

Auswirkungen der Digitalisierung auf Energieverbrauch und Klima in Österreich

D3.1 – Kurzpapier Szenarien

ENDBERICHT

Verfasser:innen: Martin Baumann
Lukas Egler
Günter Pauritsch
Michael Rohrer

Auftraggeber: Klima- und Energiefonds

Datum: Wien, Februar 2022

powered by 

IMPRESSUM

Herausgeberin: Österreichische Energieagentur – Austrian Energy Agency, Mariahilfer Straße 136, A-1150 Wien,
T. +43 (1) 586 15 24, Fax DW 340, office@energyagency.at | www.energyagency.at

Für den Inhalt verantwortlich: DI Franz Angerer | Gesamtleitung: Dr. Martin Baumann
| Lektorat: Bao-An Phan Quoc | Layout: Michael Rohrer |

Herstellerin: Österreichische Energieagentur – Austrian Energy Agency | Verlagsort und Herstellungsort: Wien
Nachdruck nur auszugsweise und mit genauer Quellenangabe gestattet. Gedruckt auf chlorfrei gebleichtem Papier.

Die Österreichische Energieagentur hat die Inhalte der vorliegenden Publikation mit größter Sorgfalt recherchiert und dokumentiert. Für die Richtigkeit, Vollständigkeit und Aktualität der Inhalte können wir jedoch keine Gewähr übernehmen.

Kurzfassung

Dieses Projekt hat zum Ziel, die möglichen Auswirkungen der fortschreitenden Digitalisierung auf Energieverbrauch und Treibhausgasemissionen in Österreich bis zum Jahr 2040 zu quantifizieren. Dazu werden die Reduktionspotenziale von Energieverbrauch und Treibhausgasemissionen (THG-Emissionen) im Zusammenhang mit verschiedenen Digitalisierungstechnologien und -anwendungen analysiert sowie die damit verbundenen Rebound-Effekte berücksichtigt. Hierfür werden in diesem Bericht sowohl qualitative Szenarien als auch quantifizierte Zwischenergebnisse vorgestellt. Anhand dieser Analysen werden die absolut möglichen Einsparungen bei Energieverbrauch und THG-Emissionen in einem Modell ermittelt. Die Ergebnisse der Modellierung werden in einem späteren Bericht dargestellt. In weiterer Folge werden die Analyseergebnisse für die Ableitung und Priorisierung von Empfehlungen für Forschung, Technologie und Innovation (FTI)-politische Maßnahmen verwendet.

Die angenommene Entwicklung für Österreich geht vom „Shared Socioeconomic Pathway 2“ (SSP2) des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) als Basis für die Szenarien aus. Somit hat Österreich im Jahr 2040 ca. 9,4 Mio. Einwohner und ein Bruttoinlandsprodukt (BIP) von 490 Mrd. EUR. Gleichzeitig wird eine (noch nicht näher modellierte) Reduktion des Energieverbrauchs und der THG-Emissionen erwartet. Im Bereich der Informations- und Kommunikations-Infrastruktur (IKT-Infrastruktur) wird von einer rund 100-fachen Erhöhung der Rechenleistung und der zu übertragenden Datenmenge ausgegangen.

Die Digitalisierung beeinflusst den Energieverbrauch sowohl direkt auf der Ebene der Endgeräte als auch indirekt über den Betrieb der notwendigen Infrastruktur. Zusätzlich gibt es Rebound-Effekte, die berücksichtigt werden sollten. Die verstärkte Nutzung von Homeoffice beeinflusst zum Beispiel den Energieverbrauch im Haushalt und im Büro und führt auch zu einer Reduktion des Berufsverkehrs. Mögliche Rebounds wären zusätzliche Fahrten für Einkäufe oder eine Veränderung der durchschnittlichen Wohnfläche pro Person in privaten Haushalten.

In einem ersten Schritt werden Digitalisierungsanwendungen identifiziert und Szenarien für niedrige, mittlere und hohe Marktdurchdringung gebildet – Min-, Mid-, Max-Szenarien. In den Abschätzungen der Marktdurchdringungen im Jahr 2040 werden Annahmen bezüglich Barrieren für den Markteintritt berücksichtigt. Bei diesen Abschätzungen wird, soweit möglich, auf einschlägige Literatur zurückgegriffen. Bei Anwendungsfällen, für die keine entsprechende Literatur verfügbar ist, wird dies durch Schätzungen von Experten bzw. Expertinnen sowie Fermi-Ableitungen ergänzt. Die meisten Abschätzungen werden mit Stakeholdern oder Experten und Expertinnen validiert.

Die Analyse in diesem Bericht beinhaltet Abschätzungen für die möglichen Reduktionen des Energieverbrauchs und der THG-Emissionen sowie mögliche Marktdurchdringungen für die folgenden Digitalisierungsanwendungen:

Industrie	Verkehr	Haushalte	Dienstleistungen	Landwirtschaft
<ul style="list-style-type: none">• Prozessautomatisierung• Simulation und Digitaler Zwilling• Additive Fertigung• Gebäudeautomatisierung	<ul style="list-style-type: none">• Autonomes Fahren• Mobility-as-a-Service• Ride-Sharing• Smart Logistics• Automatisierter Schienengüterverkehr	<ul style="list-style-type: none">• Smart Home• IKT-Nutzung	<ul style="list-style-type: none">• Gebäudeautomatisierung• Homeoffice / Telework• Tele-Conferencing• E-Commerce• E-Health, E-Learning, E-Banking und E-Governance• IKT am Arbeitsplatz• Rechenzentren• Telekom-Infrastruktur	<ul style="list-style-type: none">• Precision Plant Farming• Precision Livestock Farming• Zuchtoptimierung• Vertical Farming• Lab-grown Meat

Abbildung 1: Betrachtete Digitalisierungsanwendungen; Quelle: AEA

In den folgenden Tabellen sind wesentliche Annahmen und Resultate der Szenarien nach Sektor gegliedert zusammengefasst. Für die einzelnen Digitalisierungsanwendungen wurden unterschiedliche Wirkungshebel identifiziert, die sich auf relevante Energieverbräuche bzw. Energieverbrauchstreiber beziehen. Im rechten Bereich der Tabellen ist die abgeschätzte Ausprägung der Brutto-Effekte, für den relevanten Energieverbrauch (EV) oder die relevanten THG-Emissionen, in den unterschiedlichen Szenarien sowie eine quantitative Abschätzung für mögliche Rebound-Effekte angegeben. Diese Ergebnisse werden im weiteren Verlauf des Projektes für die quantitative Abschätzung der Digitalisierungseffekte als Eingangsparameter herangezogen. Die Abschätzung der einzelnen Parameter wurde so angelegt, dass eine additive Betrachtung der einzelnen Anwendungen möglich ist.

Tabelle 1: Übersicht der Brutto-Effekte 2040 für die Digitalisierungsanwendungen im Industriesektor; Quelle: AEA

Anwendung	Referenz	Brutto-Effekt 2040			Direkte Rebounds
		MIN	MID	MAX	
Prozessautomatisierung	EV Standmotoren & Prozessenergie	-3,8 %	-5,3 %	-6,8 %	20 %
Simulation & Digitaler Zwilling	EV Standmotoren & Prozessenergie	-2,5 %	-4,0 %	-5,5 %	20 %
Additive Fertigung	EV Flugverkehr	-1,5 %	-2,5 %	-3,5 %	0 %
	EV Lkw	-0,5 %	-1,0 %	-1,5 %	0 %
	EV Standmotoren	-0,1 %	-0,2 %	-0,3 %	0 %
Gebäudeautomatisierung	EV Raumwärme & Warmwasser	-6,0 %	-8,0 %	-11,0 %	10 %
	EV Kleingeräte, Beleuchtung & EDV	-3,0 %	-4,0 %	-5,5 %	10 %

Tabelle 2: Übersicht der Brutto-Effekte 2040 für die Digitalisierungsanwendungen im Verkehrssektor; Quelle: AEA

