Fahrzeug geliefert werden) den Grossteil der THG-Emissionen verursachen.

Nur Hischier (2018) berücksichtigt die THG-Emissionen aus dem Betrieb der IKT-Endgeräte und -Infrastrukturen für die Bestellung und kommt zu dem Ergebnis, dass sie deutlich kleiner sind, als die THG-Emissionen aus den anderen Prozessschritten. Er berücksichtigt allerdings nicht die Herstellung der Geräte und Infrastrukturen, welche vor allem bei Endgeräten erhebliche THG-Emissionen verursachen kann.

Anwendungseffekt

Optimierungs- und Substitutionseffekt

In der oben erwähnten Studie von Hischier (2018) wurde der Online-Versandhandel von Kleidung mit deren Kauf in einem stationären Geschäft verglichen. Bei letzterem Szenario wurde der Transport der Kleidung von der Produktionsstätte zum Verteilzentrum, der Transport der Kleidung vom Verteilzentrum ins Geschäft, die Autofahrt in die Stadt, und die Herstellung der Einkaufstaschen berücksichtigt. Die Autofahrt in die Stadt machte mit 88,5% den mit Abstand grössten Teil der THG-Emissionen aus. Der Transport der Kleidung von der Produktionsstätte zum Verteilzentrum, und vom Verteilzentrum zur Verkaufsstelle machten je 4,3% aus, und die Einkaufstaschen 2,9%. Zusätzlich wurde ein Vergleich zwischen einem Szenario des stationären Einkaufs (unter der Annahme, dass drei Mal im Jahr mit dem Auto in die Stadt gefahren wird um einzukaufen) und dem Online-Versandhandel-Szenario (unter der Annahme, dass die gleiche Anzahl Kleidung online gekauft wird) angestellt. Der Vergleich macht deutlich, dass der Online-Versandhandel eine fast viermal geringere Auswirkung auf THG-Emissionen hat als der stationäre Einkauf. Wird beim stationären Einkauf anstelle des eigenen Autos die Bahn genommen, verringern sich die Gesamtauswirkungen um einen Faktor von etwa sieben. Die Nutzung eines Busses oder der Umstieg von einem benzinbetriebenen Auto auf ein Elektroauto verringert die Gesamtauswirkungen ebenfalls um einen Faktor von etwa drei, wobei das Verkehrsmittel nach wie vor ein dominierender Verursacher der THG-Emissionen bleibt. Neben dem Verkehrsmittel ist die zurückgelegte Distanz ebenfalls entscheidend für die Gesamtauswirkungen.

In der finnischen Studie von Siikavirta et al. (2008) wurden die vier Lebensmittellieferdienst-Szenarien mit dem Szenario, in dem die Konsumenten ihr eigenes Auto für den Einkauf in einem Lebensmittelladen benutzen, verglichen. Die Autoren gehen in ihren Berechnungen von einem Benzinbetriebenen Auto aus. Ihren Berechnungen zufolge sind alle Szenarien des Lieferdienstes klimafreundlicher als der konventionelle Einkauf mit dem Auto. Je nach Lieferdienstmodell sind die THG-Emissionen um 18% bis 87% geringer.

Bei der bereits oben genannten Masterarbeit in Deutschland wurden die THG-Emissionen der beiden Online-Versandhandel-Szenarien zusätzlich mit dem Szenario eines Einkaufs in einem stationären Einzelhandel verglichen (Borowsky et al., 2019). Für die letzte Meile im stationären Handel und die Abwicklung von Retouren im E-Commerce wurden die Verkehrsmittel Auto, öffentlicher Verkehr (Bus/Bahn) sowie zu Fuss gehen/Fahrrad fahren berücksichtigt. Die Berechnungen zeigen, dass der stationäre Handel mit 3,0299 kg CO_{2e} pro Paket mehr als dreimal so viel THG-Emissionen verursacht wie das konventionelle Online-Versandhandel-Szenario (0,8278 kg CO_{2e} pro Paket), und mehr als sechsmal so viel wie das Lastenfahrrad-Szenario (0,4899 kg CO_{2e} pro Paket). Die Differenz ist vor allem auf die Wege zum Geschäft zurückzuführen (2,7458 kg CO_{2e} pro Paket). Im Vergleich zum stationären Handel können die Emissionen durch die Nutzung des Online-Versandhandels und die Auslieferung

durch konventionelle Lieferfahrzeuge um fast 73% reduziert werden. Wird die letzte Meile über Mikrodepots und ein Lastenfahrzeug abgewickelt, liegt das Einsparpotenzial bei 84%.

Die MIT-Studie, welche oben ebenfalls bereits diskutiert wurde, vergleicht den THG-Fussabdruck des Online-Versandhandels mit dem traditionellen, stationären Einzelhandel in den USA (Fernández Briseño et al., 2020). Auch hier wurde der Fokus auf die letzte Meile gesetzt, d.h. den Logistik-Teilabschnitt, der dafür benötigten Immobilien, den Transport (der Weg der Einzelperson von Zuhause zum Einzelhandel und zurück), und die Verpackung. Im Durchschnitt verursacht der Online-Versandhandel im Vergleich zum stationären Handel ca. 440 g CO₂e weniger pro Produkt. Die meisten THG-Emissionen (70%) werden auch hier durch den Weg ins Geschäft verursacht. Allerdings ist zu berücksichtigen, dass in den USA die Distanzen oft länger sind als in der Schweiz.

Im Vergleich zum traditionellen Einkauf im stationären Einzelhandel verursacht der Online-Versandhandel in allen oben genannten Studien deutlich weniger THG-Emissionen. Dies ist vor allem auf die Fahrt in Geschäfte zurückzuführen. Die Höhe der Emissionen hängt vor allem von der Distanz, der Häufigkeit der Einkaufsfahrten und der Wahl des Verkehrsmittels ab. Wenn man die Bahn benutzt und nur wenige Male im Jahr einkaufen geht, sind die potenziellen THG-Auswirkungen laut Hirschier (2018) mit denen des Online-Versandhandels vergleichbar.

Reboundeffekt

Der Online-Versandhandel macht das Einkaufen potenziell einfacher, da man auf einfache und schnelle Weise die Möglichkeit hat, Bestellungen aus einer grossen Auswahl an Produkten aufzugeben. Dies führt gemäss einer in Deutschland von Frick und Matthies (2020) durchgeführten Studie zu einem durch den Käufer wahrgenommenen Effizienzgewinn, was wiederum mit einem höheren Konsum von neuen Produkten verbunden sein kann. In ihrer Studie konnten sie feststellen, dass je mehr Zeit online verbracht wird, desto mehr online eingekauft wird.

Eine US-Amerikanische Arbeit benutzte einen quasi-experimentellen Ansatz mit tatsächlich von Kunden ausgeführten Online-Lebensmittelbestellungen. Dabei fanden die Forscher heraus, dass die Menge und die Häufigkeit der Einkäufe zunahm, wenn die Kunden von der Bestellung am Computer zur Bestellung über ein Smartphone mit mobilem Internet wechselten (Wang et al., 2015).

Nettoeffekt

Zwar ist der Online-Versandhandel deutlich THG-effizienter als das Einkaufen mit dem eigenen Auto im stationären Handel, allerdings könnte durch eine Zunahme des Konsums durch den Online-Versandhandel die Einsparungen wieder aufgehoben werden. Zudem führt die Nutzung vom Online-Versandhandel oftmals nicht zu einer Substitution sondern zu einer Ergänzung der Einkaufsfahrten. Kunden, welche sich persönlich im stationären Einzelhandel beraten lassen und danach die Bestellung online abwickeln, verursachen in der Summe mehr THG-Emissionen (Borowsky et al., 2019; Frick & Matthies, 2020). Jedoch werden in keiner Studie die THG-Auswirkungen des Online-Versandhandels unter Berücksichtigung von Reboundeffekten berechnet.

Der Einsatz von Endgeräten und Internet-Infrastruktur für die Online-Bestellung trägt gemäss Hirschier (2018) nur geringfügig zu den THG-Auswirkungen des Online-Versandhandels bei. Zusätzlich ist zu berücksichtigen, dass eine solche Internetrecherche auch im Vorfeld eines Einkaufs in einem stationären Handel durchgeführt werden kann.

Möglichkeiten zur Beeinflussung von THG-Emissionen

Anbieter

Die Herstellung der Verpackung stellt eine der grössten THG-Emissionsverursacher beim Online-Versandhandel dar. Die MIT Studie legt darum nahe, dass die Art und Weise, wie die Produkte

verpackt oder an die Geschäfte zurückgeschickt werden, zu den grössten Hebeln zur Begrenzung der THG-Emissionen zählen. Durch das Entfernen von Verpackungsschichten, die Änderung der Verpackungsmasse oder sogar durch den Verzicht auf Kartons könnten gemäss den Berechnungen der Autoren die THG-Emissionen des gesamten Online-Versandhandels um bis zu 36% gesenkt werden (Fernández Briseño et al., 2020).

Ein weiterer grosser Hebel zur Verringerung der THG-Emissionen stellt die Art der Zustellung auf der letzten Meile dar. Borowsky et al. (2019) schlagen vor, dass Online-Händler möglichst ökologische Transportmöglichkeiten nutzen, wie beispielsweise Lastenfahräder, oder andere elektrisch betriebene Fahrzeuge. Dazu gehört gemäss der MIT-Studie auch, zentralere Standorte für die Verteilung von Paketen zu wählen. Zudem wurde in der Studie festgestellt, dass die Option der «Lieferung innerhalb 24 Stunden» sowie die Möglichkeit, Produkte kostenlos zurückzusenden, dazu führt, dass der Online-Versandhandel als bequeme und somit potenziell häufig genutzte Einkaufsart angesehen wird, was wiederum zu einem Anstieg der THG-Emissionen führt (Fernández Briseño et al., 2020). Die Deponierung von Lieferungen in Abholstationen, welche Kunden zu Fuss erreichen können, eignet sich auch um die THG-Emissionen der Auslieferung zu senken.

Eine weitere Möglichkeit ist auf den Plattformen Informationen über die THG-Auswirkungen von Produkten und Dienstleistungen an die Konsumenten weiterzugeben und klimafreundliche Optionen vorzuschlagen (Siikavirta et al., 2008). Schliesslich sollten Praktiken, die zu Mehrkonsum im Online-Handel führen, aus Sicht des Klimaschutzes vermieden werden.

Nutzer

Konsumenten können bei ihrer Online-Bestellung erhebliche Einsparungen der THG-Emissionen erwirken, wenn sie Produkte gebündelt bestellen, so dass diese mit einer einzigen Lieferung in einem Karton geliefert werden können (Fernández Briseño et al., 2020). Eine weitere Möglichkeit, wie Kunden die THG-Emissionen senken können, ist es, den Lieferdiensten zu ermöglichen, die Produkte oder Lebensmittel bei deren Abwesenheit zu deponieren oder zur gelieferten Zeit zu Hause zu sein, um mehrfache Zustellversuche zu vermeiden (Borowsky et al., 2019; Siikavirta et al., 2008). Kunden sollten auch Schnellzustellungen oder Zustellbeschränkungen auf ein bestimmtes Zeitfenster vermeiden. Zudem können Kunden die Rückgabequote der gelieferten Produkte senken, indem sie sich im Vorfeld besser über die Produkte informieren (Fernández Briseño et al., 2020).

Wenn Konsumenten ihre Einkäufe im stationären Einzelhandel tätigen, sollten sie wenn möglich alle nötigen Produkte in einem Einkaufsgang einkaufen. Sofern sie ein Produkt im stationären Handel gefunden haben, sollten sie dieses bereits vor Ort kaufen, und nicht im Nachhinein online bestellen (Borowsky et al., 2019; Frick & Matthies, 2020). Für den Weg zum Geschäft sollten möglichst klimafreundliche Verkehrsmittel verwendet werden.

2.2 Essenslieferdienste

Verbreitung

Das Bestellen und Liefern lassen von frisch zubereiteten Mahlzeiten aus Restaurants hat in der Schweiz in den letzten sieben Jahren massiv zugenommen und sogar die Online-Lebensmittellieferdienste überholt (Lang, 2020). Dieser Trend hat sich während der Pandemie weiter verschärft. Eine schweizweite, repräsentative Umfrage schätzte den Umsatz der Essenslieferdienste in 2018 auf 1,28 Milliarden CHF. Eine erneute Erhebung in 2020 ergab, dass sich der Umsatz um 65% auf 2,1 Milliarden CHF erhöht hat. Der Anteil aller Bestellungen, die über das Internet aufgegeben werden, ist gemäss der Umfrage um 100% gestiegen, und beträgt mit 1,2 Milliarden CHF deutlich mehr als die Hälfte aller Essensbestellungen (Presseportal Schweiz, 2021).

Bereitstellungseffekt

Nur wenige wissenschaftliche Arbeiten befassen sich mit den THG-Emissionen, die durch die Bestellung und Lieferung von Mahlzeiten verursacht werden. Die vorhandenen Studien untersuchen hauptsächlich Emissionen im Zusammenhang mit verschiedenen Verpackungsmaterialien und/oder der Lieferung. Die THG-Emissionen der benötigten IKT-Endgeräte und -Infrastrukturen wurden in keiner Studie berücksichtigt. Setzt man beispielsweise die THG-Emissionen einer Bestellung laut Xie et al. (2021, 111,80 g CO₂e für Verpackung und Lieferung) mit denen eines iPhone 13 Pro ins Verhältnis (69 kg CO₂e entlang des gesamten Lebenszyklus, Apple, 2021), so zeigt sich, dass die THG-Emissionen von etwa 617 Bestellungen denen des iPhones entsprechen. Da das iPhone hauptsächlich für andere Zwecke genutzt wird, als Essen zu bestellen, ist es wahrscheinlich, dass die IKT-Infrastruktur gegenüber der Verpackung und Bestellung weniger THG-Emissionen verursacht. Ein abschliessender Vergleich ist aufgrund der Datenlage jedoch nicht möglich. Im Folgenden beschreiben wir die Ergebnisse der Studien zu Verpackungen und zur Lieferung von Essensbestellungen.

In ihrer Studie quantifizierten Arunan und Crawford (2021) die mit der Verpackung von Online-Essenslieferdiensten in Australien verbundenen THG-Emissionen für das Jahr 2018. Sie führten eine Lebenszyklusanalyse der Verpackungen durch, wobei sie die Herstellung der Verpackungrohstoffe, die Produktion von Verpackungen (Umwandlung von Rohstoffen in geformte Verpackungen), und den Transport von Verpackungen zum Händler, sowie deren Entsorgung berücksichtigten. Dabei fokussierten sie sich auf die Verpackungsmaterialien von Mahlzeiten, die in Australien besonders häufig bestellt werden: Pizza, indisches, thailändisches, chinesisches Essen, und Burger. Die dafür verwendeten Materialien sind Kunststoffe (für Liefertaschen), Getränkekartons, ungebleichter und gebleichter Karton (z.B. für Verpackungen für Burger und Pommes), Polypropylen (z.B. für Plastikbehälter), Kraftkarton (für Liefertaschen), und Faltkarton (für Pizzaschachteln). Zusätzlich haben die Autoren eine Umfrage unter 73 Nutzern von Online-Essenslieferdiensten durchgeführt, um deren Bestell- und Verpackungsentsorgungsverhalten zu untersuchen. Als funktionale Einheit wurde eine Online-Essensbestellung resp. eine Mahlzeit gewählt. Laut der Studie wurden in Australien im Jahr 2018 27,6 Millionen Bestellungen getätigt, die insgesamt 5,6 kt CO₂e aufgrund der Verpackungen freisetzen. Auf's Jahr gerechnet machten die für Pizza verwendeten Faltschachtelkartons den grössten Anteil daran aus, weil dies das meistbestellte Essen ist. Faltschachtelkartons verursachen jedoch die geringsten THG-Emissionen pro Kilogramm Material. Getränkekartons sind das am wenigsten verwendete Material, verursachen jedoch pro Kilogramm Material die meisten THG-Emissionen. Ein Vergleich zwischen den Liefertaschen zeigte, dass die Kraftkarton-Liefertasche über ihre gesamte Lebensdauer höhere THG-Emissionen (0,13 kg CO₂e) verursacht als eine Kunststoff-Tasche (0,02 kg CO₂e). Bei der Verpackung aller Speisearten verursacht die Herstellung der Rohstoffe sowie der Verpackung den grössten Anteil der THG-Emissionen. Der Transport der Verpackung zum Einzelhändler sowie deren Entsorgung verursachen weniger THG-Emissionen. Pro bestellter Mahlzeit verursacht die Verpackung von Burgern am meisten THG-Emissionen (ca. 0,3 kg CO₂e pro Bestellung), unter anderem da hierfür eine Vielzahl von Materialien benötigt wird: Kraftkarton-Liefertasche, ungebleichter und gebleichter Karton, Getränkekarton, sowie Kunststoff (für Getränkdeckel und Strohalm). Darauf folgt die Verpackung von thailändischem Essen (ca. 0,24 kg CO₂e pro Bestellung), welche aus Kraftkarton-Liefertasche(n) und Kunststoff (für Behälter) besteht. An dritter Stelle steht die Verpackung von Pizza (ca. 0,2 kg CO₂e pro Bestellung), die nur aus Faltschachtelkarton besteht. Die Verpackung von indischem Essen folgt an vierter Stelle (ca. 0,18 kg CO₂e pro Bestellung), und an letzter Stelle die Verpackung von chinesischem Essen (ca. 0,16 kg CO₂e pro Bestellung). Die in der Studie durchgeführte Umfrage ergab, dass 73% der Befragten einmal pro Woche oder weniger, und 27% zweimal oder mehr pro Woche Essen online bestellen. Die Befragten zeigten mehrheitlich ein umweltbewusstes Verhalten bei der Entsorgung der Verpackung. Bei nicht durch das Essen verschmutzten Verpackungen gaben über 84% an, diese zu recyceln und 16% entsorgen sie im

Haushaltsabfall, der auf Mülldeponien landet. Die verschmutzten Verpackungen wurden am häufigsten gewaschen und recycelt, und fast gleich häufig wurden sie gewaschen und wiederverwendet. Von den Befragten gaben 60% zudem an, dass sie bewusst auf bestimmte Verpackungsmaterialien (wie Taschen und Besteck) verzichten würden.

In einer EU-weiten Studie untersuchten Gallego-Schmid et al. (2019) anhand einer Lebenszyklusanalyse die THG-Emissionen von drei Arten von Einweg-Behältern, die typischerweise für Essenslieferungen oder Take-Away verwendet werden (Aluminium, Polypropylen und extrudiertes Polystyrol). Zusätzlich wurden die Umweltauswirkungen der Einweg-Behälter mit denen von wiederverwendbaren Take-Away-Behältern und Tupperware-Behältern, beide aus Kunststoff, verglichen. Dabei wurde untersucht, wie oft diese Behälter wiederverwendet werden sollten, um die Auswirkungen von Einweg-Behältern auszugleichen. Zusätzlich wurden die Umweltauswirkungen verschiedener Entsorgungsszenarien von Take-Away-Behältern auf EU-Ebene untersucht. Um die verschiedenen Behälter zu vergleichen, verwendeten die Autoren als funktionale Einheit «die Herstellung, Verwendung und Entsorgung eines 670 ml Behälters, der eine Mahlzeit für eine Person enthält». Die Resultate zeigen, dass der Behälter aus Polypropylen mit 151 g CO₂e die meisten THG-Emissionen verursacht, was grösstenteils auf die Gewinnung von Rohmaterialien sowie die Produktion von Polypropylen zurückzuführen ist. Darauf folgen Aluminium-Behälter mit 76 g CO₂e, bei welchen vor allem die Gewinnung der Rohmaterialien die meisten Emissionen verursacht. Aufgrund des geringeren Bedarfs an Primärrohstoffen durch Aluminiumrecycling wird der THG-Fussabdruck von Aluminium-Behältern reduziert. Extrudiertes Polystyrol verursacht mit 51 g CO₂e die geringste Menge an THG-Emissionen, wobei auch hier die Rohmaterialien Hauptverursacher sind. Betrachtet man die Lebenszyklusanalyse im Allgemeinen, deuten die Ergebnisse darauf hin, dass die Gewinnung der Rohstoffe, die Produktion der Verpackung und die Entsorgung von Take-Away-Behältern erheblich zu den Auswirkungen beitragen. Ein Vergleich der THG-Auswirkungen der Einweg- und Mehrweg-Behälter zeigt, dass Mehrweg-Behälter mehr Emissionen in der Herstellung verursachen als Einweg-Behälter. Somit müssen Mehrweg-Behälter tatsächlich mehrmals wiederverwendet werden, um klimafreundlicher zu sein. Aktuell werden in der EU Aluminium-Behälter zu 54% recycelt und zu 46% auf Mülldeponien entsorgt; extrudiertes Polystyrol-Behälter werden zu je 50% recycelt und verbrannt (mit Energierückgewinnung), und Polypropylen-Behälter zu 11% recycelt, zu 44% verbrannt (mit Energierückgewinnung), und zu 45% auf dem Müll deponiert. Die Umsetzung des EU-Vorschlags, bis 2025 75% der Aluminium- und 55% der Kunststoffverpackungsabfälle zu recyceln, würde die THG-Auswirkungen um 33% reduzieren und 61,700 t CO₂e/Jahr einsparen. Diese Einsparungen entsprechen den THG-Emissionen, die jährlich von etwa 55'000 leichten Nutzfahrzeugen verursacht werden.