Anwendung	Referenz	Brutto-Effekt 2040			Direkte Rebounds
		MIN	MID	MAX	
Autonomes Fahren	EV Pkw	0,0 %	-0,8 %	-1,6 %	+2 % km
	EV Lkw	0,0 %	-6,0 %	-11,9 %	+2 % km
	EV Busse	0,0 %	-3,2 %	-6,3 %	0 %
Mobility-as-a-Service	Motorisierter Individualverkehr [Personenkilometer - Mrd. Pkm]	-1,0	-2,0	-4,0	0 %
	Öffentlicher Personennahverkehr [Personenkilometer - Mrd. Pkm]	+1,0	+2,0	+4,0	0 %
Ride-Sharing	EV Pkw	-0,2 %	-0,7 %	-1,7 %	0 %
Smart Logistics	EV Lkw	-3,2 %	-7,2 %	-11,2 %	0 %
Automatisierter Schienengüterverkehr	EV Bahn (Verlagerungseffekt)	0,0 %	+1,4 %	+2,7 %	0 %
	EV Lkw (Verlagerungseffekt)	- Aliquot dem Effekt bei EV Bahn			0 %
	EV Bahn (Energieeffizienz-Effekt)	-4,0 %	-8,0 %	-12,0 %	0 %

Tabelle 3: Übersicht der Brutto-Effekte 2040 für die Digitalisierungsanwendungen im Haushaltssektor; Quelle: AEA



 Anwendung	 Referenz	Brutto-Effekt 2040			Direkte Rebounds
		MIN	MID	MAX	
Smart Home	EV Raumwärme & Warmwasser	-5,0 %	-7,0 %	-9,0 %	30 %
	EV Kleingeräte, Beleuchtung & EDV	-1,3 %	-1,8 %	-2,3 %	30 %
IKT-Nutzung	EV Beleuchtung & EDV	0,0 %	-14,0 %	-28,0 %	Inkl.

Tabelle 4: Übersicht der Brutto-Effekte 2040 für die Digitalisierungsanwendungen im Dienstleistungssektor; Quelle: AEA





 Anwendung	 Referenz	Brutto-Effekt 2040			Direkte Rebounds
		MIN	MID	MAX	
Gebäudeautomatisierung	EV Raumwärme & Warmwasser	-9,0 %	-12,0 %	-16,5 %	10 %
	EV Kleingeräte, Beleuchtung & EDV	-3,0 %	-4,0 %	-5,5 %	10 %
Homeoffice	Pkw km	-1,0 %	-2,1 %	-3,2 %	0 %
	DL-EV Raumwärme (Bürofläche)	-1,0 %	-2,5 %	-4,0 %	0 %
	EV Beleuchtung & EDV	+6,0 %	+13,0 %	+20,0 %	0 %
Tele-Conferencing	EV Pkw	-0,3 %	-0,7 %	-1,0 %	Inkl.
	EV Inlandsflüge	-2,4 %	-5,2 %	-8,0 %	0 %
	EV Auslandsflüge	-0,6 %	-1,3 %	-2,0 %	0 %
E-Commerce	Pkw [Fahrzeugkilometer – Mrd. Fzgkm]	-0,53	-1,05	-1,58	Inkl.
	Leichte Nutzfahrzeuge [Fahrzeugkilometer – Mio. Fzgkm]	+88	+175	+263	Inkl.
E-Learning, E-Banking, E-Health, E-Governance	Pkw [Fahrzeugkilometer - %]	-0,5 %	-1,4 %	-2,4 %	0 %
IKT am Arbeitsplatz	EV Beleuchtung & EDV	0,0 %	-3,5 %	-7,0 %	Inkl.
Rechenzentren	EV Beleuchtung & EDV [TWh]	+0,05	+0,5	+1,0	Inkl.
	EV Raumwärme [TWh]	-0,1	+0,07	+0,25	Inkl.
Telekommunikations-Infrastruktur	EV Beleuchtung & EDV [TWh]	+0,12	+0,65	+1,08	Inkl.

Tabelle 5: Übersicht der Brutto-Effekte 2040 für die Digitalisierungsanwendungen im Landwirtschaftssektor; Quelle: AEA

 Anwendung	 Referenz	Brutto-Effekt 2040			Direkte Rebounds
		MIN	MID	MAX	
Precision Plant Farming	THG-Dünger	-3,0 %	-6,0 %	-9,0 %	80 %
	EV – Verkehr in der Landwirtschaft	-1,5 %	-3,5 %	-5,5 %	0 %
Precision Livestock Farming	THG-Viehhaltung	-0,5 %	-4,0 %	-12 %	2 %
Zuchtoptimierung	THG-Viehhaltung	+6,0 %	0,0 %	-3,0 %	0 %
Vertical Farming	EV / THG	Negativer Gesamteffekt – nicht genau bewertet			
Lab-grown Meat	THG-Rinderhaltung – Fleisch	0,0 %	-1,4 %	-4,0 %	0 %

Abstract

The aim of this project is to quantify possible effects of advancing digitalization on energy consumption and greenhouse gas emissions in Austria by the year 2040. For this purpose, the potential for reducing energy consumption and greenhouse gas emissions (GHG emissions) in connection with various digitalization technologies and applications are analyzed and associated rebound effects are taken into account. In this report, both qualitative scenarios and quantified interim results are presented. These interim results form the basis for the later quantification of the absolute savings, using a simplified energy- and GHG model for Austria. The final results of this quantification will then be used to narrow down and prioritize research, technology and innovation (RTI) policy recommendations.

The assumed development for Austria and the resulting scenarios are based on the "Shared Socioeconomic Pathway 2" (SSP2) of the IPCC. In 2040, Austria will have around 9.4 million inhabitants, a gross domestic product (GDP) of EUR 490 billion, a reduction (not yet modeled) in energy consumption and GHG emissions, an increase in electricity consumption in the information and communication (ICT) infrastructure as well as a 100-fold surge in data and computing power.

Digitalization influences energy consumption both directly (via the energy consumption of appliances) as well as indirectly through the operation of the necessary infrastructure. In addition, there are rebounds that need to be considered. The increased use of home office, for example, has a direct impact on energy consumption at home (increase of electricity consumption) and in the office (reduction of electricity consumption), as well as in the transport sector by reducing commuter traffic. Possible rebounds would be additional trips for shopping or a change in the average living area per person in private households.

In a first step, digitalization applications are identified and scenarios for low, medium and high levels of digitalization effects are created – min-, mid-, max-scenarios. For these scenarios, barriers to market entry are considered in the market penetration estimations for 2040. As far as possible, relevant literature is taken into account for these estimates. For applications for which no corresponding literature is available, this is supplemented by expert estimates and Fermi derivations. The interim results in these scenarios have been validated in a stakeholder process. The analysis in this report includes estimates for possible reductions in energy consumption and GHG emissions as well as possible market penetrations for the following digitalization applications:

Industry	Traffic	Households	Services	Agriculture
<ul style="list-style-type: none">• Process Automation• Simulation and Digital Twin• Additive Manufacturing• Building Automation	<ul style="list-style-type: none">• Autonomous Driving• Mobility-as-a-Service• Ride Sharing• Smart Logistics• Automated Rail Freight Transport	<ul style="list-style-type: none">• Smart Home• ICT usage	<ul style="list-style-type: none">• Building Automation• Home Office, Telework• Tele-Conferencing• E-Commerce• E-Health, E-Learning, E-Banking und E-Governance• ICT in the workplace• Data Centers• Telecom Infrastructure	<ul style="list-style-type: none">• Precision Plant Farming• Precision Livestock Farming• Breeding Optimization• Vertical Farming• Lab-grown Meat

Abbildung 2 (Figure 2): Analyzed digitalization applications; source: AEA

The following tables summarize the results of the scenario building process. Digitalization applications might have more than one effect on the respective system. For each individual effect the reduction potential (differentiated by scenario) for the respective final energy (FE) consumption and the greenhouse gases (GHG) as well as estimation of the rebound effect are given. During the following steps of the project, these intermediate results will serve as input for the quantification of the effects in absolute terms.

Tabelle 6 (Table 6): Overview of gross effects 2040 of digitalization applications in the industrial sector; source: AEA

Application	Reference – Energy / GHG	Gross effect 2040			Direct rebounds
		MIN	MID	MAX	
Process Automation	FE motors & process energy	-3.8%	-5.3%	-6.8%	20%
Simulation & Digital Twin	FE motors & process energy	-2.5%	-4.0%	-5.5%	20%
Additive Manufacturing	FE flights	-1.5%	-2.5%	-3.5%	0%
	FE heavy duty trucks	-0.5%	-1.0%	-1.5%	0%
	FE motors	-0.1%	-0.2%	-0.3%	0%
Building Automation	FE heating, cooling and warm water	-6.0%	-8.0%	-11.0%	10%
	FE appliances, lighting and IT	-3.0%	-4.0%	-5.5%	10%

Tabelle 7 (Table 7): Overview of gross effects 2040 of digitalization applications in the transport sector; source: AEA

Application	Reference – Energy / GHG	Gross effect 2040			Direct rebounds
		MIN	MID	MAX	
Autonomous Driving	FE cars	0.0%	-0.8%	-1.6%	+2 % km
	FE heavy duty trucks	0.0%	-6.0%	-11.9%	+2 % km
	FE busses	0.0%	-3.2%	-6.3%	0%
Mobility as a Service	Motorized individual transport [person kilometers - bn pkm]	-1.0	-2.0	-4.0	0%
	Public transport [person kilometers - bn pkm]	+1.0	+2.0	+4.0	0%
Ride Sharing	FE cars	-0.2%	-0.7%	-1.7%	0%
Smart Logistics	FE heavy duty trucks	-3.2%	-7.2%	-11.2%	0%
Automated Rail Freight Transport	FE trains (substitution)	0.0%	+1.4%	+2.7%	0%
	FE heavy duty trucks (substitution)	- Aliquot FE trains			0%
	FE trains (energy efficiency)	-4.0%	-8.0%	-12.0%	0%

Tabelle 8 (Table 8): Overview of gross effects 2040 of digitalization applications in the household sector; source: AEA

Application	Reference – Energy / GHG	Gross effect 2040			Direct rebounds
		MIN	MID	MAX	
Smart Home	FE heating, cooling and warm water	-5.0%	-7.0%	-9.0%	30%
	FE appliances, lighting and IT	-1.3%	-1.8%	-2.3%	30%
ICT usage	FE lighting and IT	-0.0%	-14.0%	-28.0%	Incl.

Table 9 (Table 9): Overview of gross effects 2040 of digitalization applications in the service sector; source: AEA

Application	Reference – Energy / GHG	Gross effect 2040			Direct rebounds
		MIN	MID	MAX	
Building Automation	FE heating, cooling and warmwater	-9.0%	-12.0%	-16.5%	10%
	FE appliances, lighting and IT	-3.0%	-4.0%	-5.5%	10%
Home Office	Cars km	-1.0%	-2.1%	-3.2%	0%
	FE heating & cooling	-1.0%	-2.5%	-4.0%	0%
	FE lighting and IT	+6.0%	+13.0%	+20.0%	0%
Tele-Conferencing	FE cars	-0.3%	-0.7%	-1.0%	Incl.
	FE domestic flights	-2.4%	-5.2%	-8.0%	0%
	FE international flights	-0.6%	-1.3%	-2.0%	0%
E-Commerce	Cars [vehicle kilometer – bn vkm]	-0.53	-1.05	-1.58	Incl.
	Light duty vehicles [vehicle kilometer – mio. vkm]	+88	+175	+263	Incl.
E-Learning, E-Banking, E-Health, E-Governance	Cars [vehicle kilometer - %]	-0.5%	-1.4%	-2.4%	0%
ICT in the workplace	FE lighting and IT	0.0%	-3.5%	-7.0%	Incl.
Data Centers	FE lighting and IT [TWh]	+0.05	+0.5	+1.0	Incl.
	FE heating & cooling [TWh]	-0.1	+0.07	+0.25	Incl.
Telecommunication Infrastructure	FE lighting and IT [TWh]	+0.12	+0.65	+1.08	Incl.

Table 10 (Table 10): Overview of gross effect 2040 of digitalization applications in the agricultural sector; source: AEA

Application	Reference – Energy / GHG	Gross effect 2040			Direct rebounds
		MIN	MID	MAX	
Precision Plant Farming	GHG - fertilizer	-3.0%	-6.0%	-9.0%	80%
	FE – transport in agriculture	-1.5%	-3.5%	-5.5%	0%
Precision Livestock Farming	GHG-animal husbandry	-0.5%	-4.0%	-12%	2%
Breeding Optimization	GHG-animal husbandry	+6.0%	0.0%	-3.0%	0%
Vertical Farming	FE / GHG	Negative overall effect – not evaluated in detail			
Lab-grown Meat	GHG-cattle husbandry - beef	0.0%	-1.4%	-4.0%	0%

Inhaltsverzeichnis

1	EINLEITUNG	13
2	ALLGEMEINE ENTWICKLUNG	16
2.1	Hintergrundentwicklung auf globaler Ebene – SSP2	16
2.2	Hintergrundentwicklung in Österreich	16
2.3	Energieverbrauch und Treibhausgasemissionen in Österreich 2019	18
3	QUANTIFIZIERUNG	20
3.1	Industrie	20
3.1.1	Überblick	20
3.1.2	Prozessautomatisierung	24
3.1.3	Simulation und digitaler Zwilling	28
3.1.4	Additive Fertigung	30
3.1.5	Gebäudeautomatisierung	32
3.2	Verkehr	33
3.2.1	Überblick	33
3.2.2	Autonomes Fahren	35
3.2.3	Mobility-as-a-Service (MaaS), Shared Mobility und Ride-Sharing	38
3.2.4	Smart Logistics	40
3.2.6	Automatisierter Schienengüterverkehr	42
3.3	Haushalte	44
3.3.1	Überblick	44
3.3.2	Smart Home	45
3.3.3	IKT-Nutzung	47
3.4	Dienstleistung	50
3.4.1	Überblick	50
3.4.2	Gebäudeautomatisierung	51
3.4.3	Homeoffice, Telework und Tele-Conferencing	53
3.4.4	E-Commerce	55
3.4.5	E-Health, E-Learning, E-Banking, E-Governance	57
3.4.6	IKT am Arbeitsplatz	59
3.4.7	Rechenzentren	62
3.4.8	Telekommunikations-Infrastruktur	66
3.5	Landwirtschaft	70
3.5.1	Überblick	70
3.5.2	Precision Plant Farming/Smart Farming	72
3.5.3	Precision Livestock Farming und Zuchtoptimierung	76
3.5.4	Vertical Farming und Controlled Environment Agriculture	78
3.5.6	Lab-grown Meat / In-vitro-Fleisch	81

4	ZUSAMMENFASSUNG	84
5	ANHANG METHODIK	88
5.1	Szenarien	89
5.1.1	Allgemeiner Ansatz	89
5.1.2	Digitalisierungsszenarien	89
5.1.3	Struktur der Berechnungen	90
5.2	Fermi-Abschätzungen	90
5.2.1	Nachfragetreiber und spezifische Energiedienstleistungsnachfrage	92
5.2.2	Spezifischer Energieverbrauch	93
5.2.3	Nicht-energetische Emissionen	94
5.3	Rebound-Effekte	94
5.4	Literaturrecherche	94
5.5	Stakeholdereinbindung	95
6	LITERATURVERZEICHNIS	97
7	ABKÜRZUNGEN	107
8	ABBILDUNGSVERZEICHNIS	111
9	TABELLENVERZEICHNIS	113

1 Einleitung

Digitalisierung allgemein

Die Anwendung von Digitalisierungstechnologien und von Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT) haben wesentlichen Einfluss auf die wirtschaftliche und soziale Entwicklung der Gesellschaft. Nachhaltig ausgerichtet können diese zur Chance für die Energiewende und den Klimaschutz werden. Laut der Internationalen Energieagentur (IEA 2017) wird der Trend zur stärkeren Digitalisierung durch Fortschritte in der Datenerfassung, der Datenanalyse und dem Datenaustausch ermöglicht. Durch sinkende Kosten für Sensoren, Prozessoren und Datenspeicher erhöhen sich die Datenmengen. Schnellere und kostengünstigere Datenübertragung unterstützt Fortschritte bei erweiterten Analyse- und Rechenfunktionen und mehr Konnektivität.

Zusätzlich kann Digitalisierung die Energie- und Mobilitätswende durch die Vernetzung der verschiedenen Bestandteile des Energiesystems unterstützen. Erneuerbare Energiequellen, Gebäude und Fahrzeuge werden intelligent miteinander verbunden, Produktions- und Lieferketten werden optimiert und dadurch effizienter. Gleichzeitig wächst jedoch der Energiebedarf, trotz verbesserter Energieeffizienz, der für den Einsatz von IKT-Geräten (Server, Netzwerke, Terminals) benötigt wird. Die vollständigen direkten und indirekten Auswirkungen auf Energieverbrauch und Treibhausgasemissionen dieser Entwicklungen sind nicht zuletzt aufgrund der zunehmenden Vernetzung der verschiedenen Verbrauchssektoren schwierig einzuschätzen.