In ihrer Studie untersuchten Xie et al. (2021) die THG-Emissionen der Lieferung sowie der Verpackung von Fertiggerichten in China. Sie analysierten auch, inwieweit eine Veränderung des Konsumverhaltens Emissionen verringern könnte. Ihre Analyse basiert auf Umfragedaten von 45 Personen aus 23 chinesischen Städten, welche mittels Apps auf ihrem Handy Essen bestellt haben. Anhand dieser Daten konnten sie die jeweilige Lieferdistanz und somit den benötigten Treibstoff berechnen. Für die Berechnung der Lieferdistanz berücksichtigten sie den Umstand, dass Bestellungen einerseits einzeln (also vom Restaurant zum Lieferort und zurück) als auch gesammelt geliefert werden können (mehrere Lieferungen nacheinander). Da die meisten Essenslieferungen in China mit elektrischen Motorrädern durchgeführt werden, wurde nur diese Fahrzeugart berücksichtigt. Um schlussendlich die THG-Emissionen der Lieferungen zu berechnen, berücksichtigten sie die Lieferdistanz, den vom E-Motorrad verbrauchten Strom pro Kilometer, sowie die durch die Stromerzeugung verursachten CO₂-Emissionen. Informationen bezüglich der Essensverpackung wurde anhand des Bestellinhalts sowie der Beschreibung der Teilnehmer ermittelt. Danach wurden die Emissionen für die Verpackungsmaterialien—Kunststoff- und Papierverpackungen sowie

wegwerfbare Essstäbchen—berechnet. Die Ergebnisse zeigen, dass für eine Essenslieferung im Durchschnitt eine Entfernung von 2,51 km zurückgelegt und 15,60 g CO_{2e} verursacht wurden. Die Verpackungen verursachten insgesamt 96,20 g CO_{2e} pro Bestellung: für jede Bestellung wurden durchschnittlich 43,36 g Kunststoffverpackungen, 21,16 g Papierverpackungen und 0,93 Paar Essstäbchen geliefert. Alles in allem konnte eine Essensbestellung somit um die 111,80 g CO_{2e} verursachen, wobei die Verpackung mit 86% den grössten Anteil der THG-Emissionen ausmachte. Betrachtet man die städtischen Unterschiede, konnte die Studie aufzeigen, dass in den bevölkerungsreicheren Städten eine grössere Menge an Kunststoff- und Papierverpackungen verwendet wurden als in den weniger bevölkerungsreichen Städten. Somit waren die durch die Verpackungen verursachten CO_{2e}-Emissionen in den bevölkerungsreicheren Städten höher.

Behzad et al. (2014) fokussierten sich in ihrer Studie auf die THG-Emissionen, welche durch die Auslieferung von Essen in Südkorea verursacht werden. Sie fokussierten sich dabei auf Motorräder, das am meisten genutzte Lieferfahrzeug für Essen. Zur Schätzung des Treibstoffverbrauchs berücksichtigten sie die Anzahl Essenslieferungen, die Fahrtstrecke, und in welchem Monat das Essen geliefert wurde. Einige Motorradfahrer liessen bei kaltem Wetter oft den Motor im Leerlauf laufen, um diesen warm zu halten, wenn sie im Restaurant das Essen abholen oder wenn sie das Essen an Kunden ausliefern. Um den Benzinverbrauch während des Leerlaufens zu messen, führten die Autoren zusätzlich ein Experiment durch. Ihre Analyse ergab, dass jedes Motorrad pro Tag eine durchschnittliche Strecke von 143 km fährt, und somit durchschnittlich 2,6 l Benzin verbraucht. Das Experiment ergab, dass 20,8 ml für 5 Minuten Leerlauf verbraucht werden.

Die obigen Studien deuten darauf hin, dass die Verpackung der Essenslieferungen einen grossen Anteil der THG-Emissionen verursacht. Welche Art und vor allem aus welchem Material die Verpackung besteht, kann von grosser Bedeutung für die THG-Emissionen sein. Einerseits haben die verschiedenen Rohstoffe und die Herstellung der Verpackung unterschiedliche THG-Auswirkungen, andererseits unterscheiden sie sich in den Entsorgungsmöglichkeiten. Zum Beispiel fanden Gallego-Schmid et al. (2019) in ihrer Studie, dass Polypropylen-Behälter praktisch doppelt so viele THG-Emissionen verursachen wie Aluminium-Behälter, und dass erstere in der EU nur zu 11% recycelt werden, und letztere zu 54%. Nicht zu unterschätzen sind jedoch auch die THG-Emissionen, die durch die Essenslieferung verursacht werden. Um hier ein Beispiel aus den USA zu nennen: Doordash, eine der grössten amerikanischen Essensliefer-App, beschäftigt rund eine Million Fahrer. Die steigende Beliebtheit von Essenslieferdiensten stellt somit auch in Bezug auf die Transportemissionen ein grosses Umweltproblem dar (Fevrin, 2022).

Anwendungseffekt

Optimierungs- und Substitutionseffekt

In der Studie von Xie et al. (2021) wurde die Essenslieferung mit dem alternativen Szenario verglichen, dass die Person zu einem Restaurant innerhalb eines Radius von 1 km läuft, um dort zu essen. Ihre Analyse ergab, dass wenn das Essen im Restaurant eingenommen anstatt nach Hause geliefert wird, 75,97 g CO_{2e} eingespart werden könnten. Auch hier fanden die Autoren einen Unterschied zwischen den Städten: in den bevölkerungsreichsten Städten konnten mehr THG-Emissionen eingespart werden als in den Städten mit geringeren Bevölkerungszahlen, da in den letzteren weniger Verpackungsmaterialien für die Essenslieferung verwendet wurden.

Zusätzlich sollte die Essenslieferung mit dem Kochen zu Hause verglichen werden. Hierzu gibt es kaum Studien. In einer schwedischen Studie untersuchten Sonesson et al. (2005) anhand einer Lebenszyklusanalyse die Umweltauswirkungen von drei Mahlzeiten: hausgemachte, halbfertige und verzehrfertige Mahlzeiten. Sie berichten, dass die hausgemachte Mahlzeit zwar höhere THG-Emissionen verursachte als die anderen Mahlzeiten, die Unterschiede jedoch gering waren.

Reboundeffekt

Ein Reboundeffekt konnte in der Literatur nicht identifiziert werden. Es ist wahrscheinlich, dass digitale Technologien den Bestell- und Lieferprozess deutlich vereinfacht und vergünstigt haben, wodurch die Essensbestellungen zunehmen können.

Nettoeffekt

Die Studie von Xie et al.(2021) deutet darauf hin, dass eine Essenslieferung deutlich mehr THG-Emissionen verursacht als der Verzehr einer Mahlzeit im Restaurant, das in geringer Zeit zu Fuss erreicht werden kann. Andere vergleichende Szenarien wurden nicht gefunden. Grundsätzlich lässt sich aus der Literatur die Erkenntnis gewinnen, dass Essenslieferungen tendenziell mehr THG-Emissionen verursachen als ein Besuch in einem Restaurant. Dieser Nettoeffekt ist jedoch von vielen Faktoren abhängig, wie unter anderem:

- Die Verpackungsart sowie das Verpackungsmaterial des gelieferten Essens
- Die Entsorgungsart des Verpackungsmaterials
- Die Lieferdistanz sowie die Bündelung von Lieferungen (optimale Route bei mehreren aufeinanderfolgenden Lieferungen)
- Die THG-Effizienz des Transportmittels (Fahrrad, elektrisches oder Benzinbetriebenes Motorrad/Auto)
- Das Transportmittel für den Restaurantbesuch bzw. den Weg zum Geschäft (zu Fuss, mit dem Fahrrad, mit öffentlichen Verkehrsmitteln oder mit dem Auto)

Die Datenlage lässt keine Aussage über die THG-Emissionen der für die Bestellung eingesetzten IKT-Endgeräte und -Infrastrukturen zu. Allerdings ist wahrscheinlich, dass die Verpackung und Lieferung deutlich mehr THG-Emissionen verursachen als die Produktion und Nutzung von IKT-Geräten, wenn nur die Emissionen entsprechend berücksichtigt werden, die aufgrund von Essensbestellungen anfallen (z.B. entsprechend der Nutzungsdauer).

Des Weiteren könnten die THG-Emissionen, die im Zusammenhang mit Lebensmittelabfällen und vor allem mit vermeidbaren Lebensmittelverlusten (Food Waste) entstehen, berücksichtigt werden. Es wurden keine spezifischen Daten über Food Waste bei Essenslieferungen gefunden, jedoch zeigt eine Studie der ETH, dass in der Schweiz rund 210'000 t Food Waste in der Gastronomie entstehen (Beretta & Hellweg, 2019). Letztlich ist davon auszugehen, dass die Herstellung der Mahlzeit selbst erhebliche THG-Emissionen verursacht. Somit wäre interessant zu untersuchen, ob Essensbestellungen zu einer Veränderung in Bezug auf die Ernährungsgewohnheiten führen (z.B. mehr oder weniger Fleisch).

Möglichkeiten zur Beeinflussung von THG-Emissionen

Anbieter

Anbieter haben durch die Art und Weise, wie sie das Essen verpacken, einen grossen Hebel zur Reduktion von THG-Emissionen. Gallego-Schmid et al. (2019) schlagen verschiedene Verbesserungsmöglichkeiten vor, wie das Gewicht der Verpackungen zu verringern und den Recyclinganteil der Behälter zu erhöhen. Des Weiteren könnten Essenslieferdienste Kunden die Option anbieten, auf gewisse Verpackungsmaterialien zu verzichten, wie z.B. Besteck oder Taschen (Arunan & Crawford, 2021). Wie die Studie von Arunan und Crawford (2021) in Australien zeigte, gaben 60% der Umfrageteilnehmer an, dass sie auf bestimmte Verpackungsmaterialien wie Taschen und Utensilien verzichten würden, wenn sie die Möglichkeit hätten.

Darüber hinaus könnten Massnahmen wie die Optimierung der Lieferrouten zu einer Verkürzung der Lieferdistanz führen, und die Nutzung klimafreundlicher Transportmittel könnte die durch die Lebensmittellieferung verursachten THG-Emissionen verringern (Xie et al., 2021).

Nutzer

Konsumenten könnten die Menge der Verpackung bereits bei ihrer Bestellung reduzieren – sofern dies möglich ist, indem sie auf nicht notwendige Materialien wie Besteck oder zusätzliche Verpackungen verzichten. Zudem sollten sie die Verpackungen bestenfalls wiederverwenden oder recyceln, und wenn dies nicht möglich ist, fachgerecht entsorgen (Arunan & Crawford, 2021).

Letztlich könnten Nutzer seltener Essen bestellen und so Emissionen, die aus Verpackungen und Lieferungen resultieren, reduzieren.

3 Mobilität

3.1 Multimodale Mobility-as-a-Service(MaaS)-Plattformen

Verbreitung

Die Emissionen des Verkehrs tragen wesentlich zum Klimawandel bei. Der Verkehr ist weltweit für 14% der THG-Emissionen (einschliesslich Nicht-CO₂-Gase) verantwortlich, und für 24% der CO₂-Emissionen aus der Verbrennung fossiler Brennstoffe (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2015; Teter et al., 2020; Wang & Ge, 2019). Motorisierte Strassenfahrzeuge wie Autos, LKWs, Busse sowie Zwei- und Dreiräder sind dabei für fast drei Viertel der verkehrsbedingten CO₂-Emissionen verantwortlich (Teter et al., 2020).

In der Schweiz macht der Verkehr mit rund 32% den grössten Anteil der inländischen CO₂-Emissionen aus (Bundesamt für Umwelt, 2017). Zum Beispiel sind Ende 2020 von den landesweit 4,3 Millionen erwerbstätigen Personen in der Schweiz 80% zur Arbeit gependelt, wobei der motorisierte Individualverkehr dominiert. In den städtischen Gebieten pendeln 45%, in intermediären Gebieten 66% und in den ländlichen Gebieten 74% mit dem Auto oder dem Motorrad zur Arbeit (Bundesamt für Statistik, 2022a).

Die individuelle Nutzung des privaten Autos ist im Vergleich zur geteilten Nutzung von Verkehrsmitteln von Natur aus klimaaunfreundlicher. Trotzdem ist das Privatauto eines der beliebtesten Verkehrsmittel, was gemäss den Autoren einer ETH Studie zu MaaS oft auf einen Mangel an Alternativen zurückzuführen ist (Henry et al., 2021).

Gemäss der Europäischen Mobility-as-a-Service Alliance integriert MaaS verschiedene Formen von Verkehrsdiensten auf einer einzigen, umfassenden digitalen Plattform. Nutzer von MaaS können so mittels einer Anwendung und einem Zahlungsweg (anstatt mehrerer Ticketing- und Zahlungsvorgänge) auf ein vielfältiges Angebot an Verkehrsmitteln zugreifen, einschliesslich öffentliche Verkehrsmittel, Car-/Bike-Sharing, Taxis, Mietwagen oder Leasingfahrzeuge, zu Fuss gehen oder Radfahren, sowie eine Kombination daraus. MaaS könnte eine klimafreundlichere Art der Mobilität ermöglichen (Bieser & Kriukelyte, 2021; Henry et al., 2021) und zielt darauf ab, das beste Angebot für Nutzer, Gesellschaft und Umwelt zu bieten (MaaS Alliance, 2022).

Bereitstellungseffekt

Ein Bereitstellungseffekt konnte in der Literatur nicht identifiziert werden.

Anwendungseffekt

Optimierungs- und Substitutionseffekt

Mit MaaS soll der klimabelastende Individualverkehr durch multimodalen Verkehr, d.h. eine effiziente Kombination verschiedener Verkehrsmittel, abgelöst werden (Cristescu, 2021). Die gesellschaftliche Motivation für MaaS besteht somit darin, die multimodale Mobilität durch digitale Plattformen attraktiver zu machen, sodass ein Wechsel weg vom Auto zu klimafreundlichen Verkehrsmitteln stattfindet (Hensher et al., 2021). In einem Grossteil der Literatur wird argumentiert, dass MaaS zu einer Verringerung der privaten Autonutzung und potenziell zu einer Reduzierung der THG-Emissionen des Verkehrs führen kann. Jedoch gibt es nur wenige Studien, die die Auswirkungen einer Einführung von MaaS oder anderen Verkehrsoptimierungen auf die THG-Emissionen berechnen.

Vom Nordischen Ministerrat wurde eine Studie zu MaaS initiiert mit dem Ziel, das THG-Reduktionspotenzial von MaaS im Personenverkehr in Dänemark, Norwegen, Schweden, Finnland und Island bis 2030 und 2050 zu modellieren (Laine et al., 2018). Um die potenziellen Auswirkungen von MaaS zu bewerten, wurde für jedes der nordischen Länder ein Referenzszenario erstellt, welches die THG-Emissionen des gesamten Verkehrs ohne Implementierung von MaaS bis zum Jahr 2050 ausweist. Ein Szenario geht von einer geringen MaaS-Nutzung (zwischen 5-10% weniger Verkehrstätigkeit zwischen 2030 und 2050 im Vergleich zum Referenzszenario) und ein Szenario von einer höheren MaaS-Nutzung aus (zwischen 10-20% weniger Verkehrstätigkeit zwischen 2030 und 2050 im Vergleich zum Referenzszenario). Im Referenzszenario wurden für das Jahr 2030 CO₂-Emissionen im Umfang von 26,4 Mt prognostiziert, für 2040 16,5 Mt und für 2050 5,9 Mt. Bei einer geringeren MaaS-Implementierung würde 2030 eine Reduktion von 1,09 Mt CO₂ erreicht werden, 2040 eine Reduktion von 1,15 Mt CO₂ und 2050 eine Reduktion von 0,53 Mt CO₂. Beim höheren MaaS-Szenario würde 2030 eine Reduktion von 2,19 Mt CO₂, 2040 von 2,30 Mt CO₂ und 2050 von 1,06 Mt CO₂ erreicht werden. In einem zweiten Schritt wurde untersucht, inwiefern sich die CO₂-Emissionen aufgrund eines reduzierten Autobesitzes verändern. Dafür wurde unter anderem eine Verlagerung vom privaten Autofahren auf den Bus, die Bahn oder eine Fahrgemeinschaft berücksichtigt. In der Analyse wurde eine 10%-ige Reduktion des Autobesitzes im Vergleich zum Referenzszenario angenommen. Da in diesem Fall mehr gelaufen und Fahrrad gefahren wird, oder der Verkehr reduziert wird, wurde eine Verringerung der Personenverkehrsleistung um 2% angenommen. Carsharing, Mitfahrgelegenheiten, Ride Hailing oder die Nutzung eines Familienfahrzeugs würde die Anzahl der Personen pro Auto um 1% erhöhen, und die angenommene jährliche Fahrleistung pro Fahrzeug um 3% erhöhen. Der öffentliche Verkehr würde ebenfalls zunehmen. Die Berechnungen zeigen, dass eine Verringerung des Fahrzeugbesitzes um 10% zu jährlichen Emissionsreduktionen von knapp 0,4 Mt CO₂ in 2030 führen würde.

In einer Studie versuchten Carroll et al. (2019) anhand irischer Volkszählungsdaten aus 2011 zu prognostizieren, wie Verbesserungsmaßnahmen im Service des öffentlichen Verkehrs in Bezug auf Kosten oder Dauer des Transports zu einer Verlagerung vom motorisierten Individualverkehr auf öffentliche Verkehrsmittel im Grossraum Dublin führen könnte. Zusätzlich wurden die potenziellen Emissionsreduktionen sowie finanziellen Einsparungen berechnet. Die Ergebnisse dieser Studie ergaben, dass eine Kosten- und Zeitersparnis im öffentlichen Verkehr zu einer Verringerung des Anteils des privaten Autoverkehrs um bis zu 1,76% erreicht werden könnte. Die Nutzung des öffentlichen Verkehrs wiederum könnte einen Anstieg von bis zu 2,87% verzeichnen. Die Autoren schätzten, dass dies zu Emissionseinsparungen von bis zu 431,58 tCO₂ täglich führen würde.