Über das Projekt

In der 3. Ausschreibung des Programms „Energy Transition 2050“ wurde vom Klima- und Energiefonds der österreichischen Bundesregierung (KLIEN) eine F&E-Dienstleistung zum Thema „Die Auswirkungen der Digitalisierung auf Energieverbrauch und Klima in Österreich“ finanziert, siehe Forschungsförderungsgesellschaft (FFG 2020). Den Zuschlag für diese Ausschreibung hat ein gemeinsamer Projektantrag der Österreichischen Energieagentur – Austrian Energy Agency (AEA) und des Fachverbandes der Elektro- und Elektronikindustrie bekommen. Dieses Projekt wurde am 15. Februar 2021 gestartet. Die Laufzeit des Projekts beträgt zwölf Monate.

Dieses Projekt hat zum Ziel, die möglichen Auswirkungen der fortschreitenden Digitalisierung auf Endenergieverbrauch¹ und Treibhausgasemissionen in Österreich bis zum Jahr 2040 zu quantifizieren. Dazu werden die Reduktionspotenziale von Energieverbrauch und Treibhausgasemissionen im Zusammenhang mit verschiedenen Digitalisierungstechnologien und -anwendungen sowie die damit verbundenen Rebound-Effekte analysiert. Diese Analyse beruht auf qualitativen und quantifizierten Szenarien, welche die ganzheitlichen und sektorübergreifenden Auswirkungen von verschiedenen Digitalisierungsansätzen beschreiben.

Ein weiteres Projektziel ist die Erarbeitung von Empfehlungen zu FTI-politischen Maßnahmen, die die mit der Digitalisierung verbundenen Technologien und Anwendungen „Made in Austria“ unterstützen sollen. Sowohl die Erarbeitung der Szenarien als auch die Entwicklung von Empfehlungen für FTI-politische Maßnahmen finden in engem Austausch mit Stakeholdern aus den Bereichen der Forschung, Technologie, Industrie und der IKT-Anwendung im gewerblichen und privaten Bereich statt.

¹ Der Endenergieverbrauch ist der Energieverbrauch der Endnutzer in den Sektoren Haushalte, Industrie, Verkehr, Dienstleistungen und Landwirtschaft. Er beinhaltet unter anderem elektrische Energie und Fernwärme. Zu beachten ist, dass zum Beispiel Wärme und Strom, die in Gasheizkraftwerken für die Fernwärmeversorgung und den Strommarkt erzeugt werden, im energetischen Endverbrauch als Fernwärme oder elektrische Energie (ohne die Transport- und Umwandlungsverluste) enthalten sind.

Dieser Bericht

In diesem Bericht werden die Ergebnisse und Methodik von Arbeitspaket 3 (vor allem Task 3) sowie Teile aus Arbeitspaket 4 wegen ihrer engen Verknüpfung zusammengefasst. Somit werden in diesem Bericht die möglichen Auswirkungen der Digitalisierung auf Energieverbrauch und THG-Emissionen im Jahr 2040 für Österreich untersucht. Hierfür werden sowohl qualitative Szenarien mit der Liste der als relevant identifizierten Digitalisierungsanwendungen als auch quantifizierte Einsparpotenziale vorgestellt. Diese Analysen werden im weiteren Deliverable zu Arbeitspaket 4 mittels Modellierung quantifiziert, um in weiterer Folge in Arbeitspaket 5 Empfehlungen für FTI-politische Maßnahmen ableiten zu können.

Untersucht werden hierfür sowohl Informations- und Kommunikationstechnologien als auch Digitalisierungsanwendungen. Forschung und Produktentwicklung, die durch digitale Anwendungen unterstützt werden, sind nicht Teil dieser Analyse. Weiters fokussiert sich diese Studie auf die Energieverbrauchssektoren. Einflüsse von Digitalisierungsanwendungen auf den Energiesektor werden in dieser Studie nicht untersucht.

Was bedeutet IKT?

IKT ist definiert als digitale oder analoge Anwendung von Informations- und Kommunikationstechnologien und umfasst sowohl traditionelle Systeme wie Radio, Telefon und Fernsehen als auch moderne Systeme wie Computer, Internet, Mobilfunk, Satellitensysteme und Smartphones sowie die zugrundeliegende Infrastruktur wie zum Beispiel Sender, Telekommasten und Rechenzentren. Diese Systeme sind für sämtliche Digitalisierungstechnologien und -anwendungen erforderlich.

Was bedeutet Digitalisierung?

Der Begriff Digitalisierung ist nicht eindeutig definiert. Ursprünglich bedeutete Digitalisierung die Umwandlung von analogen in digitale Informationen (Luber 2019). Digitale Formate von Informationen werden grundsätzlich in fast allen oben beschriebenen Informations- und Kommunikationstechnologien verwendet. Zusätzlich entstehen durch eine Kombination von Sensoren, Prozessoren, Übertragungstechnologien und diverser Software unterschiedliche Anwendungen (Digitalisierungsanwendungen).

Die IEA (2017) definiert in diesem Sinne Digitalisierung als die zunehmende Interaktion und Konvergenz zwischen digitaler und physischer Welt. Die IEA beschreibt weiters, dass die digitale Welt drei grundlegende Elemente hat:

- Daten: digitale Informationen
- Analytics: die Verwendung von Daten, um nützliche Informationen und Erkenntnisse zu gewinnen
- Konnektivität: Datenaustausch zwischen Menschen, Geräten und Maschinen über digitale Kommunikationsnetze

Welche Digitalisierungseffekte wurden nicht betrachtet?

Anzumerken ist, dass sich diese Studie auf die Endverbrauchssektoren fokussiert. Potenzielle THG-Einsparpotenziale durch Digitalisierungsanwendungen im Energiesektor (Energieaufbringung, Energieverteilung, Energiespeicherung und Bedarfsanpassung) wurden im Rahmen der vorliegenden Studie nicht näher behandelt.²

Diese Studie berücksichtigt darüber hinaus nur Effekte, welche direkt durch die Nutzung der Endgeräte, indirekt durch den Betrieb der Infrastruktur sowie durch direkte Rebounds entstehen.

² Es wird empfohlen, die einzelnen Anwendungen, deren Potenziale und Marktdurchdringung bis 2040 in einem Forschungsprojekt für den Energiesektor separat zu untersuchen.

Die vielleicht größten Effekte, welche erst durch Digitalisierung ermöglicht werden, sind in der Forschung und Entwicklung neuer Produkte zu finden. Dies betrifft unter anderem die Forschung und Entwicklung neuer Medikamente, z. B. der Covid-Impfstoffe, oder neuer Produkte wie Computerchips, welche höhere Rechenleistung bei geringeren Kosten ermöglichen. Ersteres erhöht die durchschnittliche Lebenserwartung und die Gesundheit, Letzteres schafft zusätzliche Möglichkeiten für die Digitalisierung. Beides bewirkt durch sekundäre und tertiäre Effekte einen erhöhten Energieverbrauch. Diese durch Digitalisierung unterstützte Forschung und Entwicklung neuer Produkte wird in der vorliegenden Analyse nicht betrachtet.

Weitere Effekte, welche in der vorliegenden Studie aufgrund mangelnder Daten nicht untersucht werden, betreffen die Auswirkungen der Digitalisierung auf die Lebensdauer von Produkten. Geräte und Equipment mit programmierbaren Komponenten haben tendenziell eine geringere Lebensdauer als ältere Geräte und Equipment ohne programmierbare Komponenten, weil neue Geräte und modernes Equipment schneller aus der Mode kommen und schneller obsolet werden. Diese Obsoleszenz ergibt sich aus mangelnden Austauschmöglichkeiten von Komponenten und aus der zeitlich limitierten Verfügbarkeit von Ersatzteilen, Softwareupdates und -betreuung. Durch die kürzeren Lebensdauern von Geräten und Equipment müssen diese öfter ausgetauscht werden. Dieser Effekt beschränkt sich nicht mehr nur auf Mobiltelefone oder Laptops. Aus Diskussionen mit Experten und Expertinnen aus verschiedenen Branchen hat sich gezeigt, dass dies auch für größere industriell oder landwirtschaftlich genutzte Gerätschaften gilt. Die aufgrund der kürzeren Lebensdauer notwendige zusätzliche Produktion verursacht einen vermehrten Energieverbrauch und höhere THG-Emissionen. Nachdem für diese Effekte keine öffentlich verfügbaren Studien vorliegen und eine solche Analyse den Rahmen der vorliegenden Untersuchung übersteigt, wurden sie nicht weiter betrachtet.

Aufbau dieses Berichts

Im nächsten Kapitel, Kapitel 2, wird die angenommene internationale und österreichische Entwicklung bis 2040 beschrieben. Zusätzlich werden der Energieverbrauch und die THG-Emissionen in Österreich aus dem Jahr 2019 für eine erste qualitative Einordnung der Analyseergebnisse dargestellt.

Im Hauptteil, Kapitel 3, werden die Analyseergebnisse für die Digitalisierungsanwendungen separat diskutiert. Dies beinhaltet die Ergebnisse der Literaturrecherche und die Annahmen von Experten und Expertinnen. Die Analysen betrachten die möglichen Energieverbrauchs- und THG-Emissionseinsparungen sowie die mögliche Marktdurchdringung im Jahr 2040. Für die Brutto-Effekte im Jahr 2040 wird, wo sinnvoll und möglich, die Marktdurchdringung 2019/2020 abgezogen. Darüber hinaus werden mögliche Rebound-Effekte dargestellt.

Abschließend fasst Kapitel 4 die Brutto-Effekte zusammen. Im Anhang, Kapitel 5, wird die Methodik im Detail behandelt.

2 Allgemeine Entwicklung

2.1 Hintergrundentwicklung auf globaler Ebene – SSP2

Alle betrachteten Szenarien verwenden den „Shared Socioeconomic Pathway 2“ (SSP2) des IPCC als Basis. In SSP2 wird angenommen, dass die Welt einem Weg folgt, auf dem sich soziale, wirtschaftliche und technologische Trends nicht merklich von historischen Mustern entfernen. Entwicklung und Einkommenswachstum verlaufen global ungleichmäßig, wobei einige Länder relativ gute Fortschritte machen, während andere hinter den Erwartungen zurückbleiben. Die meisten Volkswirtschaften sind politisch stabil. Global vernetzte Märkte funktionieren unvollkommen. Die technologische Entwicklung schreitet schnell voran, aber ohne grundlegende Durchbrüche. Umweltsysteme unterliegen einer Verschlechterung, obwohl es einige Verbesserungen gibt und insgesamt die Intensität des Ressourcen- und Energieverbrauchs abnimmt. Das weltweite Bevölkerungswachstum ist moderat. Diese moderaten Entwicklungstrends stellen die Welt im Durchschnitt vor moderate Herausforderungen bei der Eindämmung der Erderhitzung und Anpassung an den Klimawandel (O’Neill 2015). Abbildung 3 gibt eine grobe Übersicht über die verschiedenen SSPs und zeigt indikativ die mögliche Einordnung von SSP2.

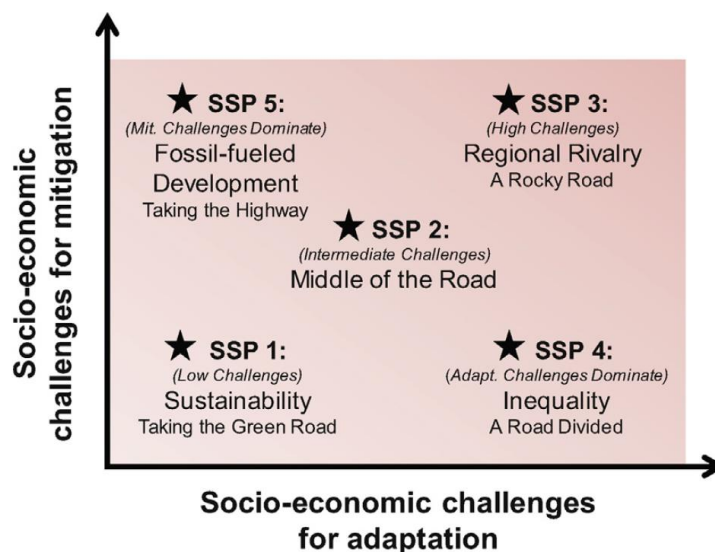


Abbildung 3: Übersicht über die Shared Socioeconomic Pathways; Quelle: (Wikipedia 2021)

2.2 Hintergrundentwicklung in Österreich

Für Österreich kann in einem SSP2-Szenario von moderaten Bevölkerungs- und Wirtschaftsentwicklungen ausgegangen werden (siehe Abbildung 4). Somit kann angenommen werden, dass die Bevölkerung in Österreich bis zum Jahr 2040 auf 9,4 Mio. Menschen wächst (Statistik Austria 2020). Das Bruttoinlandsprodukt (BIP) real (2015),

als Kennzahl für die Wirtschaftsentwicklung, kann bis zum Jahr 2040 auf ca. 490 Mrd. EUR hochgerechnet³ werden.

Die Treibhausgasemissionen (THG-Emissionen) in Österreich sind ab dem Jahr 2000 bis zum Jahr 2019 relativ stabil geblieben. Mit dem Ziel der Klimaneutralität bis 2040 müssen diese THG-Emissionen allerdings in allen Sektoren – Energie, Industrie, Verkehr, Haushalte, Dienstleistungen und Landwirtschaft – auf nahezu null gesenkt werden. Verbleibende THG-Emissionen müssen durch CO₂-Senken kompensiert werden.

Sowohl der gesamte Energieverbrauch (BEEV)⁴ als auch der energetische Endverbrauch von Strom haben sich von 2000 bis 2019 um 20 % bzw. 25 % erhöht. Für die Zukunft ist geplant, den Energieverbrauch durch Energieeffizienzmaßnahmen deutlich zu reduzieren. Viele dieser Energieeffizienzmaßnahmen sind allerdings Elektrifizierungsmaßnahmen. Die künftige Elektrifizierung (Wärmepumpen, Elektrofahrzeuge etc.) wird in Verbindung mit dem zu erwartenden Bevölkerungs- und Wirtschaftswachstum zu einer erhöhten Stromnachfrage führen. All dies sind relevante Hintergrundentwicklungen, um die Effekte der Digitalisierung auf Energieverbrauch und THG-Emissionen beurteilen zu können.⁵

Ein Indikator für die stark wachsende Bedeutung der Digitalisierung, u. a. auf Energieverbrauch und THG-Emissionen, ist der globale Internetverkehr. Dieser hat sich von ca. 1 EB (Exabyte = 1 Million Terabyte) im Jahr 2000 auf ca. 2000 EB im Jahr 2019 (in fast 20 Jahren) mehr als vertausendfacht (Bermark P. 2021). Laut (Masanet E. 2020) kann eine Verdopplung an Daten und Rechenleistung in den nächsten drei bis vier Jahren erwartet werden. Falls sich dieser Trend fortsetzt, muss mit 200.000 EB im Jahr 2040 gerechnet werden, d. h. einer weiteren Erhöhung um den Faktor 100.

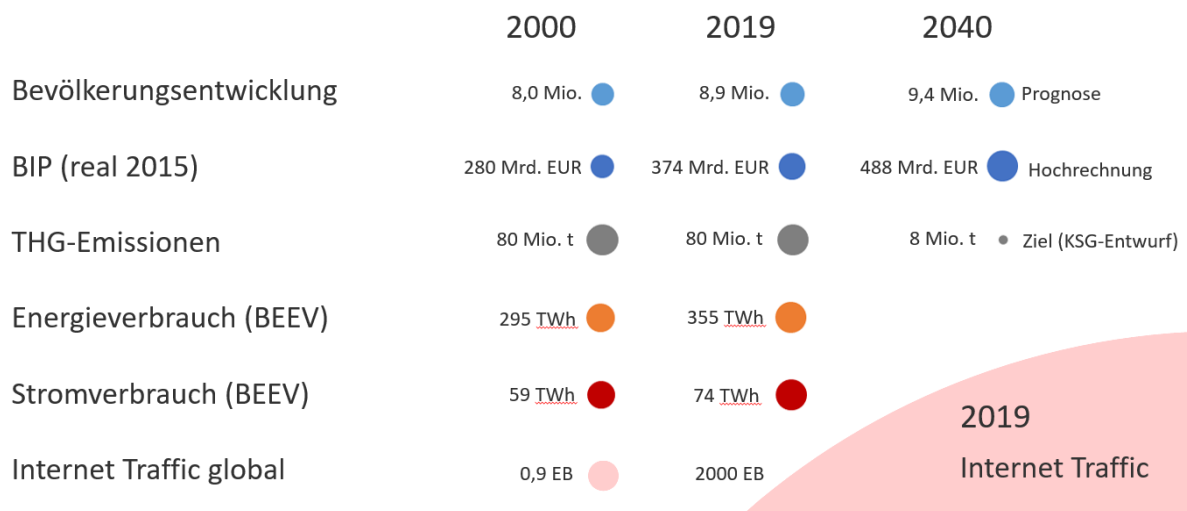


Abbildung 4: Überblick über historische Entwicklungen für die Jahre 2000 und 2019, ausgewählte Prognosen und Ziele (laut Klimaschutzgesetz-Entwurf) für das Jahr 2040; Quelle: (Statistik Austria 2020), (WIFO 2021a), (WIFO 2021b), (BMNT 2019b), (UBA 2021), (Statistik Austria 2020a), (Bermark P. 2021) und Berechnungen und Darstellung AEA

³ Hierfür werden die Konjunkturprognosen 2021 und 2022 (WIFO 2021a) für kurzfristige Prognosen herangezogen sowie 1,5 % für mittelfristige Prognosen bis zum Jahr 2025 (WIFO 2021b) und für langfristige Prognosen bis zum Jahr 2040 (BMNT 2019b).