Das International Transport Forum veranlasste eine Reihe an Studien, die die Mobilität in verschiedenen städtischen Kontexten untersuchte (International Transport Forum, 2017). In einem Bericht wird untersucht, wie der Einsatz von geteilten Mobilitätsdiensten den Verkehr in Auckland, Neuseeland verändern könnte. Die Studie basiert auf einem Simulationsmodell für die mehr als 4,5

Millionen Fahrten, die an einem durchschnittlichen Wochentag von 1,3 Millionen Einwohnern im am dichtesten besiedelten Teil der Region Auckland (46% der Fläche und 90% der Bevölkerung) unternommen werden. Mit Hilfe des Modells wurden verschiedene Szenarien simuliert, in denen geteilte Mobilitätsdienste andere Formen der Mobilität ersetzen. Als geteilte Mobilitätsdienste wurden Sammeltaxis mit bis zu sechs Fahrgästen, die einen Tür-zu-Tür-Service auf Abruf anbieten, und Taxi-Busse mit 8 bis 16 Sitzplätzen, die einen Service von Strassenecke zu Strassenecke anbieten und 30 Minuten im Voraus gebucht werden müssen, betrachtet. In dem Modell werden Verkehrsangebot und -nachfrage aufeinander abgestimmt, während Umwegstrecken und Fahrzeiten minimiert werden. Im Bericht werden das Jahr 2013 und 2046 betrachtet. Die Ergebnisse zeigen, dass sich die von allen Fahrzeugen zurückgelegte Gesamtstrecke halbieren würde, wenn alle derzeitigen Fahrten mit dem privaten Auto durch gemeinsam genutzte Mobilitätsdienste ersetzt würden, und dass auch die Emissionen und die Verkehrsüberlastung abnehmen würden. Selbst wenn nur ein Teil der Autofahrer auf geteilte Mobilitätsdienste umsteigt, kann dies zu einer Verringerung der Gesamtkilometerleistung und der CO₂-Emissionen um etwa 15% führen. Die CO₂-Emissionen könnten noch erheblich weiter reduziert werden, wenn die Flotte aus Elektrofahrzeugen bestehen würde.

Das Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme und das Institut für Kartografie und Geoinformation der ETH Zürich führten 2020 eine Datenerhebung zum MaaS-Pilotprojekt yumuv in der Stadt Zürich durch (Henry et al., 2021). Die yumuv App ist ein Pilotprojekt der Schweizer Bundesbahnen (SBB CFF FFS) und der städtischen Verkehrsbetriebe Basel, Bern und Zürich (yumuv, 2022). Bei der Studie wurde das Mobilitätsverhalten zweier Gruppen mittels GPS Tracking über die App SBB MyWay sowie Umfragen erhoben. Der Unterschied zwischen den Gruppen war, dass die eine Gruppe das yumuv Abo easy gekauft hatte und die andere nicht. Die Studie zeigt, dass yumuv Nutzer aufgrund des Abonnements deutlich mehr E-Trottinets sowie etwas mehr den öffentlichen Verkehr nutzten. Zugleich nutzten sie jedoch weniger eigene Velos und eigene E-Bikes. Die Autoren konnten indes keine Wirkung des yumuv Abonnements auf die Nutzung des eigenen Autos sowie geteilte E-Bikes feststellen. Somit werden vor allem die Nutzung des eigenen Velos oder E-Bikes substituiert. Die Studie zeigte, dass die yumuv Nutzer tendenziell jung und männlich waren, und einen höheren Bildungsabschluss hatten. Im Vergleich zur Kontrollgruppe besaßen yumuv Nutzer mehr Velos und häufiger ein GA, aber weniger E-Bikes und ein Auto. Interessanterweise wurde yumuv Nutzern häufiger ein ÖV Abonnement von ihrem Arbeitgeber zur Verfügung gestellt als der Kontrollgruppe. Beide Gruppen gaben an, dass Flexibilität und Zeit die wichtigsten Prioritäten beim Reisen sind, während Preis, Umwelt und Komfort weniger häufig als Priorität genannt wurden.

Sochor et al. (2015) untersuchten das UbiGo-Pilotprojekt in Göteborg, Schweden anhand von Teilnehmerfragebögen und Reisetagebüchern. UbiGo wurde als ein MaaS-App entwickelt, welches Nutzern eine Reihe von Reisedienstleistungen anbot, darunter öffentliche Verkehrsmittel, Carsharing, Autovermietung Bikesharing und Taxidienst. Das Guthaben für die App konnte aufgestockt oder verlängert werden, und das Abonnement konnte monatlich geändert werden. Die Befragten gaben an, dass sie durch die UbiGo-App Anwendung weniger mit dem Auto und häufiger mit öffentlichen Verkehrsmitteln, zu Fuss oder mit dem Fahrrad gefahren sind. Weiter konnte dargelegt werden, dass potenzielle Erstnutzer zunächst durch Neugierde motiviert werden, diese dann aber in praktische Anreize wie Bequemlichkeit und wirtschaftliche Vorteile umgewandelt werden müssen damit die App weiterhin benutzt wird. Die Befragten sahen auch einen Mehrwert eines Konzepts, das 24-Stunden-Kunden Support, neue Arten von Abonnements und Tickets und die Möglichkeit, die gesamte Mobilität über das Smartphone zu bewältigen, umfasste. Interessant zu nennen ist, dass die Sorge um die Umwelt eher als Bonus statt als Anreiz funktionierte, was gemäss den Autoren bedeutet, dass die umweltfreundliche Wahl auch die praktische Wahl sein muss, um den Umweltschutz zu fördern.

In einem Pilotprojekt in Sydney, Australien wurde zwischen 2019 und 2021 die MaaS-App Tripi getestet. In einer Studie von Hensher et al.(2021) wurde anhand einer Umfrage unter den Teilnehmern

ermittelt, inwieweit sich die Nutzung des Privatwagens nach dem Abschluss eines monatlichen MaaS-Pakets ändern könnte. Es wurden unterschiedliche MaaS-Pakete entwickelt, welche öffentliche Verkehrsmittel, Mitfahrgelegenheiten, Carsharing und Autovermietung mit unterschiedlichen finanziellen Rabatten und monatlichen Abonnementgebühren bündelten. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass die Nutzung eines MaaS-Pakets zu einer geringeren Nutzung des Privatwagens führen kann. Die Autoren stellten jedoch zudem fest, dass es ohne attraktive finanzielle Anreize unwahrscheinlich sein wird, dass MaaS spürbare, nachhaltige Ergebnisse erzielen kann.

Eine weitere Studie über ein MaaS-Pilotprojekt wurde 2017 in Gent, Belgien durchgeführt (Storme et al., 2020). Die Studie konzentrierte sich auf die Beziehung zwischen Autobesitz und MaaS-Nutzung und basierte ihre Analysen auf einer Umfrage von Autobesitzern. Die Studie zeigt, dass die meisten Befragten bereit waren, MaaS-Dienste (insbesondere öffentliche Verkehrsmittel und Carsharing-Dienste) zu erkunden, aber eine deutliche Reduzierung der privaten Autonutzung blieb aus. Obwohl die Teilnehmer hoch motiviert waren, die Autonutzung zu reduzieren und ihnen Anreize geboten wurden, hatten sie erhebliche Schwierigkeiten, auf ihr eigenes Auto zu verzichten, insbesondere für (nicht regelmässige) Freizeitfahrten. Die Autoren schlussfolgern daraus, dass MaaS in naher Zukunft eher als Ergänzung—und nicht als Ersatz—für die Nutzung des privaten Autos betrachtet werden sollte.

Das KiM Netherlands Institute for Transport Policy Analysis führte eine Untersuchung mittels Umfrage durch, um die Gruppen in der niederländischen Gesellschaft zu ermitteln, die MaaS in Zukunft am ehesten nutzen werden (Zijlstra et al., 2019). Die Menschen, die MaaS am ehesten nutzen werden, sind jung, aktiv und gesund, nutzen öffentliche Verkehrsmittel, reisen gerne und haben ein überdurchschnittliches Einkommen und Bildungsniveau. Diejenigen, die MaaS erst sehr viel später oder womöglich nie nutzen werden sind in der Regel ältere Menschen, die selten verreisen, ein geringeres Einkommen oder Bildungsniveau haben und keine öffentlichen Verkehrsmittel nutzen.

Die oben genannten Studien deuten darauf hin, dass eine Implementierung von MaaS tatsächlich THG-Emissionen reduzieren könnte. Hierbei kommt es grundsätzlich darauf an, wie attraktiv MaaS schlussendlich werden kann (Ho et al., 2021). Die Umfragedaten zeigen, dass eine erfolgreiche, und breit genutzte Implementierung mit weiteren Faktoren verknüpft werden müsste, wie z.B. finanzielle Anreize. Das theoretische Potenzial von MaaS für den Klimaschutz im Verkehr wird somit bei Weitem noch nicht ausgeschöpft (Reck et al., 2021).

Reboundeffekt

Die positiven Auswirkungen einer MaaS-Implementierung könnte aufgrund einer vermehrten Nutzung von Transportmitteln, welche zu Mehrverkehr führt, aufgehoben werden. In einem Artikel spekulieren Docherty et al. (2018), dass ein verbesserter und leichterer Zugang zu Reismöglichkeiten zu einer gesteigerten Reisetätigkeit führen könnte, was wiederum die positiven Auswirkungen von MaaS auszugleichen vermag. Andere Folgen könnten gemäss Fioreze et al. (2019) die Verlagerung von aktiven Fortbewegungsmittel (d. h. zu Fuss gehen und Radfahren) auf motorisierte MaaS-Verkehrsträger sein, oder eine Verlagerung von konventionellen Verkehrsdiensten mit hoher Kapazität auf nachfragegesteuerte Verkehrsdienste mit geringer Kapazität.

Nettoeffekt

Da der Verkehr deutlich mehr THG-Emissionen als der IKT-Sektor verursacht, ist davon auszugehen, dass die Bereitstellung von MaaS-Angeboten über digitale Infrastrukturen und Endgeräte weniger THG-Emissionen verursacht, als durch MaaS Lösungen potenziell vermieden werden. Die entscheidende Frage ist daher, ob und wie MaaS zu einer Veränderung im Mobilitätsverhalten führt und welche Konsequenzen dies für THG-Emissionen hat (Anwendungseffekt).

Möglichkeiten zur Beeinflussung von THG-Emissionen

Anbieter

Wie bereits weiter oben genannt, wird das private Auto oftmals aufgrund eines Mangels an (besseren) Alternativen gewählt (Henry et al., 2021). MaaS bietet sich somit als ein geeigneter Hebel an, um klimafreundlichere Mobilität attraktiver zu gestalten (Bieser & Kriukelyte, 2021; Henry et al., 2021). Aus den oben genannten Umfragedaten zeigte sich, dass Flexibilität und Zeit (Henry et al., 2021) sowie Bequemlichkeit und finanzielle Vorteile (Sochor et al., 2015) ausschlaggebend sind für eine potenzielle Nutzung von MaaS-Abonnements, während Bedenken für die Umwelt weniger gewichtet werden (Henry et al., 2021; Sochor et al., 2015). Diese Punkte sollten somit bei der Konzeption und Herstellung einer MaaS-Dienstleistung berücksichtigt werden, damit diese erfolgreich eingeführt werden kann.

Gemäss der Studie der nordischen Länder hätten Unternehmen eine grosse Auswirkung darauf, wie ihre Mitarbeiter zum Büro pendeln. Sie könnten ihren Mitarbeitern finanzielle Anreize bieten, andere Verkehrsmittel für den Arbeitsweg zu nutzen als das eigene Auto, wie beispielsweise durch das Subventionieren oder Bezahlen eines ÖV- oder MaaS-Abonnements (Laine et al., 2018). Des Weiteren könnten Unternehmen Gebühren für das Parken auf dem Firmengelände einführen resp. erheben, oder Anreize schaffen, wie beispielsweise ein kleiner finanzieller Beitrag pro gelaufenem oder mit dem Velo gefahrenem Kilometer (Laine et al., 2018).

Grundsätzlich gilt, je klimafreundlicher das Verkehrsmittel ist, das durch eine MaaS-Lösung gefördert wird, desto höher ist der potenzielle Beitrag zum Klimaschutz. Allerdings kann MaaS auch Anreize für Mehrverkehr bieten (z.B. durch Abos), weswegen die Vermeidung von Verkehr als zusätzlicher Hebel nicht ausser Acht gelassen werden und in MaaS-Konzepten berücksichtigt werden sollte.

Nutzer

Nutzer können vor allem durch die Wahl der Verkehrsmittel und die Vermeidung von Verkehr zur Reduzierung von THG-Emissionen beitragen. Dabei sollte vor allem auf klimafreundliche Verkehrsmittel gesetzt werden: mit dem Fahrrad oder zu Fuss ist am klimafreundlichsten, ÖV ist besser als das eigene Auto. Wenn eine Reise nicht zwingend notwendig ist, sollte, wenn möglich, darauf verzichtet werden. Nutzer können sich auch selbst zwingen, weniger mit dem Auto zu fahren, indem sie ihr Auto verkaufen oder gar kein Auto anschaffen.

3.2 Routenplanung und Navigation

Verbreitung

Es gibt verschiedene Geräte wie z.B. Garmin oder Tomtom, und Applikationen wie z.B. GoogleMaps oder Waze, welche die Routenplanung vor der Abfahrt und die Echtzeitnavigation während der Fahrt für verschiedene Verkehrsträger anbieten (Bieser & Kriukelyte, 2021; Kressbach, 2019). In Lkw, Bussen oder Autos sind heutzutage Routenplanungs- und Navigationsgeräte zudem oft bereits in das Bordsystem integriert (Bieser & Kriukelyte, 2021). Navigationsgeräte haben tendenziell eine langsamere Routenberechnung, jedoch eine leichtere Anwendung, da sie ein grösseres Display besitzen. Sie kommen meistens ohne Mobilfunknetz aus, und verbrauchen viel weniger Daten als Apps. Bei Apps erschwert das kleine Display oftmals die Streckenerkennung, und durch die Online-Nutzung wird ein hoher Datenverbrauch verursacht. Jedoch sind Apps meist kostenlos und auf dem Smartphone immer dabei, und sie berechnen die Route oftmals schneller als Navigationsgeräte (Kressbach, 2019).

In den USA ist gemäss Daten von Statista von 2021 GoogleMaps die mit Abstand führende Navigationsapp, mit 25,5 Millionen Downloads. An zweiter Stelle folgt Waze mit 13,4 Millionen Downloads, eine weitere Google-eigene App, deren Schwerpunkt darauf liegt, den Nutzern mithilfe einer Crowdsourcing-Plattform schnellere Routen zu ihren Zielen zu bieten. An dritter Stelle kommt mit 1,6

Millionen Downloads GPS Maps (Statista Research Department, 2022c). Dies wurde möglicherweise als Bezeichnung für Apple Maps gewählt, welche jedoch auf iPhones vorinstalliert und auf Android-Geräten nicht verfügbar ist (Popa, 2022).

Google hat ein neues Routing-Modell entwickelt, das den Treibstoffverbrauch auf der Grundlage von Faktoren wie Strassengefälle und Verkehrsstaus optimiert. Google Maps bietet nun seit letztem Jahr in den USA (und planungsgemäss seit diesem Jahr in Europa) standardmässig die Route mit dem geringsten CO₂-Fussabdruck, wenn diese ungefähr die gleiche Ankunftszeit hat wie die schnellste Route. Dies soll die Nutzer dabei unterstützen, ihren ökologischen Fussabdruck zu verringern. In Fällen, in denen die umweltfreundliche Route die Ankunftszeit erheblich verlängern könnte, können Nutzer die relative CO₂-Belastung zwischen den Routen vergleichen, damit sie sich besser entscheiden können (Glasgow, 2021; Milmo, 2021).

Bereitstellungseffekt

Ein Bereitstellungseffekt konnte in der Literatur nicht identifiziert werden.

Anwendungseffekt

Optimierungs- und Substitutionseffekt

In einer Studie aus den USA von 2008 untersuchen Ahn und Rakha (2008) die Auswirkungen von Routenentscheidungen auf den Treibstoffverbrauch und die Emissionen von Fahrzeugen. In ihrer Studie gehen sie von der Annahme aus, dass Autofahrer in der Regel Routen wählen, die ihre Reisekosten (z.B. die Reisezeit) minimieren. Dies kann dazu führen, dass sie längere Strecken fahren, z.B. um Staus zu umgehen. Die Autoren gehen somit der Frage nach, ob die Wahl einer längeren, aber schnelleren Route zu einer Verbesserung der Energie- und Luftqualität führen kann. Für ihre Analyse verwendeten sie GPS-Daten, die während des morgendlichen Pendelverkehrs in einem Vorort in Washington, DC, USA erhoben wurden. Die Ergebnisse der durchschnittlichen Reisezeit aus den gesammelten GPS-Daten zeigen, dass Fahrten auf der Autobahn zu einer Reisezeitersparnis von 17% führen im Vergleich zu Fahrten auf der Hauptverkehrsstrasse. Die Fahrzeiten auf der Autobahn sind somit deutlich kürzer, obwohl diese in Bezug auf die Distanz um 30% länger sind als die Hauptverkehrsstrassen (35,9 km gegenüber 27,6 km). Grund für die Reisezeitersparnis ist eine deutlich höher gefahrene Durchschnittsgeschwindigkeit auf der Autobahn. Würde jedoch die Hauptverkehrsstrasse anstelle der Autobahn benutzt werden, könnte dies zu einer Verringerung der CO₂-Emissionen um bis zu 20% führen. Dies deutet darauf hin, dass die schnellere Autobahnstrecke nicht immer die treibstoffsparendste Route ist.

In einer Studie aus Schweden wurde untersucht, inwieweit Navigationssysteme, die spritsparende Routen vorschlagen, Treibstoffverbrauch und damit die CO₂-Emissionen senken können (Ericsson et al., 2006). Für diese Analyse verwendeten die Autoren Daten aus einem Experiment in Lund, das zwischen 1999 und 2002 durchgeführt wurde und bei dem 284 Fahrzeuge mit einem Navigationsgerät mit digitaler Karte und einem Datenaufzeichnungsgerät zur Aufzeichnung des Fahrverhaltens ausgestattet wurden. Es wurde festgestellt, dass bei 46% der Fahrten die spontane Routenwahl des Fahrers nicht die treibstoffeffizienteste war. Diese Fahrten könnten im Durchschnitt 8,2% Treibstoff einsparen, wenn das Navigationssystem den Spritverbrauch optimiert. Zudem wurde aus der Analyse ersichtlich, dass sich die schnellste Route nicht als treibstoffsparend erwies, während hingegen die treibstoffsparendsten Routen im Durchschnitt ebenfalls zeitsparend waren. Ein nach geringstem Treibstoffverbrauch optimiertes Navigationssystem würde also in den meisten Fällen Treibstoff und Zeit sparen.

In einer chinesischen Studie von 2013 wurde versucht, einen Algorithmus für die ökologische Routenplanung zu entwickeln, der speziell auf die Minimierung der Fahrzeugemissionen und des

Treibstoffverbrauchs ausgerichtet ist (Yao & Song, 2013). Zu diesem Zweck wurden auf der Grundlage von in Peking erhobenen Daten eine Reihe von Modellen für leichte Benzinfahrzeuge erstellt. Der vorgeschlagene Routenplanungsalgorithmus wird durch eine dynamische Schätzung der Emissionen und des Treibstoffverbrauchs für jede Verbindung bestimmt, indem dynamische Verkehrsinformationen verwendet werden, die alle 5 Minuten aktualisiert werden. Der Einfluss der Fahrzeuggeschwindigkeit, der Beschleunigung und anderer Fahrbedingungen auf die Fahrzeugemissionen wurde in der Analyse berücksichtigt. Ihre Analysen brachten zunächst hervor, dass die Emissionen von Benzinfahrzeugen mit zunehmender Geschwindigkeit bis zu einem bestimmten Wert abnehmen und dann wieder ansteigen. Konkret nehmen die CO₂-Emissionen pro Kilometer mit zunehmender Geschwindigkeit zunächst ab, sobald die Geschwindigkeit etwa 60 km/h erreicht, steigen sie jedoch wieder an. Somit führen sowohl höhere als auch niedrigere Geschwindigkeiten zu einer höheren Emissionsrate des Fahrzeugs. Bei einer Durchschnittsgeschwindigkeit von etwa 60 km/h ergibt sich eine minimale CO₂-Emissionsrate von 110 g/km. Um den ökologischen Routenplanungsalgorithmus zu bewerten, wird dieser mit zwei anderen Routen verglichen, jene mit dem niedrigstem Treibstoffverbrauch und jene mit der kürzesten gefahrenen Zeit. Dann werden die CO₂-Emissionen, der Treibstoffverbrauch, die Fahrzeit und die Fahrstrecke zwischen diesen Routen verglichen. Ihre Berechnungen ergaben, dass die ökologische Route im Vergleich zur Route mit der kürzesten Fahrzeit zwar 3,8% mehr Fahrzeit benötigt, jedoch 17,3% weniger Fahrdistanz, 5,9% weniger CO₂ emittiert und 5,3% weniger Treibstoff verbraucht.