⁴ Der Bruttoenergieverbrauch (BEEV) setzt sich zusammen aus Endenergieverbrauch (EEV) inklusive dem Verbrauch des Sektors Energie und Transportverluste exklusiver der Umwandlungsverluste der Energieerzeugung

⁵ Annahmen für diese Entwicklungen werden in einem Referenzszenario zusammengefasst.

2.3 Energieverbrauch und Treibhausgasemissionen in Österreich 2019

In Abbildung 5 und Abbildung 6 werden der Energieverbrauch (BEEV) und die THG-Emissionen in Österreich im Jahr 2019 grob dargestellt, um deren Dimensionen in den einzelnen Sektoren zu verdeutlichen. Die betrachteten Sektoren umfassen den Energiesektor, sowie die Verbrauchssektoren Industrie, Verkehr, Haushalte, Dienstleistungen (DL), Landwirtschaft (LW) und Abfall. Diese Darstellung ist eine hilfreiche Grundlage, um die Ergebnisse der Analyse einordnen zu können.

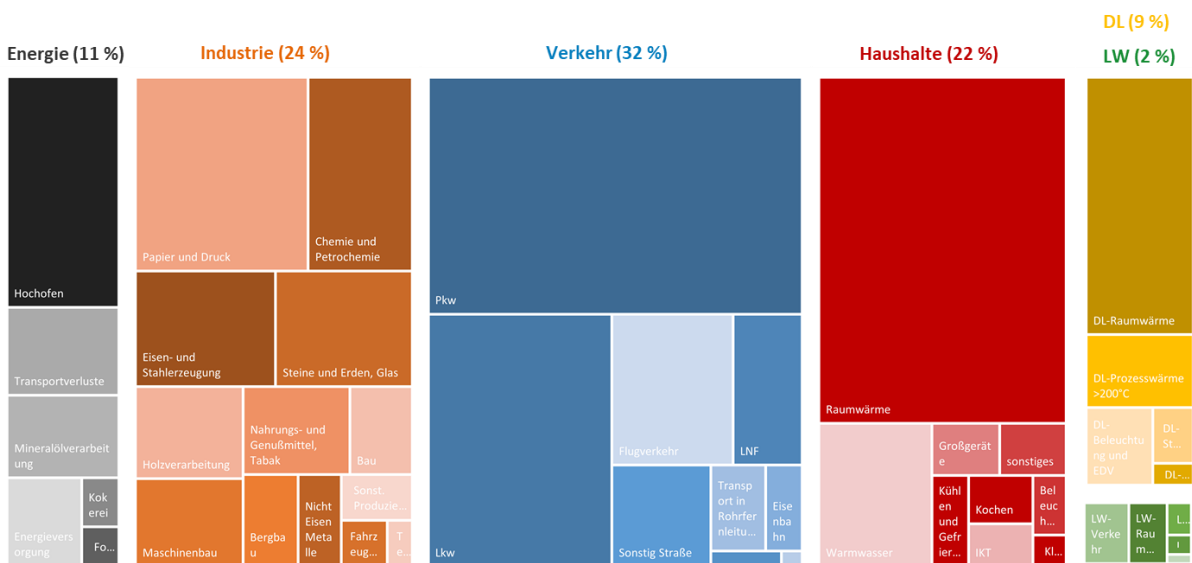


Abbildung 5: Brutto-Endenergieverbrauch in Österreich im Jahr 2019; Quelle: (Statistik Austria 2020a), (Statistik Austria 2020b), Abbildung AEA

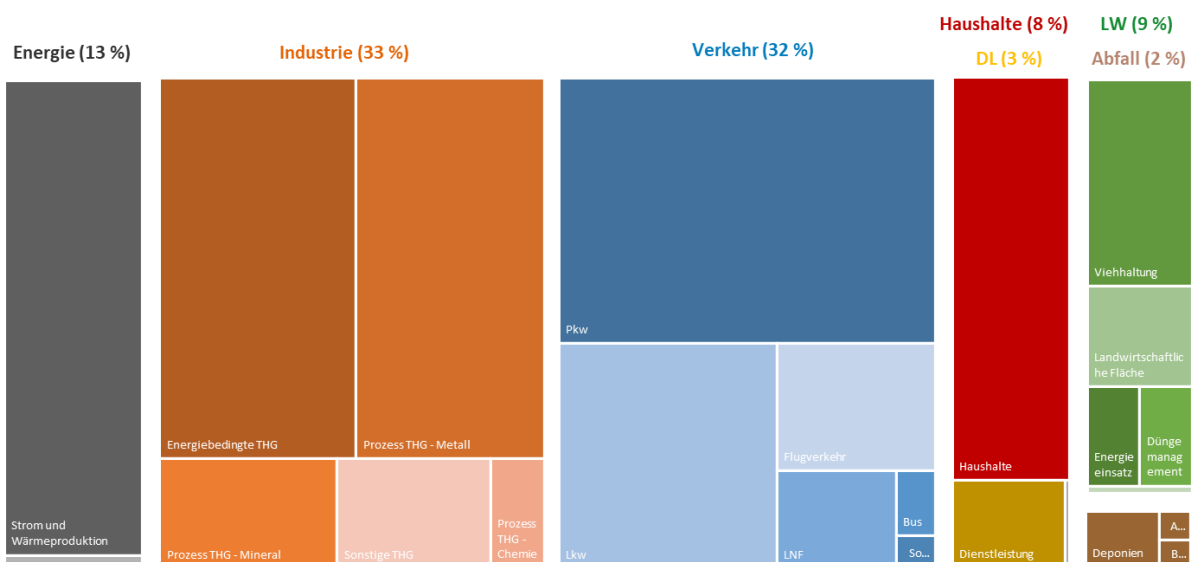


Abbildung 6: Treibhausgasemissionen in Österreich im Jahr 2019; Quelle: (UBA 2021), Abbildung AEA

Der Energiesektor wird hier nur zwecks Vollständigkeit erwähnt. Er wird in der vorliegenden Studie, welche sich auf die Energieverbrauchssektoren fokussiert, nicht untersucht. Allerdings werden im Energiesektor nicht nur die Strom- und Fernwärmeerzeugung bilanziert, sondern auch wichtige Energieträgerumwandlungen für die Industrie. So wird in diesem Sektor der Energieverbrauch von manchen Energieträgerumwandlungen verbucht, aufgrund unterschiedlicher Bilanzierungsgrenzen allerdings nicht die zugehörigen THG-Emissionen. Dies betrifft zum

Beispiel Hochöfen, welche für die Eisen- und Stahlindustrie essenzielle Grundstoffe produzieren, und die Mineralölverarbeitung, welche in der chemischen Industrie wichtige Materialien bereitstellt.

Im Industriesektor ist der Energieverbrauch in 13 Sub-Sektoren und die THG-Emissionen in energiebedingte und prozessbedingte Emissionen aufgegliedert. Aus Abbildung 5 wird deutlich, dass die vier Sektoren Papier und Druck, Chemie und Petrochemie, Eisen- und Stahlerzeugung sowie Steine, Erden und Glas mehr als 50 % des industriellen Energieverbrauchs verursachen. Abbildung 6 hingegen zeigt, dass allein drei dieser Sektoren (Metall, Mineral und Chemie) durch deren Prozessemissionen ca. 50 % der Emissionen im Industriebereich verursachen.

Der Verkehrssektor verursacht sowohl ca. ein Drittel des Energieverbrauchs als auch der THG-Emissionen. Die Untergliederung in Pkw, Lkw, Flugverkehr, LNF etc. zeigt deutlich, welche Bereiche hier dominant sind.

Der Haushaltssektor und der Dienstleistungssektor haben einen relativ hohen Energieverbrauch und verursachen relativ niedrige THG-Emissionen. Dies kann einerseits auf eine höhere Nutzung erneuerbarer Energieträger als auch auf methodische Ursachen zurückgeführt werden. Methodisch werden Emissionen, welche für die Fernwärmeerzeugung in Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen anfallen, im Energiesektor (und nicht im Haushalts- oder Dienstleistungssektor) verbucht.

Der Landwirtschaftssektor hat einen niedrigen Energieverbrauch, allerdings hohe THG-Emissionen. Diese THG-Emissionen werden hauptsächlich durch Rinderhaltung, die Verwendung von Kunstdünger und das Management von Wirtschaftsdünger verursacht.

Der Sektor Abfall wird nur für THG-Emissionen als separater Sektor ausgewiesen. In diesem verursachen vor allem bestehende Deponien, durch kontinuierlichen Methanaustritt, THG-Emissionen.

3 Quantifizierung

3.1 Industrie

3.1.1 Überblick

Für Industrie 4.0 existieren eine Vielzahl an Definitionen. Bereits Industrie 3.0, welche im Jahr 1969 ihren Anfang nahm, setzte digitale Technologien (Computer, Elektronik, Sensoren) für die Automatisierung ein (ETC 2021) und auch heute nutzen viele Unternehmen digitale Technologien zur Verbesserung von Sicherheit und Produktivität (IEA 2017). Für Industrie 4.0, deren Effekte in der vorliegenden Studie untersucht werden, gibt es einige gängige Definitionen aus dem deutschen Sprachraum⁶:

- „Industrie 4.0 bezeichnet die intelligente Vernetzung von Maschinen und Abläufen in der Industrie mit Hilfe von Informations- und Kommunikationstechnologie.“ (BMW i 2019)
- „Die Begriffe ‚digitale Transformation‘ und ‚Industrie 4.0‘ beziehen sich auf die Verbindung der physischen mit der digitalen Welt. Konkret bedeutet das für die Industrie und das verarbeitende Gewerbe die Verbindung von Anlagen, Maschinen, Werkstücken und Produkten mit digitalen Technologien, welche durch neue Informationstechnologien, insbesondere durch das Internet und Cyber-physikalische Systeme (CPS), ermöglicht wird.“ (VDI ZRE 2017)
- „Im industriellen Kontext bezeichnet der Begriff Industrie 4.0 die Verbindung der digitalen Welt des Internets mit den konventionellen Prozessen und Diensten der produzierenden Wirtschaft. Es handelt sich dabei um die horizontale und vertikale Vernetzung entlang der Wertschöpfungskette mit Verlagerung der Steuerung von oben nach unten.“ (BMW i 2015)
- „Mit dem Begriff Industrie 4.0 werden in Europa häufig Technologien, welche zu erhöhter Digitalisierung, Automatisierung und Interkonnektivität führen, zusammengefasst.“ (Cirillo V. 2021)

Unterschiedliche Organisationen haben in den letzten zehn Jahren Einschätzungen über das mögliche Energieeinsparungspotenzial der Industrie 4.0 abgegeben:

- Laut Smart Manufacturing Leadership Coalition können Technologien im Kontext von Smart Manufacturing die Energieeffizienz um 25 % verbessern (SMLC 2011).
- Jene Unternehmen, die in der Studie „Ressourceneffizienz durch Industrie 4.0“ untersucht wurden, ordneten die erzielte Verringerung des Energieverbrauchs (elektrische Energie) durch Maßnahmen der di-

⁶Der nachfolgende Text stammt zu einem großen Teil aus dem „Electric Motor Systems Annex“-Bericht (Kulterer 2019a). Teile dieses Berichts werden hier wiedergegeben, da diese einen guten Überblick über die Einordnung der Digitalisierungseffekte in der Industrie durch österreichische Experten und Expertinnen geben.

igitalen Transformation überwiegend im Bereich bis 25 % ein (VDI ZRE 2017). Basierend auf den Erfahrungen bei Sensitec nimmt dieselbe Studie eine mögliche Einsparung an Strom durch eine Echtzeitsteuerung der Fertigungslinie zwischen 10 % und 20 % an (VDI ZRE 2017).

- Der Einsatz von Big Data und Advanced Analytics kann zu einer 20- bis 25-prozentigen Erhöhung des Produktionsvolumens und zu einer 45-prozentigen Reduktion von Stillstandszeiten führen, was wiederum die Stand-by-Verluste minimiert und somit Energie für die Bedienung der Anlagen einspart (McKinsey Digital 2015) (VDI ZRE 2017).
- Die Studie des World Economic Forum 2019 gibt eine Steigerung der Energieeffizienz für ausgewählte Anwendungsbeispiele von Industrie 4.0 von 2 % bis 50 % an (WEF 2019).
- Die IEA (IEA 2019b) schätzt die kumulative Wirkung aus der Kombination einer Reihe von digitalen Technologien und fortgeschrittenen Software-Anwendungen auf den Energieverbrauch mit einer möglichen Reduktion von 30 % ab.

Die Bandbreite der Einschätzungen bzgl. Energieeinsparungspotenzialen durch Digitalisierungstechnologien in der Industrie reicht somit von ca. 2 % bis 50 %. Die meisten Quellen haben Einschätzungen, welche einen Bereich von ca. 20 % bis 30 % abdecken.

Das Ziel der vorliegenden Studie ist allerdings nicht, eine grobe Abschätzung für die gesamte Industrie und für die Kombination aller Digitalisierungstechnologien abzugeben, sondern die möglichen Effekte von einzelnen Anwendungen mittels Fermi-Lösungen herzuleiten. Hierfür müssen zuerst relevante Einzelanwendungen identifiziert werden. Folgende Teilkomponenten wurden in Kulterer (2019a) für Industrie 4.0 als energierelevant identifiziert und qualitativ bewertet:

Tabelle 11: Energierelevante Teilkomponenten von Industrie 4.0; Quellen: (VDI ZRE 2017), (Obermaier 2016), (Rogers 2014), (Kulterer 2019a)

Teilkomponenten von Industrie 4.0	Energieeffekte
Aktoren, Sensoren	Eine Kommunikation miteinander und mit übergeordneten Systemen erhöht den Informationsstand und bietet Möglichkeiten für Analysen und Zustandsüberwachung und damit zur Energieoptimierung.
Robotik und Automatisierungstechnologien	Der Energieeinspareffekt ist eher negativ, ist aber auch unter anderem abhängig vom Roboter-Stand-by-Verbrauch.
Additive Fertigungstechnologie (3-D-Druck)	Generell ist Maßanfertigung zu Kosten einer Großserienproduktion das Ziel, d. h., der Energieverbrauch ist verglichen mit Großserien pro Stück höher. Zusätzlich erlaubt der Einsatz dieser Technologie eine Gewichtsoptimierung von Produkten. Der Energieeffekt ist aber abhängig von der bisher verwendeten Technologie. Theoretisch kann energieeffizientes Design besser umgesetzt werden.
Big Data, Data Mining Data Analytics Cloud-based Data Analytics	Die Auswertung von Prozessdaten ermöglicht die Identifikation von Schwachstellen und Störungen. Das Ziel ist, durch die Erfassung und Auswertung aller relevanten Daten (inkl. Energiedaten) Prozess- und Qualitätsverbesserungen zu erreichen. Dies beinhaltet auch verbesserte Methoden zur Evaluierung und Validierung.