Eine Studie aus Japan von 2016 hatte ebenfalls das Ziel, die CO₂-Emissionen eines Fahrzeugs pro Kilometer zu prognostizieren und einen umweltfreundlichen Weg zu bestimmen, der zu minimalen CO₂-Emissionen führt und gleichzeitig das Fahrzeitbudget einhält (Zeng et al., 2016). Dafür wurden Daten von Testfahrzeugen mit GPS und On-Board-Diagnose-Geräten von 2011 verwendet. Die gesammelten Informationen umfassen unter anderem den Treibstoffverbrauch, die Fahrzeugabgase, die Geschwindigkeit, die Beschleunigung, das Bremsen, und die Position des Gaspedals. Die Autoren vergleichen die umweltfreundliche Route mit einer vom Fahrer selbst gewählten Route, mit der kürzesten Route sowie einer Route mit der geringsten Fahrzeit. Aus der Analyse geht hervor, dass der vorgeschlagene umweltfreundliche Weg eine deutlich bessere Leistung in Bezug auf die CO₂-Emissionen mit nur einer sehr geringen Verlängerung der Reisezeit und eines kleinen Umwegs bietet. Die umweltfreundliche Route reduziert die CO₂-Emissionen um 6,98% im Vergleich zur vom Fahrer selbst gewählten Route, um 5,15% im Vergleich zur Route mit der kürzesten Entfernung und um 10,17% im Vergleich zur Route mit der geringsten Fahrzeit. Insbesondere im Vergleich zur Strecke, die der Fahrer selber ausgewählt hat, bietet der umweltfreundliche Weg auch einen erheblichen Vorteil bezüglich der Reisezeit (16,95% weniger Reisezeit), während die zurückgelegte Strecke um 0,3 km länger ist.

Aus den Studien geht hervor, dass bisherige Routing-Ansätze in der Regel den optimalen Pfad auf der Grundlage von Entfernung, Fahrzeit und Wahrscheinlichkeit der pünktlichen Ankunft berechnet haben. Sie zeigen jedoch, dass der kürzeste oder schnellste Weg nicht zwingend der umweltfreundlichste ist. Der kürzeste Weg kann den Fahrer durch ein stark überlastetes Gebiet führen, was zu hohen Fahrzeugemissionen führt. Andererseits kann es Fälle geben, in denen der schnellste Weg zu einer längeren Fahrstrecke führt, wenn auch auf weniger überlasteten Strassen. Die schnellste Strecke kann jedoch auf eine Autobahn führen, welche zu höherer Geschwindigkeit über eine längere Strecke und somit zu höheren Fahrzeugemissionen führen kann. Die Forschungsarbeiten ergeben, dass ein Routen-Navigationssystem, das auf eine ökologische Route fokussiert ist, einen geringeren Treibstoffverbrauch und geringere Emissionen während der Fahrt ermöglicht (Zeng et al., 2016).

Reboundeffekt

Ein Reboundeffekt konnte in der Literatur nicht identifiziert werden. Es ist jedoch möglich, dass Routenplanungs- und Navigationssysteme Verkehr, speziell mit dem Auto, komfortabler und effizienter machen, wodurch mehr gefahren werden könnte.

Nettoeffekt

Da auch bei Routenplanung und Navigation der Verkehr deutlich mehr THG-Emissionen als die dafür verwendete IKT verursacht, ist davon auszugehen, dass die Bereitstellung der digitalen Infrastrukturen und Endgeräten weniger THG-Emissionen verursacht, als durch die Navigation und Routenplanung potenziell vermieden werden. Die entscheidende Frage ist daher ähnlich wie bei MaaS, nämlich ob und wie die Routenplanung zu einer Veränderung im Fahrverhalten führt und welche Konsequenzen dies für THG-Emissionen hat (Anwendungseffekt).

Möglichkeiten zur Beeinflussung von THG-Emissionen

Anbieter

Anbieter von Routenplanungs- und Navigationssystemen sowie Applikationen sollten eine ökologische Route anbieten, wenn möglich als Standardroute. Dies kann massgeblich zu einer Reduktion von THG-Emissionen führen, ohne dass dabei grosse Zeiteinbussen entstehen, wie die obigen Studien deutlich gezeigt haben.

Nutzer

Wie in der Studie aus Schweden ersichtlich wurde, tendieren Fahrer, die spontan und ohne Navigationshilfe fahren, Strecken zu fahren die mehr Treibstoff verbrauchen. Die Benutzung eines Navigationsgeräts oder Apps kann somit dabei helfen, eine treibstoffsparende Route auszuwählen.

4 Arbeit

4.1 Home Office

Verbreitung

Die Verbreitung von Home Office hat in der Schweiz in den letzten 10 Jahren stetig zugenommen. Während 2013 etwa 18% der Erwerbstätigen an manchen Tagen von zu Hause aus arbeiteten, waren es 2019 bereits etwa 25% (Bundesamt für Statistik, 2022b). Durch die COVID-19-Pandemie hat Home Office einen erheblichen Schub bekommen, so dass im Jahr 2020 bereits 34% der Erwerbstätigen angaben, an manchen Tagen zu Hause zu arbeiten (Bundesamt für Statistik, 2022b). Viele Unternehmen haben angekündigt, auch in Zukunft vermehrt auf Home Office zu setzen (Benz et al., 2022), weswegen davon auszugehen ist, dass die Verbreitung von Home Office auf einem hohen Niveau bleiben wird. Zu berücksichtigen ist jedoch, dass nicht alle Tätigkeiten von zu Hause aus erledigt werden können. Allerdings geht man davon aus, dass durch die Weiterentwicklung von Technologien für virtuelle Zusammenarbeit (z.B. durch virtuelle Realität und Smart Glasses) in Zukunft mehr Tätigkeiten ortsunabhängig erledigt werden können. Zusätzlich arbeiten zunehmend mehr Menschen im (wissensintensiven) Dienstleistungssektor, also in Tätigkeiten, die potenziell von zu Hause aus erledigt werden können (Bieser et al., 2020b).

Bereitstellungseffekt

Nur wenige Studien zu den THG-Effekten von Home Office untersuchen Bereitstellungseffekte, da sie davon ausgehen, dass die Anwendungseffekte (z.B. Reduktion von Pendelverkehr) einen grösseren Einfluss haben (Hook et al., 2020). Dennoch gibt es Studien, welche versuchen, den THG-Fussabdruck der zusätzlich für Home Office benötigten IKT zu schätzen.

Bieser et al. (2020b) schätzten, dass im Jahr 2030 die Ausstattung, welche flexibles Arbeiten in der Schweiz ermöglicht, insgesamt 9–100 kt CO_{2e} pro Jahr verursachen könnte. Darin berücksichtigt wurden Herstellung, Betrieb und Entsorgung von Laptops und Bildschirmen für das Home Office, sowie von Videokonferenz-Systemen bei Arbeitgebern.

Laut O'Brien und Aliabadi (2020) liegen Schätzungen zum täglichen Energieverbrauch von Home Office Ausstattung pro Person und pro Home Office Tag zwischen 0,4 und 1,6 kWh; jedoch seien diese Angaben aufgrund der rapiden Weiterentwicklung der IKT veraltet.

Laut Prognos (2021) haben in der Schweiz im Jahr 2020 IKT und Unterhaltung 2,7% des Energieverbrauchs oder 8,7% des Stromverbrauchs von Haushalten verursacht (dies entspricht 5,8 PJ). Darin berücksichtigt wurden allerdings zusätzlich zu Computern und deren Peripherie (Monitore, Drucker) TV-, Video-, DVD-, Radio- und Phonogeräte, sowie (Mobil-)Telefone.

In einer Studie aus Schweden schätzten Vaddadi et al. (2020), dass der Betrieb der IT-Ausstattung in einem Co-Working Space mit 14 Arbeitsplätzen pro Tag etwa 26 MJ benötigt. Darin berücksichtigt wurden Bildschirme sowie IT-Ausstattung für die Verwaltung des Co-Working Space (Desktop Computer am Empfang, Drucker, Fernseher). Zum Vergleich: Der jährliche Energieverbrauch pro Kopf in Schweden liegt bei rund 225'000 MJ (Ritchie & Roser, 2020).

Bei den Studien, welche ausschliesslich den Stromverbrauch in der Betriebsphase berücksichtigten, muss bedacht werden, dass die Herstellung von IKT-Endgeräten in der Regel deutlich mehr THG-Emissionen verursacht als deren Betrieb über die gesamte Lebensdauer (Bieser et al., 2021a; Jattke et al., 2020).

Insgesamt ist zu erkennen, dass es nur wenige Studien zu Bereitstellungseffekten von Home Office gibt. Diese fokussieren sich hauptsächlich auf die in den Haushalten genutzten Endgeräte (Computer, Bildschirme) und weniger auf die Infrastruktur zur Bereitstellung von Home Office.

Anwendungseffekt

Optimierungs- und Substitutionseffekt

Hook et al. (2020) verglichen Studien zu THG- und Energieeffekten von Home Office. Sie zeigen, dass Home Office durch die Vermeidung von Pendelverkehr, Staus und die Reduktion des Energieverbrauchs für das Heizen, Kühlen und Beleuchten von Büroflächen THG-Emissionen vermeiden kann. Die Ergebnisse von Studien, welche den Einfluss von Heimarbeit auf zurückgelegte Fahrzeugkilometer untersuchten, liegen in der Bandbreite von -20% und +3,9%. Studien, die Personen- anstatt Fahrzeugkilometer untersuchten, errechneten Reduktionen zwischen 11,9% und 19%. Studien, die sich auf Pendelwege fokussierten, errechneten Reduktionen zwischen 2,3% und 30% pro Woche. Studien, die sich auf den Energieverbrauch fokussierten, errechneten Reduktionen zwischen 0,01% und 14%. Studien, die sich auf THG-Emissionen fokussierten, errechneten Reduktionen zwischen 0,1% und 80%.

Allerdings unterscheiden sich die Studien hinsichtlich der verwendeten Methoden (z.B. Feldstudie, hypothetische Szenarien), des Betrachtungsjahrs, der Region, der verwendeten Verkehrsmittel, der Verbreitung und Häufigkeit von Heimarbeit, und der berücksichtigten Effekte (z.B. Veränderungen von Pendelverkehr, von Freizeitverkehr, von Energieverbrauch in Haushalten und in Büros). Teilweise sind hier auch bereits potenzielle Reboundeffekte berücksichtigt (siehe folgender Abschnitt). Auch ist unklar, auf welche Gesamtmenge an Energieverbrauch und THG-Emissionen sich die Prozentangaben beziehen. O'Brien und Aliabadi (2020) führen ebenfalls eine Literaturanalyse zu Energieeffekten von Heimarbeit durch und kommen zu ähnlich Ergebnissen.

Besonders relevant für die THG-Effekte ist das üblicherweise zum Pendeln genutzte Verkehrsmittel. Während Autopendler durch Heimarbeit hohe Emissions- und Energieeinsparungen erzielen können,

sind die Einsparungen für Personen, die mit dem öffentlichen Verkehr, mit dem Fahrrad oder zu Fuss pendeln, deutlich geringer (Bieser et al., 2021b). Laut mehreren Studien führt Heimarbeit in der Regel zu Energieeinsparungen, wenn üblicherweise mit dem Auto gependelt wird (Bieser, 2020; Bieser et al., 2022; Crow & Millot, 2020). Für andere Verkehrsmittel ist die Höhe und Richtung der THG-Effekte jedoch nicht eindeutig.

In einer Schweizer Studie für das Jahr 2030 schätzten Bieser et al. (2020b), dass flexible Arbeit zwischen 72 und 876 kt CO₂e vermeiden kann. Darin berücksichtigt wurden neben der Vermeidung von Pendelverkehr auch die Reduktion von Bürofläche sowie die Reduktion von Geschäftsreisen durch Videokonferenzen, wobei die Vermeidung von Pendelverkehr und Geschäftsreisen die wichtigsten Hebel sind. Eine andere Studie aus der Schweiz kommt zu dem Ergebnis, dass «E-Work» im Jahr 2025 zwischen 86 und 183 kt CO₂e vermeiden kann (Hilty & Bieser, 2017). Darin berücksichtigt wurden neben der Vermeidung von Pendelverkehr allerdings auch die Vermeidung von Geschäftsreisen.

Eine Studie zum Arbeiten in Co-Working Spaces in der Schweiz kommt zu dem Ergebnis, dass Co-Worker weniger CO₂-Emissionen durch das Pendeln verursachen als nicht-Co-Worker, speziell in Städten (Ohnmacht et al., 2020). Wenn Co-Worker ausschliesslich aus dem Co-Working Space arbeiten würden, würde dies deren pendelbedingten CO₂-Emissionen um 10% senken.

Reboundeffekt

Die Reboundeffekte von Heimarbeit sind vielfältig. Zwar vermeidet Heimarbeit Pendelverkehr, allerdings ist es möglich, dass es zusätzlichen Verkehr für andere Zwecke erzeugt (z.B. zum Supermarkt). Zum Beispiel zeigen Fallstudien, dass Personen in Dänemark für jeden vermiedenen Kilometer zusätzliche 0,73 km zurücklegen, in den Niederlanden 0,43 km, in Deutschland 0,19 km und in Italien 0,14 km (Gossart, 2015). Die Ergebnisse solcher Studien sind allerdings stark vom Kontext der Untersuchung abhängig (Region, Stadt oder Land, Eigenschaften der untersuchten Bevölkerungsgruppe).

Zusätzlich kann Heimarbeit dazu führen, dass andere Haushaltsmitglieder mehr unterwegs sind, da z.B. das Auto tagsüber nicht mehr für das Pendeln genutzt wird. Heimarbeit spart auch Geld, welches sonst für das Pendeln (z.B. Benzin) ausgegeben werden würde und nun für andere Zwecke eingesetzt werden kann, die ebenfalls mit THG-Emissionen verbunden sind (Bieser, 2020). Eine Studie zum Energieverbrauch des Haushalts in der Schweiz von 2002 bis 2005 ergab beispielsweise, dass durchschnittliche Haushaltsausgaben mit 4 MJ/CHF verbunden sind, die Ausgaben für Strom mit 10 MJ/CHF und Ausgaben für Flugreisen mit 60 MJ/CHF (Girod et al., 2014; Girod & De Haan, 2010).

Heimarbeit kann zusätzlich den Energieverbrauch in Haushalten erhöhen, da Personen nun tagsüber zu Hause sind. Zum Beispiel nahm der Stromverbrauch in der Stadt Zürich im Jahr 2020, also während der Zeit von Home Office aufgrund der COVID-19-Pandemie, um 6% zu (Bonanomi, 2021). Wer regelmässig zu Hause arbeitet, denkt vielleicht darüber nach, in eine grössere Wohnung oder in ein grösseres Haus zu ziehen, um sich ein Home Office einzurichten, was ebenfalls THG-Emissionen erhöhen würde. Langfristig kann Heimarbeit auch die Raumnutzung verändern, z.B. da Familien aufgrund niedrigerer Mieten aus der Stadt aufs Land ziehen, was wiederum Konsequenzen für THG-Emissionen hat, da hier andere Verkehrsmittel genutzt werden und die täglichen Distanzen unter Umständen länger werden (Bieser, 2020).

Nettoeffekt

Aufgrund der Vielzahl kurzfristiger und langfristiger Effekte ist keine eindeutige Aussage darüber möglich, ob Heimarbeit zu einer Reduktion von THG-Emissionen führt. Sicherlich besteht die grösste Chance für den Klimaschutz darin, Pendelverkehr zu vermeiden. Speziell für Autopendler ist es wahrscheinlich, dass Heimarbeit zu einer Reduktion von THG-Emissionen führt. Für Personen, welche mit anderen Verkehrsmitteln pendeln ist es aber auch möglich, dass Heimarbeit zu einer Erhöhung

von THG-Emissionen führt, da z.B. mehr Energie zu Hause verbraucht wird oder Fahrten für andere Zwecke getätigt werden. Auch ist davon auszugehen, dass mit der zunehmenden Elektrifizierung des Autoverkehrs die THG-Emissionen des Pendelns in Zukunft sinken werden, wodurch die Klimaschutzpotenziale des Home Office sinken. Die Bereitstellungseffekte, also die THG-Emissionen, welche durch die für das Home Office genutzte IKT-Infrastruktur und -Endgeräte verursacht werden, sind laut der Literatur deutlich kleiner als die Anwendungseffekte (Bieser et al., 2020b; Vaddadi et al., 2020).

Möglichkeiten zur Beeinflussung von THG-Emissionen

Anbieter

Unternehmen sollten ihren Mitarbeitenden die Möglichkeit geben, von zu Hause zu arbeiten (je öfter desto mehr Wege werden vermieden) und gleichzeitig darin unterstützen, klimafreundliche Verkehrsmittel zu nutzen, wenn sie zur Arbeit kommen. Dies kann z.B. durch Zuschläge für (E-)Bikes oder ÖV-Abos erreicht werden. Zusätzlich sollten Unternehmen mit der Einführung von Home Office systematisch ihre Bürofläche reduzieren, z.B. durch geteilte Arbeitsplätze (Bieser, 2020).

Auch wenn die Bereitstellungseffekte kleiner sind als die Anwendungseffekte, können Unternehmen diese reduzieren, indem sie Mitarbeitende mit mobilen Endgeräten ausstatten, die sowohl im Büro als auch zu Hause genutzt werden, um so die Anzahl der Geräte, die hergestellt werden müssen, zu reduzieren. Zusätzlich sollte die für das Home Office genutzte IKT-Infrastruktur (z.B. Rechenzentren) mit Strom aus erneuerbaren Energien betrieben werden.

Nutzer

Arbeitnehmende, die hin und wieder von zu Hause arbeiten, sollten für berufliche und private Wege auf möglichst klimafreundliche Verkehrsmittel setzen. Um möglichst viele Pendelwege zu vermeiden, sollte möglichst häufig von zu Hause aus gearbeitet werden. Zu Hause sollte darauf geachtet werden, dass der Energieverbrauch durch das Home Office nicht steigt. Dies kann dadurch erreicht werden, wenn die Wohnfläche möglichst effizient genutzt (z.B. durch kombinierte Nutzung von Räumen für das Wohnen und das Arbeiten) und unnötiges Heizen, Kühlen oder Beleuchten vermieden wird. Um die Bereitstellungseffekte zu senken, sollten Heimarbeitende möglichst wenig Endgeräte nutzen, und diese ausschalten, wenn sie nicht benötigt werden. Als Netzwerkzugang sollten WLAN oder kabelgebundene Netze verwendet werden, da diese in der Regel energieeffizienter als Mobilfunknetze sind.

4.2 Virtuelle Meetings / Konferenzen

Verbreitung

Die COVID-19-Pandemie hat zu einer zunehmenden Nutzung von Videokonferenzen geführt (Karl et al., 2022). Zoom verzeichnete im Dezember 2019 täglich 10 Millionen Meeting-Teilnehmer, und vier Monate später, im April 2020, stieg die Zahl auf über 300 Millionen (Evans, 2020). Andere Videokonferenz-Plattformen wie Google Meet (Peters, 2020) und Microsoft Teams verzeichneten im gleichen Zeitraum ebenfalls einen erheblichen Anstieg der täglichen Teilnehmerzahlen (Thorp-Lancaster, 2020). Es ist davon auszugehen, dass Videokonferenzen auch in Zukunft viel genutzt werden. Während der COVID-19-Pandemie wurden auch viele Konferenzen virtuell anstatt physisch durchgeführt; wobei heute auch viele Konferenzen wieder physisch durchgeführt werden.

Bereitstellungseffekt

Coroamă et al. (2012) untersuchten in einer Fallstudie die THG-Emissionen zweier Konferenzen, die im Jahr 2009 gleichzeitig an zwei Standorten (in Davos, Schweiz und Nagoya, Japan) stattfanden und

virtuell verbunden wurden. Um beide Konferenzen zu verbinden, wurden an beiden Standorten Telepräsenz-Systeme aufgebaut, über die die Vorträge während drei Tagen von einem an den anderen Standort übertragen wurden. Die Autoren errechnen, dass der Energieverbrauch der gesamten IKT-Infrastruktur hierfür etwa 165 kg CO₂e verursachte.

Das Nachhaltigkeitsteam der Universität Zürich (Warland & Hilty, 2016) hat die THG-Emissionen einer vierstündigen Videokonferenz zwischen Zürich und Paris geschätzt und errechnete 1,2 kg CO₂e pro Person, unter Berücksichtigung der Herstellung, des Betriebs und der Entsorgung der benötigten Netze und Endgeräte. Für ihre Berechnungen verwendeten sie Resultate zweier anderer Studien, welche den THG-Fussabdruck einer Videokonferenz in HD-Qualität auf 160-290 g CO₂e pro Stunde schätzten (Coroamă et al., 2015; Hirschier et al., 2015).

In einer Studie berechneten Ong et al. (2014) die THG-Emissionen einer 5-stündigen Videokonferenz-Sitzung mit insgesamt 4 Teilnehmern für das Jahr 2010. Für die Berechnungen verwendeten sie eine Lebenszyklusanalyse der Endgeräte: sie berücksichtigten die Herstellung, Betrieb sowie Entsorgung der Endgeräte (z.B. Computer, Bildschirm, Projektor, Kameras). Für Tonanlagen, Mikrophone, sowie Heim- und Büronetzwerke wurde lediglich die Herstellung berücksichtigt. Die Autoren kommen zu dem Ergebnis, dass die THG-Emissionen der Videokonferenz zwischen 4 kg CO₂e und 215 kg CO₂e liegen.

Gemäss mobitool (2020) verursachte in der Schweiz im Jahr 2018 eine Stunde Videokonferenz pro Person 40,65 g CO₂e, wenn ein Ökostrommix verwendet wurde, und 44,88 g CO₂e wenn ein Verbraucherstrommix verwendet wurde.

Wie bereits unter Home Office erwähnt, schätzten Bieser et al. (2020b), dass im Jahr 2030 die Ausstattung, welche flexibles Arbeiten in der Schweiz ermöglicht, zwischen 9 und 100 kt CO₂e verursachen könnte. Darin berücksichtigt wurden die Herstellung, Betrieb und Entsorgung von Laptops und Bildschirmen für das Home Office, sowie von Videokonferenz-Systemen bei Arbeitgebern, jedoch nicht die Datenübertragung.

Anwendungseffekt

Optimierungs- und Substitutionseffekt

Das Nachhaltigkeitsteam der Universität Zürich (Warland & Hilty, 2016) verglich die THG-Emissionen einer virtuellen Konferenz mit einer Geschäftsreise per Flugzeug, Auto und Zug. Dabei wurde der Zeitaufwand einer Reise vom Hauptcampus in der Innenstadt nach Paris Gare du Nord und zurück (2x600 km) als Beispiel genommen. Für das Flugzeug und den Zug wurde eine mittlere Auslastung, und für das Auto eine Auslastung mit einer Person angenommen. Den Berechnungen zufolge verursachte die Reise mit dem Auto mit 387 kg CO₂e die meisten THG-Emissionen, gefolgt vom Flugzeug mit 366 kg CO₂e. Die Zugfahrt verursachte im Vergleich dazu nur 35 kg CO₂e. Die THG-Emissionen, die durch eine Flugreise verursacht werden, sind somit zehnmal so hoch wie wenn die Konferenz mit dem Zug besucht wird, und mehr als 300 Mal so hoch wie eine virtuelle Teilnahme.

In der Fallstudie von Coroamă et al. (2012) wurde zusätzlich berechnet, wie viele THG-Emissionen verursacht worden wären, wenn die zwei Konferenzen nicht gleichzeitig stattgefunden hätten, sondern zu unterschiedlichen Zeitpunkten, und mehrere Teilnehmer zu beiden Standorten angereist wären. Die Ergebnisse zeigten, dass durch die gleichzeitige Durchführung beider Konferenzen zwischen 37% und 50% der reisebezogenen THG-Emissionen vermieden werden konnten, vor allem da weniger geflogen wurde.

In der Studie von Ong et al. (2014) wurde zusätzlich zu den THG-Emissionen einer Videokonferenz die THG-Emissionen einer physischen Konferenzteilnahme mittels Flugzeug, Auto und Bahn berechnet. Ihre Analyse ergab, dass die THG-Emissionen für eine persönliche Konferenzteilnahme mittels

Flugzeug 3,5 t CO_{2e}, mittels Bahn 2,9 t CO_{2e} und mittels Auto 3,3 t CO_{2e} betragen. Setzt man diese Zahlen mit den THG-Emissionen einer virtuellen Konferenzteilnahme in Relation, so beträgt der obere Grenzwert für Videokonferenzen (215 kg CO_{2e}) zwischen 6,1% und 7,4% der Emissionen eines physischen Meetings.

In ihrer Studie untersuchten Hischer und Hilty (2002) die ökologischen Auswirkungen einer physischen Teilnahme an einer dreitägigen Konferenz. Dabei wurde die Organisation der Konferenz, die benötigten Materialien (z.B. gedrucktes Tagungsband, Taschen) sowie die Reiseaktivitäten der Teilnehmer berücksichtigt. Von den insgesamt 308 Teilnehmern kamen 17 mit dem Auto, 182 mit dem Zug, und 109 mit dem Flugzeug (davon waren 62 auf einem Kurzstreckenflug, 29 auf einem Mittelstreckenflug, und 18 auf einem Langstreckenflug). Die Organisation der Konferenz verursachte insgesamt 20,3 kg CO_{2e}, und die Materialien 2,4 t CO_{2e}. Die Anreise der Teilnehmer verursachte mit insgesamt 75,2 t CO_{2e} den mit Abstand grössten Teil der THG-Emissionen, wobei die Art und Weise der Anreise einen grossen Unterschied macht. Die Anreise mit dem Auto verursachte 1,1 t CO_{2e}, mit dem Zug 4,0 t CO_{2e}, mit dem Kurzstreckenflug 12,3 t CO_{2e}, mit dem Mittelstreckenflug 14,2 t CO_{2e}, und mit dem Langstreckenflug 43,6 t CO_{2e}. Betrachtet man das Verhältnis der verschiedenen Verkehrsmittel wird ersichtlich, dass 6% der Teilnehmer aufgrund ihrer Langstreckenflüge für fast 60% der Umweltbelastung (angegeben in ökologischen Belastungspunkten) verantwortlich sind. Die Anreise mit dem Zug ist dagegen vergleichsweise weniger umweltbelastend: die 60% der Teilnehmer, die mit der Bahn anreisen, sind nur für 4% der durch die Anreise zur Konferenz verursachten Umweltbelastung verantwortlich. Insgesamt ist die Anreise der Teilnehmer zur Konferenz für 96,3% der ökologischen Auswirkungen verantwortlich, wobei Flugreisen deutlich den grössten Anteil daran haben. Die verbleibenden 3,6% umfassen u. a. den vollständigen Tagungsband in Buchform und eine Baumwolltasche. Sie zeigen ebenfalls, dass die THG-Emissionen einer virtuellen Konferenz um ein Vielfaches kleiner wären, ohne die genauen Zahlen anzugeben.

Ein weiteres Beispiel, das das Ausmass der THG-Emissionen einer internationalen Konferenz verdeutlicht, ist die Herbsttagung 2019 der American Geophysical Union. Einer Schätzung zufolge kamen mehr als 28'000 Teilnehmer an die Tagung nach San Francisco, Kalifornien und verursachten allein durch die Anreise rund 80 kt CO_{2e}. Dies entspricht etwa 3 Tonnen pro Teilnehmer und insgesamt den durchschnittlichen wöchentlichen Emissionen der Stadt Edinburgh in Schottland (Klöwer et al., 2020).

In den beiden bereits beim Produkt Home Office erwähnten Schweizer Studien wurde für das Jahr 2030 geschätzt, dass flexible Arbeit in der Schweiz zwischen 72 und 876 kt CO_{2e} vermeiden kann (Bieser et al., 2020b), und für das Jahr 2025 zwischen 86 und 183 kt CO_{2e} (Hilty & Bieser, 2017). Darin berücksichtigt wurden die Vermeidung von Geschäftsreisen, die Vermeidung von Pendelverkehr, sowie in der ersten Studie auch die Reduktion von Bürofläche, wobei die Vermeidung von Pendelverkehr und Geschäftsreisen die wichtigsten Hebel sind.

Reboundeffekt

Die Möglichkeit, an Konferenzen und Meetings virtuell teilzunehmen, kann zu Reboundeffekten führen. Erstens können Zeit und Geld, die nicht für Reisen aufgewendet werden, für andere Reisen sowie für andere Aktivitäten ausgegeben werden, die mit THG-Emissionen verbunden sind (Bieser & Hilty, 2018a). Des Weiteren senkt die Technologie für virtuelle Zusammenarbeit die Kosten für die Einrichtung und Durchführung von Sitzungen, wodurch die Anzahl der Sitzungen und die nationale und internationale Zusammenarbeit im Allgemeinen zunehmen können (Bieser et al., 2020b). Dies kann dazu führen, dass die Nachfrage nach Reisen erhöht wird, weil die Technologie «Informationen über Menschen und Aktivitäten viel leichter zugänglich machen kann» und daher den «Wunsch weckt, zu reisen, um an diesen Aktivitäten teilzunehmen und mit diesen Menschen zu interagieren» (Mokhtarian, 1990, S. 235; übersetzt aus dem Englischen). Die Schätzung von Rebound- und

Induktionseffekten von Videokonferenzen ist jedoch schwierig, da sie von vielen Variablen abhängen, die je nach Sektor und sozioökonomischem Kontext variieren (Bieser et al., 2020b).

Nettoeffekt

Insgesamt zeigen die Studien, dass virtuelle Konferenzen und Meetings erheblich THG-Emissionen reduzieren können, da sie die An- und Rückreise der Teilnehmer vermeiden (Coroamă et al., 2012; Hischier & Hilty, 2002). Allerdings ist nicht eindeutig geklärt worden, inwiefern Videokonferenzen tatsächlich zu einer Vermeidung von Reisen beitragen. Vor der COVID-19-Pandemie wurden die Substitutionsraten als eher gering eingeschätzt (Arnfolk, 2002). Die Pandemie hat jedoch gezeigt, dass geeignete Regelwerke, die darauf abzielen Geschäftsreisen zu vermeiden, in Kombination mit der Nutzung von Videokonferenzen erheblich zu einer THG-Reduktion beitragen können.

Allerdings ist zu berücksichtigen, dass virtuelle Meetings und Konferenzen «die Macht der direkten Interaktion nicht vollständig ersetzen» können (Janisch & Hilty, 2017, S. 9). Face-to-Face-Meetings haben gegenüber virtuellen Meetings einige Vorteile (Janisch & Hilty, 2017; Le Quéré et al., 2015), wie z.B., dass persönliche Interaktion hilft, Vertrauen aufzubauen, dass das Erreichen von Vereinbarungen in Face-to-Face-Meetings wahrscheinlicher ist (Hiltz et al., 1986) und dass der Informationsaustausch und die Zufriedenheit der Teilnehmer höher ist (Warkentin et al., 1997). Es muss jedoch berücksichtigt werden, dass diese Vorteile kulturell bedingt sind und dass sich die Kultur ändern kann (Bieser et al., 2020b).

Möglichkeiten zur Beeinflussung von THG-Emissionen

Anbieter

Organisatoren von Konferenzen und Meetings können massgeblich THG-Emissionen reduzieren, indem sie eine virtuelle Teilnahme anbieten resp. fördern. Dazu braucht es jedoch ein angemessenes und gut funktionierendes Videokonferenz-System. Ein grosser Teil der Videokonferenzen wird noch nicht mit professionellen Videokonferenz-Systemen, sondern mit Endgeräten wie Laptops über WLAN-Netzwerke durchgeführt (Bieser et al., 2020b). Anbieter von Videokonferenzen können eine Teilnahme daran erhöhen, indem sie hochwertige Systeme installieren, die eine Teilnahme, Interaktion und auch das «Networking» unter den Teilnehmern erleichtern resp. ermöglichen (Bieser et al., 2020b; Coroamă et al., 2012). Virtual-Reality- und Augmented-Reality-Lösungen (z.B. mit intelligenten Brillen) können neue Formen von Videokonferenzen ermöglichen, und potenziell die Vermeidung von Geschäftsreisen vorantreiben (Bieser et al., 2020b). Ticketvergünstigen bei einer virtuellen Teilnahme oder Rabatte für klimafreundliche Verkehrsmittel zur Anreise können Anreize setzen um THG-Emissionen zu vermeiden.

Nutzer

Teilnehmer von Konferenzen und Meetings können die THG-Emissionen reduzieren, indem sie virtuell daran teilnehmen. Sollte eine physische Präsenz unumgänglich oder von Vorteil sein, so sollte wenn möglich ein ökologisches Reisemittel gewählt werden, wie zum Beispiel die Bahn. Arbeitgeber können Richtlinien einführen, die darauf abzielen, dass nur unter Angabe von triftigen Gründen Geschäftsreisen möglich sind und sonst Videokonferenzen genutzt werden müssen.

Schliesslich können auch auf technischer Ebene Massnahmen zur Vermeidung von THG-Emissionen getroffen werden, wie die Nutzung kleiner Bildschirme und der Einsatz von Strom aus erneuerbaren Energien für deren Betrieb. Die Vermeidung von Geschäftsreisen ist allerdings aus Sicht des Klimaschutzes bei Weitem bedeutender.

5 Landwirtschaft und Ernährung

5.1 Präzisionslandwirtschaft

Verbreitung

Der Begriff Präzisionslandwirtschaft umfasst ein modernes Konzept der landwirtschaftlichen Betriebsführung, das durch den Einsatz digitaler Technologien zur Überwachung und Optimierung landwirtschaftlicher Produktionsverfahren gekennzeichnet ist (Wissenschaftlicher Dienst des Europäischen Parlaments, 2016). Die Anwendung digitaler Technologien wie Drohnen, Sensoren und Satelliten, ermöglicht es, den Zustand von Pflanzen und Tieren zu überwachen, die gesammelten Daten zu analysieren und landwirtschaftliche Betriebsmittel wie Dünger, Pestizide und Futtermittel mit höherer Präzision als bisher anzupassen (Balafoutis et al., 2017; Bieser et al., 2020b; Tullo et al., 2017). Ziel der ist es, die Kosten zu senken, die Lebensmittelproduktion zu steigern und zu verbessern, und die Auswirkungen auf die Umwelt zu reduzieren.

Beispiele für Präzisionslandwirtschafts-Technologien in der Pflanzenproduktion sind eine variable Dünger- und Pestizidausbringung, die variable Bewässerung und Aussaat, oder eine präzise physikalische Unkrautbekämpfung (Soto et al., 2019). Maschinenleitsysteme führen Traktoren in denselben Fahrspuren über Felder, um so die Ausbringung von Saatgut oder Düngemittel zu optimieren und gleichzeitig Ernteschäden und Bodenverdichtung zu verringern (Poncet et al., 2016).

Es gibt nur wenige Daten über den Einsatz von Technologien der Präzisionslandwirtschaft in der Schweiz. Befragungen verschiedener Experten des Agrarsektors in der Schweiz, welche im Rahmen einer Studie der Universität Zürich durchgeführt wurden, ergaben, dass der Einsatz von Präzisionslandwirtschaft-Technologien im Pflanzenanbau (z.B. eine variable Stickstoffausbringung) in der Schweiz sehr gering ist, während der Einsatz solcher Technologien in der Viehzucht etwas höher ist (Bieser et al., 2020b). Eine Studie über den Einsatz von Präzisionslandwirtschaft-Technologien in Österreich ergab, dass 6% der Betriebe diese Technologien auf 13% der Ackerfläche anwenden (Hirt, 2018). In der Schweiz wurden einige Projekte zur Erprobung von Präzisionslandwirtschaft-Technologien gestartet, wie die Swiss Future Farm (Swiss Future Farm, 2022) oder der AgroVet Strickhof (AgroVet Strickhof, 2022).

Weltweit machten im Jahr 2018 die Emissionen aus der Landwirtschaft und der damit verbundenen Landnutzung 17% (9,3 Gt CO₂e) der THG-Emissionen aus (FAO, 2020). In der Schweiz ist die Landwirtschaft im Jahr 2020 für 14,6% (6,34 Mio t CO₂e) der gesamten THG-Emissionen verantwortlich. Dominierend sind hier vor allem Methan- und Lachgasemissionen: 83,4% der gesamten Methan-Emissionen und 65,3% der gesamten Lachgas-Emissionen der Schweiz stammen aus der Landwirtschaft. In der Landwirtschaft sind 60,3% der THG-Emissionen Methan-Emissionen, welche vor allem bei der Rindviehhaltung und der Hofdüngerbewirtschaftung entstehen. Lachgas-Emissionen folgen mit 29,9% an zweiter Stelle, welche vorwiegend durch landwirtschaftliche Nutzflächen und zu einem geringeren Anteil durch Hofdüngerbewirtschaftung entstehen. CO₂-Emissionen kommen mit 9,8% an dritter Stelle und werden hauptsächlich durch die Nutzung fossiler Energieträger verursacht (Bundesamt für Umwelt, 2022a).

Ein Vergleich der Treibhauspotenziale dieser drei THGs zeigt, dass Methan ein 25-mal höheres Treibhauspotenzial für einen Zeitraum von 100 Jahren als CO₂ besitzt. Lachgas hat einen Treibhauspotenzial-Wert, der 298-mal so hoch ist wie der von CO₂ auf einer Zeitskala von 100 Jahren, und ist somit das einflussreichste THG, das in der Landwirtschaft produziert wird (Soto et al., 2019).

Bereitstellungseffekt

Der Bereitstellungseffekt wurde in der Literatur kaum untersucht. Nur in einer Schweizer Studie wurden die THG-Emissionen von Endgeräten und Infrastruktur, welche für die Nutzung von

Präzisionslandwirtschafts-Technologien verwendet werden, grob geschätzt (Bieser et al., 2020b). Hier zeigte sich, dass diese gering sind im Verhältnis zu den erwarteten Anwendungseffekten, z.B. die Reduktion eingesetzter Düngemittel.

Anwendungseffekt

Optimierungs- und Substitutionseffekt

Nur wenige Studien berücksichtigten die THG-Reduktionspotenziale der Präzisionslandwirtschaft im Allgemeinen, und dies meist anhand grober Schätzungen. Dies liegt womöglich an der grossen Vielfalt und Komplexität der landwirtschaftlichen Prozesse und möglicher digitaler Anwendungen (Bieser et al., 2020a). Es gibt Studien, die sich auf einzelne Anwendungen der Präzisionslandwirtschaft fokussierten, und dabei deren Auswirkungen auf die Produktion sowie THG-Emissionen betrachteten. Wir werden im Folgenden zunächst die Studien beschreiben, die grobe Schätzungen vorgenommen haben, um uns danach auf ein paar ausgewählte Studien zu konzentrieren.

In einer optimistischen Studie von GeSI und Accenture Strategy (2015) wird prognostiziert, dass durch die Anwendung von Technologien und Verfahren der intelligenten Landwirtschaft und die darauf folgende Steigerung der Ressourcen- und Energieeffizienz global 2 Gt CO₂e pro Jahr bis 2030 vermieden werden könnten. Dieser Betrag ergebe sich hauptsächlich aus Energieeinsparungen und der effizienteren Nutzung von Wasser und Düngemitteln.

Eine Studie von GeSI und Deloitte (2019) geht davon aus, dass die erwartete Einführung digitaler Technologien in der Biosphäre und die damit verbundenen Effizienzgewinne durch die Optimierung bestehender Prozesse in der Landwirtschaft, im Strassenbau, bei den Stromnetzen und in der Fertigung zu einer Verringerung von global 668 Mt CO₂e (unter Berücksichtigung von Reboundeffekten) führen können, was nach ihren Berechnungen 1,3% der globalen Emissionen im Jahr 2030 entsprechen würde.

Das Weltwirtschaftsforum (2018) schätzt (zitiert nach DigitalEurope, 2021), dass bei einer Umstellung von 15% bis 25% der landwirtschaftlichen Betriebe auf Präzisionslandwirtschaft die weltweiten Erträge bis 2030 um 10% bis 15% gesteigert werden könnten, während die THG-Emissionen und der Wasserverbrauch um 10% bzw. 20% gesenkt werden könnten.

Soto et al. (2019) führten eine Literaturrecherche und zwischen 2016 und 2017 eine Befragung von Landwirten aus fünf europäischen Ländern durch (Griechenland, Belgien, Niederlande, Deutschland, und Grossbritannien). Ziel der Studie war es, die Potenziale der THG-Emissionsreduktion durch Präzisionslandwirtschaft im Pflanzenanbau zu ermitteln. Sie konzentrierten sich auf die folgenden sieben Hauptanwendungen: die variable Stickstoffausbringung, die variable Bewässerung, die Landwirtschaft mit kontrolliertem Verkehr, die Maschinensteuerung, der variable Einsatz von Pestiziden, die variable Pflanzung/Aussaart, und die präzise physikalische Unkrautbekämpfung. Laut dieser Studie haben die variable Stickstoffausbringung und die variable Bewässerung das grösste Potenzial zur Verringerung der THG-Emissionen, gefolgt von der Landwirtschaft mit kontrolliertem Verkehr, der Maschinensteuerung und der variablen Ausbringung von Pestiziden. Die Verringerung des Einsatzes von Stickstoffdüngern durch eine variable Stickstoffausbringung kann die Lachgas-Emissionen aus landwirtschaftlichen Böden und die CO₂-Emissionen, die bei der Produktion von Düngemitteln entstehen, reduzieren. Eine Bewässerung mit variabler Rate kann die benötigte Wassermenge und die für das Pumpen und den Transport des Wassers benötigte Energie verringern und eine extreme Wasserverfügbarkeit im Boden vermeiden, die die Lachgas-Emissionen erhöht. Durch eine kontrollierte Bewirtschaftung und Maschinenführung können die Routen von Traktoren über die Felder optimiert werden, wodurch der Einsatz von landwirtschaftlichen Betriebsmitteln (z.B. Saatgut, Treibstoff) reduziert und Bodenverdichtungen vermieden werden können. Die Autoren schätzten, dass eine variable Stickstoffausbringung und Maschinenführung 0,3-1,5% der gesamten landwirtschaftlichen THG-Emissionen in der EU im Jahr 2015 hätte vermeiden können.

Eine italienische Studie, welche 2018 durchgeführt wurde, fokussierte sich auf die Umweltauswirkungen der variablen Stickstoffausbringung im Gegensatz zur herkömmlichen, gleichmässigen Stickstoffausbringung (Bacenetti et al., 2020). Dabei wurde eine neue intelligente App zur Bestimmung des Stickstoff-Nährwertindex unter operationellen landwirtschaftlichen Bedingungen evaluiert. Anhand einer Fallstudie sollte die Umweltverträglichkeit von Düngestrategien bewertet werden, die auf der Integration der App und Fernerkundungsdaten basieren. Dabei wurden zwei verschiedene Düngestrategien für die Feldstudie in Betracht gezogen. Bei der ersten Düngestrategie (dem Basisszenario) wurde die Stickstoffdüngung auf der Grundlage der üblichen Anbaupraktiken im Untersuchungsgebiet und der Einschätzung des Landwirts über den Bedarf der Pflanzen vorgenommen. Bei der zweiten Strategie (dem Alternativszenario) wurden die App und Fernerkundungsdaten verwendet, um räumlich verteilte Schätzungen des Stickstoff-Nährwertindex abzuleiten und so die variable Stickstoffausbringung umzusetzen. Als funktionale Einheit wurde 1 t Rohreis betrachtet. Es wurde der Ansatz «von der Wiege bis zum Hoftor» verfolgt, d.h. die Systemgrenze umfasste alle Aktivitäten, die von der Gewinnung der Rohstoffe bis zur Trocknung der Reiskörner durchgeführt werden. Insbesondere wurden die folgenden Phasen des Produktionsprozesses berücksichtigt: die Gewinnung von Rohstoffen (z.B. fossile Brennstoffe, Metalle und Mineralien); die Herstellung, Wartung und Entsorgung von Investitionsgütern (z.B. Traktoren, landwirtschaftliche Maschinen, Schuppen und Getreidetrockner); die Produktion der verschiedenen Inputfaktoren (Düngemittel, Pestizide, Strom, Diesel usw.); die Emissionen im Zusammenhang mit der Verwendung von Inputfaktoren (z.B. Emissionen aufgrund der Ausbringung von Düngemitteln, Dieseltreibstoffemissionen im Zusammenhang mit der Dieselerbrennung im Traktormotor). Vertrieb, Verarbeitung, Verpackung, Verwendung und Entsorgung des Reis wurden von der Systemgrenze ausgenommen, da sie in beiden Szenarien gleich sind. Die Studie ergab, dass es beim Alternativszenario einen um 12,8% höheren Kornertrag im Vergleich zum Basisszenario gab, wobei nur 2% mehr Stickstoff ausgebracht wurde. Die Ergebnisse zeigten, dass die variable Stickstoff-Düngung im Vergleich zur gleichmässigen Stickstoffausbringung eine Verringerung der THG-Auswirkungen um 11,2% ermöglicht, von 937,3 kg auf 832,7 kg CO_{2e} pro Tonne Rohreis. Dies zeigt, dass die App zur Vermeidung von übermässigem Stickstoffgebrauch und einem daraus resultierenden Stickstoffstress für die Böden (was zu einer Verringerung des Ertragspotenzials führen kann) beitragen kann. Der kombinierte Einsatz der App mit Fernerkundungsdaten ermöglichte es, eine beträchtliche Ertragssteigerung auf Kosten einer vernachlässigbaren Erhöhung der verbrauchten Stickstoffdüngermenge zu erreichen, wodurch die pro Produkteinheit eingesetzte Stickstoffmenge reduziert wurde. Aus Umweltsicht ergibt sich daraus gemäss den Autoren ein doppelter Nutzen: einerseits die Verringerung der Auswirkungen wie beispielsweise die Versauerung und Eutrophierung der Böden, sowie die Verringerung der Emissionen von Stickstoff-Verbindungen. In Bezug auf die wirtschaftliche Nachhaltigkeit habe das vorgeschlagene System sowohl direkte Vorteile, wie z.B. ein höheres Verhältnis zwischen Ertrag und Düngemittel, als auch indirekte Vorteile, wie z.B. ein geringeres Risiko von Verlusten durch Krankheiten und Pilzbefall.

In der Schweiz wurde eine konventionelle Düngung mit einer variablen Düngung auf der Grundlage einer Stickstoffüberwachung durch Drohnen verglichen. Aus den Ergebnissen zeigt sich, dass somit der Einsatz von Düngemitteln bei gleichbleibendem Ertrag um 10% reduziert werden konnte (Zehner et al., 2019). Bosshard et al. (2012) gehen von einem Überschussverbrauch von 9'000 t Stickstoff in der Landwirtschaft in der Schweiz aus, der durch eine variable Stickstoffausbringung reduziert werden könnte (Stierli, 2017). Eine Herausforderung für die Verbreitung dieser Technologien ist jedoch, dass nicht alle erforderlichen Sensortechnologien verfügbar sind. Beispielsweise befinden sich Sensoren, die den Nitratgehalt von Böden in situ messen, noch in der Entwicklung. Die Messungen müssen somit derzeit noch in Labors durchgeführt werden (Burton, 2016).

Bieser et al. (2020b) ermittelten anhand verfügbarer Daten aus akademischen und industriellen Quellen sowie Interviews mit Experten aus der Schweiz und anderen Ländern die THG-Reduktionspotenziale von variabler Stickstoffausbringung sowie Präzisionsfütterung von Rindern in der Schweiz für das Jahr 2030. Basierend auf dem vierten Zweijahresbericht der Schweiz unter dem UNFCCC schätzten sie, dass in der Schweiz im Jahr 2030 durch die Produktion und den Einsatz von Kunstdünger 678 kt CO_{2e} und durch die Verdauungsprozesse von Rindern 3'037 kt CO_{2e} verursacht werden, (Bundesamt für Umwelt, 2020 WEM-Szenario). Basierend auf einem Projekt der Swiss Future Farm (Zehner et al., 2019) nahmen Bieser et al. (2020b) an, dass eine variable Stickstoffausbringung zwischen 2,5% und 10% der THG-Emissionen, die in der Herstellung und Ausbringung synthetischer Düngemittel entstehen, reduzieren kann. Auf der Grundlage von Bartzanas et al. (n.d.) und Experteninterviews schätzten die Autoren, dass die Präzisionsfütterung von Rindern zwischen 2,5% und 10% der THG-Emissionen, die durch Verdauungsprozessen von Rindern entstehen, reduzieren kann. Auf der Grundlage von Tullo et al. (2019) nahmen sie an, dass die Kombination von Anwendungen der Präzisionslandwirtschaft zur Erkennung von Mastitis, Lahmheit und Fruchtbarkeitsmanagement eine zusätzliche Verringerung der THG-Emissionen aus den Verdauungsprozessen von Rindern um 2,5% bis 20% ermöglichen kann.

Die oben genannten Studien deuten darauf hin, dass eine Implementierung von Präzisionslandwirtschaft-Technologien THG-Emissionen reduzieren kann. Die potenziell grössten Hebel zur Verringerung der THG-Emissionen stellen gemäss Soto et al. (2019) die variable Stickstoffausbringung und die variable Bewässerung dar.

Reboundeffekt

Verbesserungen der Ressourcen- oder Emissionseffizienz in der Landwirtschaft können direkte Reboundeffekte nach sich ziehen. Das Hauptrisiko besteht darin, dass die Produktivitätssteigerungen nicht dazu genutzt werden, den Nettoressourceneinsatz und die damit verbundenen Emissionen zu verringern, sondern die Produktion zu steigern und die Preise zu senken, was letztlich zu einem Anstieg des Ressourcenverbrauchs und der Emissionen führen könnte (Bieser et al., 2020b). In einer Studie wurden erhebliche Reboundeffekte in Bezug auf die Steigerung der Bodenproduktivität und Verbesserungen bei der Bewässerung und das daraus resultierende höhere Produktionsniveau festgestellt (Paul et al., 2019). Ein in der Studie von Bieser et al. (2020b) durchgeführtes Interview mit einem Landwirtschaftsexperten in der Schweiz zeigte auch, dass Landwirte zwar den Düngemiteleinsatz durch Präzisionslandwirtschaft-Technologien reduzieren können, aber dennoch die maximal zulässige Menge an Düngemitteln ausbringen könnten, um die Produktion zu steigern.

Nettoeffekt

Die oben genannten Studien deuten darauf hin, dass die Anwendung von Präzisionslandwirtschaft-Technologien ein relevanter Hebel für die Reduzierung von THG-Emissionen sein kann. Gemäss Soto et al. (2019) stellen die variable Stickstoffausbringung und die variable Bewässerung das grösste Potenzial zur Verringerung der THG-Emissionen dar. Jedoch wird in der Studie von Bieser et al. (2020b) aufgezeigt, dass eine Verbesserung der Ressourcen- und Emissionseffizienz zu Reboundeffekten führen können.

Möglichkeiten zur Beeinflussung von THG-Emissionen

Anbieter

Präzisionslandwirtschaft-Technologien sind in der Regel hochentwickelt und somit kapitalintensiv. Das wiederum könnte bedeuten, dass sich nur wenige grosse Betriebe solche Technologien leisten können. Um eine möglichst flächendeckende Anwendung von Präzisionslandwirtschaft-Technologien zu ermöglichen, sollten verschiedene Technologien für eine Vielzahl von landwirtschaftlichen Systemen zur Verfügung stehen, die von kleinen bis zu grossen Betrieben sowie von Ackerbau,

Gartenbau und Viehzucht reichen (Finger et al., 2019). Landwirtschaftliche Betriebe sollten in der Nutzung der Technologien unterstützt werden.

Es ist zudem festzuhalten, dass die grössten Potenziale zur Reduktion der landwirtschaftlichen THG-Emissionen in der Schweiz in verbrauchsorientierten Massnahmen (z.B. mehr pflanzliche Ernährung) und in Veränderungen der landwirtschaftlichen Strukturen (z.B. Tierbestand, Landnutzung) liegen. Die Potenziale von produktionsorientierten Methoden wie die Präzisionslandwirtschaft sind generell geringer (Bretscher et al., 2018).

Nutzer

Nutzer können ggf. landwirtschaftliche Erzeugnisse aus klimafreundlicher Produktion bevorzugen, allerdings nur, wenn ihnen diese Information auch zur Verfügung gestellt wird. Generell können Konsumenten durch ihre Ernährungsgewohnheiten einen grossen Einfluss auf THG-Emissionen nehmen. Dies steht allerdings nicht im Zusammenhang mit der Nutzung digitaler Technologien in der Landwirtschaft.

B. Bereitstellungseffekt der IKT-Endgeräte und -Infrastruktur nach Produkt als Tabelle

Alle Gewichtsangaben beziehen sich auf CO₂(e), Prozentangaben auf den Anteil an den Gesamtemissionen in CO₂(e), und alle Energieangaben auf den Stromverbrauch.

Produkt	Ort/Zeit	Funktionale Einheit	Total	Unterkategorien	Nach Lebenszyklusphase				Bemerkung	Quelle
					Herstellung	Entsorgung	Betrieb	Sonstiges		
Videostreaming	Europa/2020	Videostreaming, 1h	56 g	Rechenzentren			<1 g			Stephens et al. (2021)
				Netze			6 g		Stephens et al. (2021)	
				Heimrouter			21 g		Stephens et al. (2021)	
	Japan/2019	Videostreaming, 1 MB	140-172 mg	Rechenzentren	4.09 mg	76.8 mg	5.48 mg			Tabata & Wang (2021)
				Netze			53.5 mg		Tabata & Wang (2021)	
				Endgerät (Computer, mit/ohne Abo)			17/32.3 mg		Tabata & Wang (2021)	
Japan/2019	Videostreaming, 1 Jahr, gesamte Bevölkerung	809 kt	Rechenzentren, Netze, Endgeräte (Computer oder Smartphone)			0.113/0.215 mg		Herstellung, Betrieb, Entsorgung	Tabata & Wang (2021)	
Global/2018	Videostreaming, 1 Jahr, gesamte Bevölkerung	300 Mt	Rechenzentren, Netze, Endgeräte (Laptop, Smartphone)					Nur Betrieb	The Shift Project (2019)	
Japan/2019	Videostreaming, 1 Jahr, gesamte Bevölkerung	113 kt	Rechenzentren, Netze, Endgeräte (Computer oder Smartphone)					Nur Betrieb	Tabata & Wang (2021)	
Musikstreaming	Japan/2019	Musikstreaming, 1 MB	143-588 mg	Rechenzentren	4.09 mg	76.8 mg	5.48 mg			Tabata & Wang (2021)
				Netze			53.5 mg		Tabata & Wang (2021)	
				Endgerät (Computer, mit und ohne Abo)			449 mg		Tabata & Wang (2021)	
				Endgerät (Smartphone, mit und ohne Abo)			2.98 mg		Tabata & Wang (2021)	
	Global/2016	Musikstreaming (inkl. Video) über YouTube, 1 Jahr, gesamte Bevölkerung	10.1 Mt	Rechenzentren, Netze, Endgeräte (TV, Computer, Laptop, Tablet, etc.)					Nur Betrieb	Preist et al. (2019)
	Global/2016	Musikstreaming (inkl. Video) über YouTube, 1 Jahr, gesamte Bevölkerung	19.6 TWh	Rechenzentren			200 GWh			Preist et al. (2019)
				Kern- & Randnetze			1900 GWh		Preist et al. (2019)	
				Mobilfunknetze			8500 GWh		Preist et al. (2019)	
				Heimnetze			4200 GWh		Preist et al. (2019)	
				Endgeräte (TV, Computer, Laptop, Tablet, etc.)			6100 GWh		Preist et al. (2019)	
USA/kein Jahr	Download eines Musikalbum	400 g	Rechenzentren, Netze, Endgeräte					Nur Betrieb; Endgeräte nur für Bestellung, nicht Abspielen der Musik.	Weber et al. (2010)	
Online-Zeitung	Schweden/2010	Lesen eines Online-Magazins (kurz/wenig Leser), pro Leser	0.193 kg	Inhaltsproduktion				0.152 kg		Ahmadi Achachlouei et al. (2015)
				Speicherung und Verteilung	0.038 kg					Ahmadi Achachlouei et al. (2015)
	Schweden/2010	Lesen eines Online-Magazins (länger/viele Leser), pro Leser	0.074 kg	Inhaltsproduktion				0.019 kg		Ahmadi Achachlouei et al. (2015)
				Speicherung und Verteilung	0.045 kg					Ahmadi Achachlouei et al. (2015)
	Finland/2010	Lesen eines Online-Magazins, 1 Woche (weniger Leser)	n/a	Inhaltsproduktion				50%		Arushanyan et al. (2014)
				Upload auf Server, Download durch Nutzer			1%			Arushanyan et al. (2014)
	Finland/2010	Lesen eines Online-Magazins, 1 Woche (viele Leser)	n/a	Inhaltsproduktion				10%		Arushanyan et al. (2014)
				Upload auf Server, Download durch Nutzer			24%			Arushanyan et al. (2014)
Finland/2010	Lesen eines Online-Magazins, 1 Woche (viele Leser)	n/a	Lesegerät (Computer oder Laptop)	41%		24%			Arushanyan et al. (2014)	
			Lesegerät (Tablet)	0.009 kg					Arushanyan et al. (2015)	
E-Book-Reader	Schweden/2009	Lesen eines E-Books	0.87 kg	E-Book Reader, Redaktionelle Arbeit, Download E-Book					E-Book-Reader: Herstellung, Betrieb, Entsorgung; Download: nur Betrieb	Moberg et al. (2011)
E-Commerce	Schweiz/2018	Online einkaufen, 3 h, 1 Person	4.2%	Laptops, Internetinfrastruktur					Nur Betrieb	Hischer (2018)
Home Office	Schweiz/2030	Home Office Ausstattung, 1 Jahr, gesamte Bevölkerung	9-100 kt	Laptop, Bildschirme, Videokonferenz-Systeme					Herstellung, Betrieb, Entsorgung	Bieser et al. (2020)
	Keine Angabe	Home Office Ausstattung, 1 Home Office Tag, 1 Person	0.4-1.6 kWh	Nicht spezifiziert					Nur Betrieb	O'Brien und Alabaldi (2020)
Virtuelle Meetings/Konferenzen	Schweden/2020	IT-Ausstattung Co-Working Space, 1 Arbeitstag, 14 Arbeitsplätze	26 MJ	18 Bildschirme, 1 Desktop Computer, 1 Drucker, 1 Fernseher					Nur Betrieb	Vaddadi et al. (2020)
	Schweiz, Japan/2009	Konferenz an 2 Standorten verbunden per Videokonferenz, 3 Tage, max. 4h/Tag	165 kg	Telepräsenz-Systeme, Datenübertragung					Nur Betrieb	Coroamí et al. (2012)
				Videokonferenz-Systeme, Datenübertragung					Herstellung, Betrieb, Entsorgung	Warland und Hilty (2016)
	Keine Angabe	Videokonferenz, 5 h, 4 Personen	4-215 kg	Endgeräte, Videokonferenz-System, Heim- und Büronetze					Endgeräte: Herstellung, Betrieb und Entsorgung; Andere Geräte: teilw. nur Herstellung	Ong u. a. (2014)
				Videokonferenz, 1 h, 1 Person	40.65-44.88 g	Nicht spezifiziert				40.65 g bei Ökostrommix, und 44.88 g bei Verbraucherstrommix
Schweiz/2030	Home Office Ausstattung, 1 Jahr, gesamte Bevölkerung	9-100 kt	Laptop, Bildschirme, Videokonferenz-Systeme					Herstellung, Betrieb, Entsorgung	Bieser et al. (2020)	

Tabelle 4: Bereitstellungseffekt der IKT-Endgeräte und -Infrastruktur nach Sektor und Produkt

Literaturverzeichnis

- Admeira. (2022). *Medien der Zukunft 2022*. https://admeira.ch/downloads/Medien_der_Zukunft_2022_Kurzfassung_DE.pdf
- AgroVet Strickhof. (2022). *AgroVet Strickhof*. <https://www.agrovet-strickhof.ch/>
- Ahmadi Achachlouei, M., & Moberg, Å. (2015). Life Cycle Assessment of a Magazine, Part II: A Comparison of Print and Tablet Editions: LCA of a Magazine, Part II: Print vs. Tablet. *Journal of Industrial Ecology*, 19(4), 590–606. <https://doi.org/10.1111/jiec.12229>
- Ahmadi Achachlouei, M., Moberg, Å., & Hochschorner, E. (2015). Life Cycle Assessment of a Magazine, Part I: Tablet Edition in Emerging and Mature States: LCA of a Magazine, Part I: Tablet Edition. *Journal of Industrial Ecology*, 19(4), 575–589. <https://doi.org/10.1111/jiec.12227>
- Ahn, K., & Rakha, H. (2008). The effects of route choice decisions on vehicle energy consumption and emissions. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 13(3), 151–167. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2008.01.005>
- Apple. (2021). *Product Environmental Report. iPhone 13 Pro*. https://www.apple.com/environment/pdf/products/iphone/iphone_13_Pro_PER_Sept2021.pdf
- Arnfolk, P. (2002). Information and communications technologies and business travel: Environmental possibilities, problems and implications. In J. Park & N. Roome, *The Ecology of the New Economy: Sustainable Transformation of Global Communications and Electronics Industries*. Greenleaf Publishing. <https://lup.lub.lu.se/record/955585>
- Arunan, I., & Crawford, R. H. (2021). Greenhouse gas emissions associated with food packaging for online food delivery services in Australia. *Resources, Conservation and Recycling*, 168, 105299. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105299>
- Arushanyan, Y., Moberg, Å., Nors, M., & Hohenthal, C. (2014). Media content provided on different platforms: Environmental performance of online and printed versions of Alma Media newspapers. *J. Print Media Technol. Res.*, 3(1), 7–31.
- Bacenetti, J., Paleari, L., Tartarini, S., Vesely, F. M., Foi, M., Movedi, E., Ravasi, R. A., Bellopede, V., Durello, S., Ceravolo, C., Amicizia, F., & Confalonieri, R. (2020). May smart technologies reduce the environmental impact of nitrogen fertilization? A case study for paddy rice. *Science of The Total Environment*, 715, 136956. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136956>
- Balafoutis, A., Beck, B., Fountas, S., Vangeyte, J., Wal, T., Soto, I., Gómez-Barbero, M., Barnes, A., & Eory, V. (2017). Precision Agriculture Technologies Positively Contributing to GHG Emissions Mitigation, Farm Productivity and Economics. *Sustainability*, 9(8), 1339. <https://doi.org/10.3390/su9081339>
- Bartzanas, T., Amon, B., Calvet, S., Mele, M., Morgavi, D., Norton, T., Yanez-Ruiz, D., & Van Dongen, C. (n.d.). *Reducing livestock emissions from Cattle farming. Mini-paper – Precision Livestock Farming* (EIP-AGRI Focus Group).
- Behzad, M., Choi, H., Kim, H., & Tenreiro, C. (2014). Exergy evaluation of emitted waste gas and fuel consumption in food delivery process. *International Journal of Exergy*, 15(3), 382. <https://doi.org/10.1504/IJEX.2014.065702>
- Benz, M., Feldges, D., & Müller, G. V. (2022, Februar 18). Von «zurück ins Büro» bis «volle Flexibilität»: Der Startschuss für die Arbeitswelt nach Corona ist gefallen. *Neue Zürcher Zeitung*. <https://www.nzz.ch/wirtschaft/arbeiten-nach-corona-was-schweizer-unternehmen-planen-ld.1670495?reduced=true>
- Beretta, C., & Hellweg, S. (2019). *Lebensmittelverluste in der Schweiz: Umweltbelastung und Vermeidungspotential* [Wissenschaftlicher Schlussbericht]. ETH Zürich. <https://www.news.admin.ch/newsd/message/attachments/58769.pdf>
- Bieser, J. (2020). *A time-use approach to assess indirect environmental effects of information and communication technology: Time rebound effects of telecommuting*. University of Zurich. <https://doi.org/10.5167/uzh-191486>
- Bieser, J., Burkhalter, L., Hilty, L. M., Fuchs, B., & Blumer, Y. (2021a). Lifetime extension of mobile internet-enabled devices: Measures, challenges and environmental implications. *4th Conference on Product Lifetimes and the Environment (PLATE)*. <https://doi.org/10.5167/uzh-204774>
- Bieser, J., Vaddadi, B., Kramers, A., Höjer, M., & Hilty, L. M. (2021b). Impacts of telecommuting on time use and travel: A case study of a neighborhood telecommuting center in Stockholm. *Travel Behaviour and Society*, 23, 157–165. <https://doi.org/10.1016/j.tbs.2020.12.001>
- Bieser, J., & Coroamă, V. C. (2021). Direkte und indirekte Umwelteffekte der Informations- und Kommunikationstechnologie. *Sustainability Management Forum | NachhaltigkeitsManagementForum*, 29(1), 1–11. <https://doi.org/10.1007/s00550-020-00502-4>
- Bieser, J., & Hilty, L. M. (2018a). An Approach to Assess Indirect Environmental Effects of Digitalization Based on a Time-Use Perspective. In H.-J. Bungartz, D. Kranzlmüller, V. Weinberg, J. Weismüller, & V. Wohlgemuth (Hrsg.), *Advances and New Trends in Environmental Informatics* (S. 67–78). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-99654-7_5
- Bieser, J., & Hilty, L. M. (2018b). Assessing Indirect Environmental Effects of Information and Communication Technology (ICT): A Systematic Literature Review. *Sustainability*, 10(8), 2662. <https://doi.org/10.3390/su10082662>
- Bieser, J., Hintemann, R., Beucker, S., Schramm, S., & Hilty, L. M. (2020a). *Klimaschutz durch digitale Technologien – Chancen und Risiken. Kurzstudie*. Bitkom e.V. <https://doi.org/10.5167/uzh-190091>
- Bieser, J., Salieri, B., Hischier, R., & Hilty, L. M. (2020b). *Next generation mobile networks: Problem or opportunity for climate protection?* University of Zurich, Empa. <https://doi.org/10.5167/uzh-191299>

- Bieser, J., Höjer, M., Kramers, A., & Hilty, L. M. (2022). Toward a method for assessing the energy impacts of telecommuting based on time-use data. *Travel Behaviour and Society*, 27, 107–116. <https://doi.org/10.1016/j.tbs.2021.12.002>
- Bieser, J., & Kriukelyte, E. (2021). *The digitalization of passenger transport: Technologies, applications and potential implications for greenhouse gas emissions*. KTH Royal Institute of Technology. <https://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A1614814&dswid=9142>
- Bonanomi, K. (2021, März 19). *Führt Homeoffice zu viel höherer Stromrechnung?* srf.ch. <https://www.srf.ch/news/schweiz/stromverbrauch-waehrend-corona-fuehrt-homeoffice-zu-viel-hoeherer-stromrechnung>
- Borowsky, J., Meier, L., & Wagner vom Berg, B. (2019). Comparative quantification of GHG-emissions from stationary retail and e-commerce. *Proceedings of 33rd EnviroInfo Conference 2019*, 336–342.
- Börsenblatt. (2020, April 9). *Interesse an E-Books sprunghaft angestiegen*. <https://www.boersenblatt.net/archiv/1846356.html>
- Bosshard, C., Spiess, E., & Richner, W. (2012). *Überprüfung der Methode Suisse-Bilanz: Schlussbericht*. Eidgenössisches Volkswirtschaftsdepartement EVD, Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon ART.
- Brennan, M. (2019). *Music consumption has unintended economic and environmental costs*. University of Glasgow. https://www.gla.ac.uk/news/archiveofnews/2019/april/headline_643297_en.html
- Brennan, M., & Devine, K. (2020). The cost of music. *Popular Music*, 39(1), 43–65. <https://doi.org/10.1017/S0261143019000552>
- Bretscher, D., Ammann, C., Wüst, C., Nyfeler, A., & Felder, D. (2018). Reduktionspotenziale von Treibhausgasemissionen aus der Schweizer Nutztierhaltung. *Agrarforschung Schweiz*, 9(11–12), 376–383.
- Bundesamt für Statistik. (2020). *Kulturverhalten in der Schweiz. Wichtigste Ergebnisse 2019 und Vergleich mit 2014*. <https://www.bfs.admin.ch/bfs/de/home/statistiken/kultur-medien-informationsgesellschaft-sport/kultur/kulturverhalten/musik-hoeren.assetdetail.15044399.html>
- Bundesamt für Statistik. (2021a). *Medienmitteilung: Internetnutzung in den Haushalten im Jahr 2021*. <https://www.bfs.admin.ch/news/de/2021-0423>
- Bundesamt für Statistik. (2021b). *Über 8,6 Millionen E-Book-Nutzungen in den Schweizer Bibliotheken im Jahr 2020*. <https://www.bfs.admin.ch/bfs/de/home/statistiken/kataloge-datenbanken/medienmitteilungen.assetdetail.18584379.html#:~:text=Bibliotheksstatistik%202020%20%C3%9Cber%208%2C6,%20%C3%BCber%2067%2C4%20Millionen%20Druckschriften.>
- Bundesamt für Statistik. (2022a, Januar 24). *Pendlermobilität im Jahr 2020*. <https://www.bfs.admin.ch/bfs/de/home/statistiken/mobilitaet-verkehr/personenverkehr.gnpdetail.2022-0390.html>
- Bundesamt für Statistik. (2022b, Mai 19). *Teleheimarbeit*. <https://www.bfs.admin.ch/bfs/de/home/statistiken/kultur-medien-informationsgesellschaft-sport/informationsgesellschaft/gesamtindikatoren/volkswirtschaft/teleheimarbeit.html#:~:text=Teleheimarbeit%20wird%20definiert%20als%20Arbeit,der%20Covid%2D19%2DPandemie.>
- Bundesamt für Umwelt. (2017). *Emissionen von Treibhausgasen nach CO₂-Gesetz und Kyoto-Protokoll, 2. Verpflichtungsperiode (2013–2020)*. <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/klima/zustand/daten/co2-statistik.html>
- Bundesamt für Umwelt. (2020). *Switzerland's Fourth Biennial Report under the UNFCCC*. <https://www.bafu.admin.ch/bafu/en/home/topics/climate/state/data/climate-reporting/national-communications-and-biennial-reports.html>
- Bundesamt für Umwelt. (2022a). *Kenngrossen zur Entwicklung der Treibhausgasemissionen in der Schweiz: 1990–2020*. <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/klima/zustand/daten/treibhausgasinventar.html>
- Bundesamt für Umwelt. (2022b, April 11). *Klima: Das Wichtigste in Kürze*. <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/klima/inkuerze.html>
- Burton, R. (2016). *Nitrate Sensing in the Soil*. <https://www.cambridgeconsultants.com/insights/nitrate-sensing-in-the-soil>
- Carroll, P., Caulfield, B., & Ahern, A. (2019). Measuring the potential emission reductions from a shift towards public transport. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 73, 338–351. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2019.07.010>
- Cisco. (2018). *Cisco Visual Networking Index: Forecast and Trends, 2017–2022 [White Paper]*. <https://newsroom.cisco.com/press-release-content?articleId=1955935>
- CityLogistics. (2020, September 3). *Effect of pick-up points and returns on CO₂ emissions in parcel deliveries*. <http://www.citylogistics.info/research/effect-of-pick-up-points-and-returns-on-co2-emissions-in-parcel-deliveries/>
- Coroamă, V. C. (2020, Juli 5). *CO₂-Fussabdruck im Internet: Surfe ich das Klima kaputt?* [SRF]. <https://www.srf.ch/kultur/gesellschaft-religion/wochenende-gesellschaft/co2-fussabdruck-im-internet-surfe-ich-das-klima-kaputt>
- Coroamă, V. C., Hilty, L. M., & Birtel, M. (2012). Effects of Internet-based multiple-site conferences on greenhouse gas emissions. *Telematics and Informatics*, 29(4), 362–374. <https://doi.org/10.1016/j.tele.2011.11.006>
- Coroamă, V. C., & Mattern, F. (2019). Digital Rebound – Why Digitalization Will Not Redeem Us Our Environmental Sins. In A. Wolff (Hrsg.), *Proceedings of the 6th International Conference on ICT for Sustainability (ICT4S 2019)* (Bd. 2382). <http://ceur-ws.org/Vol-2382/>
- Coroamă, V. C., Schien, D., Preist, C., & Hilty, L. M. (2015). The Energy Intensity of the Internet: Home and Access Networks. In L. M. Hilty & B. Aebischer (Hrsg.), *ICT Innovations for Sustainability* (Bd. 310, S. 137–155). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-09228-7_8

- Cristescu, A. (2021, März 18). *Mobility as a Service: Smarter Klimaschutz für Unternehmen*. <https://blog.iao.fraunhofer.de/mobility-as-a-service-smarter-klimaschutz-fuer-unternehmen/>
- Crow, D., & Millot, A. (2020, Juni 12). *Working from home can save energy and reduce emissions. But how much?* [iea.org. https://www.iea.org/commentaries/working-from-home-can-save-energy-and-reduce-emissions-but-how-much](https://www.iea.org/commentaries/working-from-home-can-save-energy-and-reduce-emissions-but-how-much)
- DigitalEurope. (2021). *Digital action = Climate action: 8 ideas to accelerate the twin transition*. <https://www.digitaleurope.org/resources/digital-action-climate-action-8-ideas-to-accelerate-the-twin-transition/>
- Docherty, I., Marsden, G., & Anable, J. (2018). The governance of smart mobility. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 115, 114–125. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2017.09.012>
- Ericsson, E., Larsson, H., & Brundell-Freij, K. (2006). Optimizing route choice for lowest fuel consumption – Potential effects of a new driver support tool. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 14(6), 369–383. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2006.10.001>
- Evans, B. (2020, Juni 4). *The Zoom Revolution: 10 Eye-Popping Stats from Tech's New Superstar*. <https://accelerationeconomy.com/cloud/the-zoom-revolution-10-eye-popping-stats-from-techs-new-superstar/>
- FAO. (2020). *Emissions due to agriculture. Global, regional and country trends 2000–2018* (TAOSTAT Analytical Brief Series No 18). <https://www.fao.org/3/cb3808en/cb3808en.pdf>
- Fernández Briseño, D., Chegut, A., Glennon, E., Scott, J., & Yang, J. (2020). *Retail Carbon Footprints: Measuring Impacts from Real Estate and Technology*. MIT Real Estate Innovation Lab. <https://mitcre.mit.edu/news/retail-carbon-footprints-measuring-impacts-from-real-estate-and-technology>
- Fevrin, N. (2022). *The Carbon Footprint of Food Delivery Services*. <https://insights.workwave.com/industry/home-delivery/the-carbon-footprint-of-food-delivery-services/>
- Finger, R., Swinton, S. M., El Benni, N., & Walter, A. (2019). Precision Farming at the Nexus of Agricultural Production and the Environment. *Annual Review of Resource Economics*, 11(1), 313–335. <https://doi.org/10.1146/annurev-resource-100518-093929>
- Fioreze, T., de Gruijter, M., & Geurs, K. (2019). On the likelihood of using Mobility-as-a-Service: A case study on innovative mobility services among residents in the Netherlands. *Case Studies on Transport Policy*, 7(4), 790–801. <https://doi.org/10.1016/j.cstp.2019.08.002>
- Frick, V., & Matthies, E. (2020). Everything is just a click away. Online shopping efficiency and consumption levels in three consumption domains. *Sustainable Production and Consumption*, 23, 212–223. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2020.05.002>
- Gallego-Schmid, A., Mendoza, J. M. F., & Azapagic, A. (2019). Environmental impacts of takeaway food containers. *Journal of Cleaner Production*, 211, 417–427. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.220>
- GeSI, & Accenture Strategy. (2015). *#SMARTer2030. ICT Solutions for 21st Century Challenges*.
- GeSI, & Deloitte. (2019). *Digital with Purpose – Delivering a SMARTer 2030*.
- Girod, B., & De Haan, P. (2010). More or Better? A Model for Changes in Household Greenhouse Gas Emissions due to Higher Income. *Journal of Industrial Ecology*, 14(1), 31–49. <https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2009.00202.x>
- Girod, B., Lang, T., & Nägele, F. (2014). *Abschlussbericht. Energieeffizienz in Gebäuden: Herausforderungen und Chancen für Energieversorger und Technologiehersteller*. https://sustec.ethz.ch/content/dam/ethz/special-interest/mtec/sustainability-and-technology/PDFs/SER_Final_report.pdf
- Glasgow, D. (2021, März 30). *Redefining what a map can be with new information and AI*. <https://www.blog.google/products/maps/redefining-what-map-can-be-new-information-and-ai/>
- Gossart, C. (2015). Rebound Effects and ICT: A Review of the Literature. In L. M. Hilty & B. Aebischer (Hrsg.), *ICT Innovations for Sustainability* (Bd. 310, S. 435–448). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-09228-7_26
- Handelsverband.swiss. (2022). *Schweizer Online-Konsum wächst 2021 weiter um 9.9 %*. <https://handelsverband.swiss/news/schweizer-online-konsum-waechst-2021-weiter-um-9-9/>
- Henry, M., Jan, R., Daniel, W. A., Kay, & Martin, R. (2021). *ETH Mobility Initiative Project MI-01-19 Empirical use and Impact analysis of MaaS: Ergebnisse* (S. 126 slides) [Application/pdf]. ETH Zurich. <https://doi.org/10.3929/ETHZ-B-000521380>
- Hensher, D. A., Ho, C. Q., & Reck, D. J. (2021). Mobility as a service and private car use: Evidence from the Sydney MaaS trial. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 145, 17–33. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2020.12.015>
- Hilty, L. M., & Aebischer, B. (2015). ICT for Sustainability: An Emerging Research Field. In L. M. Hilty & B. Aebischer (Hrsg.), *ICT Innovations for Sustainability* (Bd. 310, S. 3–36). Springer International Publishing. http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-09228-7_1
- Hilty, L. M., & Bieser, J. (2017). *Opportunities and Risks of Digitalization for Climate Protection in Switzerland*. University of Zurich. <https://doi.org/10.5167/uzh-141128>
- Hiltz, S. R., Johnson, K., & Turoff, M. (1986). Experiments in Group Decision Making Communication Process and Outcome in Face-to-Face Versus Computerized Conferences. *Human Communication Research*, 13(2), 225–252. <https://doi.org/10.1111/j.1468-2958.1986.tb00104.x>
- Hirt, M. (2018). *Digitalisierung in der Land- und Forstwirtschaft* (ÖFS Wintertagung, Fachtag Schweinehaltung). <http://docplayer.org/75813653-Digitalisierung-in-der-land-und-forstwirtschaft-fachtag-schweinehaltung-oesf-wintertagung-messe-wels-di-martin-hirt.html>

- Hischier, R. (2018). Car vs. Packaging – A First, Simple (Environmental) Sustainability Assessment of Our Changing Shopping Behaviour. *Sustainability*, 10(9), 3061. <https://doi.org/10.3390/su10093061>
- Hischier, R., Coroama, V. C., Schien, D., & Ahmadi Achachlouei, M. (2015). Grey Energy and Environmental Impacts of ICT Hardware. In L. M. Hilty & B. Aebischer (Hrsg.), *ICT Innovations for Sustainability* (Bd. 310, S. 171–189). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-09228-7_10
- Hischier, R., & Hilty, L. (2002). Environmental impacts of an international conference. *Environmental Impact Assessment Review*, 22(5), 543–557. [https://doi.org/10.1016/S0195-9255\(02\)00027-6](https://doi.org/10.1016/S0195-9255(02)00027-6)
- Ho, C. Q., Hensher, D. A., & Reck, D. J. (2021). Drivers of participant's choices of monthly mobility bundles: Key behavioural findings from the Sydney Mobility as a Service (MaaS) trial. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 124, 102932. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2020.102932>
- Hook, A., Court, V., Sovacool, B. K., & Sorrell, S. (2020). A systematic review of the energy and climate impacts of teleworking. *Environmental Research Letters*, 15(9), 093003. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab8a84>
- Horizont Online. (2020). *Streaming überholt bei den jungen Zuschauern das lineare Fernsehen*. <https://www.horizont.net/medien/nachrichten/gfk-umfrage-jeder-zweite-deutsche-nutzt-regelmaessig-ein-streaming-abo-185296>
- IFPI. (2021). *Engaging with Music*. <https://www.ifpi.org/wp-content/uploads/2021/10/IFPI-Engaging-with-Music-report.pdf>
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2015). *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change: Working Group III Contribution to the IPCC Fifth Assessment Report*. Cambridge University Press.
- International Transport Forum. (2017). *Shared Mobility Simulations for Auckland* (International Transport Forum Policy Papers Nr. 41; International Transport Forum Policy Papers, Bd. 41). OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/5423af87-en>
- Janisch, T., & Hilty, L. M. (2017). *Changing university culture towards reduced air travel – Background Report for the 2017 Virtual Conference on University Air Miles Reduction*. <https://doi.org/10.5167/UZH-142121>
- Jattke, M., Bieser, J., Blumer, Y., Itten, R., & Stucki, M. (2020, September 1). Environmental implications of service life extension of mobile devices. *WEEE Plastic Characterization and Recyclability Assessment: A Case Study for Household Appliances*. Electronics Goes Green 2020+, Berlin: Fraunhofer IZM. <https://doi.org/10.21256/ZHAW-20808>
- Kamiya, G. (2020, Dezember 11). *The carbon footprint of streaming video: Fact-checking the headlines*. <https://www.iea.org/commentaries/the-carbon-footprint-of-streaming-video-fact-checking-the-headlines>
- Karl, K. A., Peluchette, J. V., & Aghakhani, N. (2022). Virtual Work Meetings During the COVID-19 Pandemic: The Good, Bad, and Ugly. *Small Group Research*, 53(3), 343–365. <https://doi.org/10.1177/10464964211015286>
- Klöß, S., Böhm, K., & Esser, R. (2019). *Zukunft der Consumer Technology – 2019. Marktentwicklung, Trends, Mediennutzung, Technologien, Geschäftsmodelle*. Bitkom e.V.
- Klöwer, M., Hopkins, D., Allen, M., & Higham, J. (2020). An analysis of ways to decarbonize conference travel after COVID-19. *Nature*, 583(7816), 356–359. <https://doi.org/10.1038/d41586-020-02057-2>
- Köhn, M., Gröger, J., & Stobbe, L. (2020). *Energie- und Ressourceneffizienz digitaler Infrastrukturen. Ergebnisse des Forschungsprojektes „Green Cloud-Computing“*. Umweltbundesamt Deutschland.
- Kozak, G. (2003). *Printed Scholarly Books and E-book Reading Devices: A Comparative Life Cycle Assessment of Two Book Options*. Center for Sustainable Systems - University of Michigan.
- Kressbach, M. (2019, Februar 1). *Wer lotst besser: Apps und Navigationsgeräte im Test*. SRF Kassensturz. <https://www.srf.ch/sendungen/kassensturz-esspresso/wer-lotst-besser-apps-und-navigationsgeraete-im-test>
- Laine, A., Lampikoski, T., Rautiainen, T., Bröckl, M., Bang, C., Poulsen, N. S., & Kofoed-Wiuff, A. (2018). *Mobility as a Service and Greener Transportation Systems in a Nordic context*. Nordic Council of Ministers.
- Lang, T. (2020, September 27). *Onlineanteil bei Food-Delivery Services übersteigt umsatzmässig den Online-Lebensmittel-Handel*. carpathia.ch. <https://blog.carpathia.ch/2020/09/27/food-delivery-services-ueberholen-umsatzmaessig-den-online-lebensmittel-handel-efood/>
- Lang, T. (2021, Januar 19). *Lebensmittel Online: Migros, Coop und Farny knacken die CHF 500 Mio. Umsatzgrenze*. carpathia.ch. <https://blog.carpathia.ch/2021/01/19/lebensmittel-online-migros-coop-und-farmy-knacken-die-chf-500-mio-umsatzgrenze-efood/#:~:text=E-Food>
- Le Quééré, C., Capstick, S., Corner, A., Cutting, D., Johnson, M., Minns, A., Schroeder, H., Walker-Springett, K., Whitmarsh, L., & Wood, R. (2015). *Towards a culture of low-carbon research for the 21st Century* (Working Paper 161).
- MaaS Alliance. (2022). *Mobility as a Service?* <https://maas-alliance.eu/homepage/what-is-maas/>
- Marks, L. U., Makonin, S., Rodriguez-Silva, A., & Przedpełski, R. (2021). *Tackling the Carbon Footprint of Streaming Media*. Simon Fraser University. <https://www.sfu.ca/sca/projects---activities/streaming-carbon-footprint.html>
- Milmo, D. (2021, Oktober 11). *Google Maps now shows the lowest-carbon route for car journeys*. <https://grist.org/article/google-maps-now-shows-the-lowest-carbon-route-for-car-journeys/>
- Moberg, Å., Borggren, C., & Finnveden, G. (2011). Books from an environmental perspective – Part 2: E-books as an alternative to paper books. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 16(3), 238–246. <https://doi.org/10.1007/s11367-011-0255-0>
- mobitool. (2020). *Mobitool-Faktoren v2.1*. <https://www.mobitool.ch/de/tools/mobitool-faktoren-v2-1-25.html>

- Mokhtarian, P. L. (1990). A typology of relationships between telecommunications and transportation. *Transportation Research Part A: General*, 24(3), 231–242. [https://doi.org/10.1016/0191-2607\(90\)90060-J](https://doi.org/10.1016/0191-2607(90)90060-J)
- Nielsen. (2017). *Time with Tunes: How Technology is Driving Music Consumption*. <https://www.nielsen.com/us/en/insights/article/2017/time-with-tunes-how-technology-is-driving-music-consumption/>
- O'Brien, W., & Yazdani Aliabadi, F. (2020). Does telecommuting save energy? A critical review of quantitative studies and their research methods. *Energy and Buildings*, 225, 110298. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110298>
- Ohnmacht, T., Z'Rotz, J., & Dang, L. (2020). Relationships between coworking spaces and CO₂ emissions in work-related commuting: First empirical insights for the case of Switzerland with regard to urban-rural differences. *Environmental Research Communications*, 2(12), 125004. <https://doi.org/10.1088/2515-7620/abd33e>
- Ong, D., Moors, T., & Sivaraman, V. (2014). Comparison of the energy, carbon and time costs of videoconferencing and in-person meetings. *Computer Communications*, 50, 86–94. <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2014.02.009>
- Paul, C., Techen, A.-K., Robinson, J. S., & Helming, K. (2019). Rebound effects in agricultural land and soil management: Review and analytical framework. *Journal of Cleaner Production*, 227, 1054–1067. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.115>
- Peirson-Hagger, E. (2021). "It's unmanageable": How the vinyl industry reached breaking point. <https://www.newstatesman.com/culture/music/2021/09/its-unmanageable-how-the-vinyl-industry-reached-breaking-point>
- Peirson-Hagger, E., & Swindells, K. (2021, November 5). *How environmentally damaging is music streaming?* <https://www.newstatesman.com/environment/2021/11/how-environmentally-damaging-is-music-streaming>
- Peters, J. (2020, April 28). *Google's Meet teleconferencing service now adding about 3 million users per day*. <https://www.theverge.com/2020/4/28/21240434/google-meet-three-million-users-per-day-pichai-earnings>
- Plüss, M. (2015, November 13). *Online vs. Papier – Zahlen und Fakten*. <https://www.greenpeace.ch/de/hintergrund/44410/online-vs-papier-zahlen-und-fakten/>
- Poncet, A., Fulton, J., Port, K., McDonald, T., & Pate, G. (2016). *Optimizing Field Traffic Patterns to Improve Machinery Efficiency: Path Planning Using Guidance Lines*. Ohionline. <https://ohionline.osu.edu/factsheet/fabe-5531>
- Popa, B. (2022, Mai 15). *Google Maps and Waze Are Still the Most Popular Navigation Apps*. <https://www.autoevolution.com/news/google-maps-and-waze-are-still-the-most-popular-navigation-apps-188811.html>
- Preist, C., Schien, D., & Shabajee, P. (2019). Evaluating Sustainable Interaction Design of Digital Services: The Case of YouTube. *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 1–12. <https://doi.org/10.1145/3290605.3300627>
- Presseportal Schweiz. (2021). *Der Schweizer Food Delivery-Markt ist um 64% auf 2.1 Mia CHF gewachsen*. <https://www.presseportal-schweiz.ch/pressemeldungen/der-schweizer-food-delivery-markt-ist-um-64-21-mia-chf-gewachsen>
- Prognos AG. (2021). *Der Energieverbrauch der Privaten Haushalte 2000–2020. Ex-Post-Analyse nach Verwendungszwecken und Ursachen der Veränderungen*. Prognos AG. <https://www.bfe.admin.ch/bfe/de/home/versorgung/statistik-und-geodaten/energiestatistiken/energieverbrauch-nach-verwendungszweck.exturl.html/aHR0cHM6Ly9wdWJkYi5iZmUuYWwRtaW4uY2gvZGUvcHVibGJlYX/Rpb24vZG93bmxvYWQvMTA3MTI=.html>
- Radio Télévision Suisse. (2020). *Ecobilans de nos gestes du quotidien*. <https://www.rts.ch/la-1ere/programmes/on-en-parle/11390204-ecobilans-gestes-quotidien.html>
- Reck, D. J., Axhausen, K. W., Hensher, D. A., & Ho, C. Q. (2021). *Multimodal transportation plans: Empirical evidence on uptake, usage and behavioral implications from the Augsburg MaaS trial* [Application/pdf]. 17 p. <https://doi.org/10.3929/ETHZ-B-000477951>
- Ritchie, H., & Roser, M. (2020). *Sweden: Energy Country Profile*. Our World in Data. <https://ourworldindata.org/energy/country/sweden>
- Santarius, T. (2017, Februar 16). *Digitalization, Efficiency and the Rebound Effect*. <https://degrowth.info/blog/digitalization-efficiency-and-the-rebound-effect>
- SBVV. (2022). *Deutschschweizer Buchmarkt 2021*. <https://www.sbv.ch/content/19/Verzeichnisse/Branchenzahlen>
- Schien, D., Shabajee, P., Chandaria, J., Williams, D., Preist, C., & Fletcher, C. (2020, September). Using Behavioural Data to Assess the Environmental Impact of Electricity Consumption of Alternate Television Service Distribution Platforms. *BBC Research & Development White Paper WHP 372*. https://www.bbc.co.uk/rd/publications/whp372_behavioural_data_environment_impact_electricity_consumption_tv_platforms
- Schweizer Medien. (2021). *Branchendaten. Fakten zur Medienlandschaft Schweiz*. <https://www.schweizermedien.ch/zahlen-fakten/branchendaten>
- Shehabi, A., Walker, B., & Masanet, E. (2014). The energy and greenhouse-gas implications of internet video streaming in the United States. *Environmental Research Letters*, 9(5), 054007. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/5/054007>
- Siikavirta, H., Punakivi, M., Kärkkäinen, M., & Linnanen, L. (2008). Effects of E-Commerce on Greenhouse Gas Emissions: A Case Study of Grocery Home Delivery in Finland. *Journal of Industrial Ecology*, 6(2), 83–97. <https://doi.org/10.1162/108819802763471807>

- Sochor, J., Strömberg, H., & Karlsson, I. C. M. (2015). The Added Value of a New, Innovative Travel Service: Insights from the UbiGo Field Operational Test in Gothenburg, Sweden. In R. Giaffreda, D. Cagaňová, Y. Li, R. Riggio, & A. Voisard (Hrsg.), *Internet of Things. IoT Infrastructures* (Bd. 151, S. 169–175). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-19743-2_26
- Sonesson, U., Mattson, B., Nybrant, T., & Ohlsson, T. (2005). Industrial Processing versus Home Cooking: An Environmental Comparison between Three Ways to Prepare a Meal. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, 34(4), 414–421. [https://doi.org/10.1579/0044-7447\(2005\)034\[0414:IPVHCA\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1579/0044-7447(2005)034[0414:IPVHCA]2.0.CO;2)
- Soto, I., Barnes, A., Balafoutis, A., Beck, B., Sánchez Fernandez, B., Vangeyte, J., Fountas, S., Van der Wal, T., Eory, V., & Gómez Barbero, M. (2019). *The contribution of precision agriculture technologies to farm productivity and the mitigation of greenhouse gas emissions in the EU* (JRC Technical Report No. JRC112505). JRC Science Hub. <https://doi.org/10.2760/016263>
- Statista Research Department. (2022a). *Absatz von E-Readern in Deutschland in den Jahren 2008 bis 2015*. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/200364/umfrage/absatz-von-e-readern-in-deutschland-seit-2008/>
- Statista Research Department. (2022b). *In deutschen Haushalten vorhandene elektronische Geräte bzw. Unterhaltungselektronik im Jahr 2016*. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/168757/umfrage/besitz-im-haushalt---elektronische-geraete/>
- Statista Research Department. (2022c). *Leading mapping apps in the United States in 2021, by downloads*. <https://www.statista.com/statistics/865413/most-popular-us-mapping-apps-ranked-by-audience/>
- Statista Research Department. (2022d). *Verkaufte E-Paper Auflagen der Zeitungen in Deutschland vom 2. Quartal 2015 bis zum 4. Quartal 2021*. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/313082/umfrage/e-paper-auflagen-der-zeitungen-nach-gattungen/>
- Statista Research Department. (2022e, Januar 21). *Umsatzanteil von E-Books im Buchhandel in der deutschen Schweiz von 2012 bis 2018*. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/464216/umfrage/umsatzanteil-von-e-books-im-buchhandel-in-der-deutschen-schweiz/>
- Statista Research Department, & Brandt, M. (2021). *Digital überholt 2021 Print*. <https://de.statista.com/infografik/24141/leserinnen-von-zeitungen-und-magazinen-in-deutschland/>
- Stephens, A., Tremlett-Williams, C., Fitzpatrick, L., Acerini, L., Anderson, M., & Crabbendam, N. (2021). *Carbon impact of video streaming*. Carbon Trust. <https://www.carbontrust.com/de/node/1540#:~:text=Key%20findings%20include%3A,of%20the%20overall%20carbon%20footprint.>
- Stierli, P. (2017). *Parzellenspezifische Düngung in Verbindung mit Smart/Precision Farming* (Potenzialabschätzung der Treibhausgasreduktion durch parzellenspezifische Düngung in Verbindung mit Smart/Precision Farming). AgroCleanTech Verein.
- Storme, T., De Vos, J., De Paepe, L., & Witlox, F. (2020). Limitations to the car-substitution effect of MaaS. Findings from a Belgian pilot study. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 131, 196–205. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2019.09.032>
- Swiss Future Farm. (2022). *Swiss Future Farm. Aus gebündeltem Wissen entsteht Innovation*. <https://www.swissfuturefarm.ch/index.php/home>
- Tabata, T., & Wang, T. Y. (2021). Life Cycle Assessment of CO2 Emissions of Online Music and Videos Streaming in Japan. *Applied Sciences*, 11(9), 3992. <https://doi.org/10.3390/app11093992>
- Teter, J., Tattini, J., & Petropoulos, A. (2020). *Tracking Transport 2020*. IEA. <https://www.iea.org/reports/tracking-transport-2020>
- The Shift Project. (2019). *Climate Crisis: The Unsustainable Use of Online Video* ([Report led by Maxime Efooui-Hess for the think tank The Shift Project]). <https://theshiftproject.org/en/article/unsustainable-use-online-video/>
- Thorp-Lancaster, D. (2020, April 29). *Microsoft Teams hits 75 million daily active users, up from 44 million in March*. <https://www.windowscentral.com/microsoft-teams-hits-75-million-daily-active-users>
- Tullo, E., Finzi, A., & Guarino, M. (2019). Review: Environmental impact of livestock farming and Precision Livestock Farming as a mitigation strategy. *Science of The Total Environment*, 650, 2751–2760. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.018>
- Tullo, E., Fontana, I., Diana, A., Norton, T., Berckmans, D., & Guarino, M. (2017). Application note: Labelling, a methodology to develop reliable algorithm in PLF. *Computers and Electronics in Agriculture*, 142, 424–428. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.09.030>
- Vaddadi, B., Pohl, J., Bieser, J., & Kramers, A. (2020). Towards a conceptual framework of direct and indirect environmental effects of co-working. *Proceedings of the 7th International Conference on ICT for Sustainability*, 27–35. <https://doi.org/10.1145/3401335.3401619>
- Varghese, S. (2020, Februar 28). *Emissions possible: Streaming music swells carbon footprints*. <https://www.aljazeera.com/economy/2020/2/28/emissions-possible-streaming-music-swells-carbon-footprints>
- Wang, R. J.-H., Malthouse, E. C., & Krishnamurthi, L. (2015). On the Go: How Mobile Shopping Affects Customer Purchase Behavior. *Journal of Retailing*, 91(2), 217–234. <https://doi.org/10.1016/j.jretai.2015.01.002>
- Wang, S., & Ge, M. (2019). *Everything You Need to Know About the Fastest-Growing Source of Global Emissions: Transport*. World Resources Institute. <https://www.wri.org/insights/everything-you-need-know-about-fastest-growing-source-global-emissions-transport>

- Warkentin, M. E., Sayeed, L., & Hightower, R. (1997). Virtual Teams versus Face-to-Face Teams: An Exploratory Study of a Web-based Conference System. *Decision Sciences*, 28(4), 975–996. <https://doi.org/10.1111/j.1540-5915.1997.tb01338.x>
- Warland, L., & Hilty, L. M. (2016). *Factsheet: Dienstreisen*. Nachhaltigkeitsteam, Universität Zürich.
- Weber, C. L., Koomey, J. G., & Matthews, H. S. (2010). The Energy and Climate Change Implications of Different Music Delivery Methods. *Journal of Industrial Ecology*, 14(5), 754–769. <https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2010.00269.x>
- Wermelinger, R. (2018, Februar 28). *E-Books: Der Höhenflug, der keiner ist* [SRF Kassensturz Espresso]. <https://www.srf.ch/sendungen/kassensturz-espresso/e-books-der-hoehenflug-der-keiner-ist>
- Wissenschaftlicher Dienst des Europäischen Parlaments. (2016). *Präzisionslandwirtschaft und die Zukunft der Landwirtschaft in Europa: Wissenschaftliche Vorausschau*. Europäisches Parlament. [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2016/581892/EPRS_STU\(2016\)581892_DE.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2016/581892/EPRS_STU(2016)581892_DE.pdf)
- World Economic Forum. (2018). *Innovation with a Purpose: The role of technology innovation in accelerating food systems transformation*. https://www3.weforum.org/docs/WEF_Innovation_with_a_Purpose_VF-reduced.pdf
- Xie, J., Xu, Y., & Li, H. (2021). Environmental impact of express food delivery in China: The role of personal consumption choice. *Environment, Development and Sustainability*, 23(6), 8234–8251. <https://doi.org/10.1007/s10668-020-00961-1>
- Yao, E., & Song, Y. (2013). Study on Eco-Route Planning Algorithm and Environmental Impact Assessment. *Journal of Intelligent Transportation Systems*, 17(1), 42–53. <https://doi.org/10.1080/15472450.2013.747822>
- yumuv. (2022). *Mit yumuv abfahren und Wissen schaffen*. Informationen rund um die ETH-Forschung. <https://yumuv.ch/de/forschung>
- Zehner, N., Abt, F., Meier, M., & Helmstetter, N. (2019). *Jahresrückblick 2019*. Swiss Future Farm.
- Zeng, W., Miwa, T., & Morikawa, T. (2016). Prediction of vehicle CO2 emission and its application to eco-routing navigation. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 68, 194–214. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2016.04.007>
- Zijlstra, T., Durand, A., Hoogendoorn-Lanser, S., & Harms, L. (2019). *Promising Groups for Mobility-as-a-Service in the Netherlands*. Kennisinstituut voor Mobiliteitsbeleid (KiM).
- Zumstein, D., & Oswald, C. (2020). *Onlinehändlerbefragung 2020. Nachhaltiges Wachstum des E-Commerce und Herausforderungen in Krisenzeiten*. ZHAW School of Management and Law.