<p>Automatische Steuerung Onlineüberwachung</p>	<p>Die zeitliche Erfassung verfahrensrelevanter Daten in Echtzeit und deren Auswertung ermöglicht Energieeinsparung. Eine sofortige Fehlermeldung erlaubt Eingriff in den Produktionsprozess; Ausschussraten und Materialeinsatz werden minimiert. Bedarfsorientierte Regelung (z. B. automatische Temperaturregelung) zur Wärmebehandlung erhöht Qualität bei geringerer Gasmenge.</p>
<p>Human-Machine Interface/Collaboration Augmented Reality</p>	<p>Assistenzsysteme unterstützen Menschen bei energieeffizientem Betrieb der Maschine, z. B. Key Performance Indicators auf Benutzerdisplay. Augmented Reality kann Wartungsprozesse erleichtern.</p>
<p>Digital Twin/Digitaler Schatten</p>	<p>Ein Abbild des Prozesses ermöglicht es, eine echtzeitfähige Auswertungsbasis aller relevanten Daten zu erstellen, Auskunft über aktuelle Zustände zu geben und Prognosen zukünftiger Zustände durchzuführen. Außerdem bieten Digital Twins die Möglichkeit, auch effizientere Prozesse und Teilkomponenten zu entwickeln, wodurch in weiterer Folge Energie gespart wird.</p>
<p>Verbindung von Produktions-, Umwelt- und Energiedaten</p>	<p>Das Betriebsinformationssystem speichert alle verfügbaren Daten (Energie-, Materialverbrauch) und macht eine Auswertung über längere Zeiträume möglich; Einsparungspotenziale werden erkannt.</p>

In der vorliegenden Analyse werden Automatisierungstechnologien und Robotik, additive Fertigungstechnologie, und Digital Twins untersucht. In diese untersuchten Anwendungsfälle werden Aktoren, Sensoren, Big Data, automatische Steuerung, die Verbindung von Produktions-, Umwelt- und Energiedaten sowie Internet-of-Things-Technologien als wichtige Technologien für diese Anwendungen implizit miteingerechnet. Als zusätzliche relevante Digitalisierungstechnologie in der Industrie wurde die Gebäudeautomatisierung von Stakeholdern identifiziert und aus diesem Grund hier inkludiert.

Im Rahmen dieser Analyse konnten die Digitalisierungseffekte auf Energie und THG-Emissionen nur grob betrachtet werden. Der Grund hierfür ist, dass zwar Informationen zu Verfügbarkeit und Herstellung neuer Technologien in der Regel aufgrund von Patentaufzeichnungen abgeleitet werden können, allerdings Informationen über die Marktdurchdringung oder den Einsatz der Technologien selten verfügbar sind (Cirillo V. 2021). Einzig zur Verbreitung von Robotern sind konkrete Daten vorhanden, welche im Weiteren analysiert werden (IFR 2020).⁷

Zu folgenden relevanten Aspekten der Industrie 4.0 wurden keine konkreten Daten für die möglichen Effekte auf Energieverbrauch und THG-Emissionen gefunden, weshalb Abschätzungen dazu auf zu vielen Annahmen beruhen müssten. Diese Anwendungen wurden aus diesem Grund in der vorliegenden Analyse nicht inkludiert:

- Beyond-the-plant-fence (IEA 2017), Human-Machine Interface/Collaboration, Augmented Reality (Kulterer 2019a), Extended Reality, Mixed Reality oder Virtual Reality (FEEI 2021)
- Verlängerte Lebensdauer von Fertigungsequipment (wie in ETC (2021) beschrieben)
- Automatisierte Lagerlogistik / Drohnen
- Predictive Maintenance

⁷ Es wird empfohlen, die einzelnen Anwendungen, deren Potenziale und Marktdurchdringung bis 2040 in einem Forschungsprojekt für die einzelnen Industriesektoren separat zu untersuchen.

- Reduzierte Produktlebensdauer aufgrund von erhöhtem Einsatz von Elektronik und Betriebssoftware und deren begrenzter Verfügbarkeit für Ersatz und Update nach einer bestimmten Zeit (wie in Stakeholdergesprächen erörtert)

Durch die Anwendung von Digitalisierungstechnologien kann nicht nur Energieeffizienz unterstützt werden, sondern auch der Materialeinsatz reduziert werden. Industrieunternehmen, welche eine höhere Effizienz in der Nutzung von (Energie- oder Material-)Inputs erzielen, werden aufgrund niedrigerer Kostenbasis die Produktionsoutputs erhöhen (Microsoft und PWC, 2019). Dies entspricht einem direkten Rebound.

Allerdings führt die erhöhte Produktion in einem Unternehmen zu einer Reduktion der Produktion bei dessen nationalen und internationalen Mitbewerbern, welche geringere Effizienzverbesserungen erreichen (siehe (Acemoglu D. 2020) u. (Koch M. 2019)).⁸ Dies ist allerdings ein struktureller Rebound, der in der vorliegenden Studie nicht betrachtet wird. Trotz dieser Rebound-Effekte ist der Einsatz von Digitalisierungsanwendungen in Österreich gerechtfertigt, vor allem bei globaler Betrachtung: einerseits nachdem hier erwartet werden kann, dass Effizienzverbesserungen global langfristig zu einem verbesserten Energieeinsatz und niedrigeren THG-Emissionen je Produkteinheit führen; und andererseits weil sonst der Konkurrenzdruck aus dem Ausland (bei Einsatz von entsprechenden Digitalisierungstechnologien) zu verringerter Produktion und weniger Arbeitsplätzen in Österreich führen können.

⁸ Nachdem Energieverbrauch und THG-Emissionen auf Basis nationaler Grenzen bilanziert werden, Wettbewerber von Industrieunternehmen allerdings häufig international zu finden sind, können deshalb die Rebound-Effekte national betrachtet die gesamten Energieeffizienzgewinne durch Verbesserungen bei Motoren und Prozessen kompensieren.

3.1.2 Prozessautomatisierung

Hier werden die Digitalisierungsanwendungen (Prozessautomatisierung in der Fertigung, Digitalisierung von Motoren und Robotik) zusammengefasst, da diese in der Nutzenergieanalyse unter der Nutzenergiekategorie Standmotoren (Statistik Austria 2020b) gemeinsam betrachtet werden. Um eine Doppelzählung der Effekte in der Modellierung zu vermeiden, werden nach einer Detailbetrachtung der einzelnen Digitalisierungsanwendungen kombinierte Faktoren für Energieverbrauchs-Reduktionspotenziale und Marktkonzentration abgeschätzt. Zusätzlich wird die Automatisierung von Prozessen, welche Prozesswärme (< 200 °C bzw. > 200 °C) bereitstellen, ebenfalls hier dargestellt.

Bei der Automatisierung von Prozessen werden digitale Technologien zur Bedienung und Steuerung von Produktionsprozessen genutzt, um manuelle Eingriffe über die gesamte Produktion hinweg zu minimieren sowie Produktivität und Energieverbrauch der komplexen Systeme zu optimieren. Digitale Optimierung von Motoren werden separat angegeben, da Motorsysteme in Österreich für 69 % des Stromverbrauchs (Statistik Austria 2020b) in der Industrie verantwortlich sind. Sie umfassen u. a. Motoren-, Pumpen-, Ventilator-, Kälte- und Druckluftsysteme (Kulterer 2019a). Robotik-Anwendungen in der Industrie werden hier ebenfalls etwas genauer betrachtet, weil vorliegende Analysen ein Update und erweiterte Betrachtungen erlauben.

3.1.2.1 Prozessautomatisierung in der Industrie

Im Jahr 2018 nutzten mehr als 70 % der Produktionsunternehmen mit mehr als 20 Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern Softwaresysteme zur Produktionsplanung und -steuerung und mehr als 30 % der Unternehmen echtzeitnahe Produktionsleitsysteme (AIT 2018). Für Digitalisierungsanwendungen in der Industrie wird derzeit häufig die Automatisierungspyramide (siehe Abbildung 7) als konzeptionelle Grundlage verwendet. Diese teilt den gesamten Prozess in verschiedene Hierarchieebenen, um die Produktion besser planen, steuern und überwachen zu können. Prozessautomatisierung kann auf allen Ebenen durch Digitalisierung unterstützt werden.

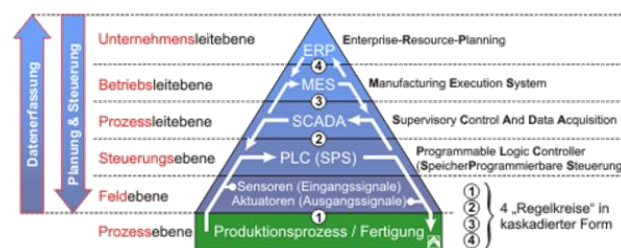


Abbildung 7: Automatisierungspyramide; Quelle: (IMK 2021)

Für die vorliegende Studie ist vor allem die weitere Optimierung der Prozesse im Sinne der Produktivität und Ressourcen-/Energieeffizienz in der Produktion, dem Engineering und der Materialverwendung im Fokus. Weitere Effekte, welche durch einen höheren Einsatz von automatisierten Prozessen entstehen können, wie zum Beispiel erhöhte Produktionsflexibilität und Produktqualität, können auch auf den Energieverbrauch wirken.

Produktivität ermöglicht eine höhere Produktion mit den vorhandenen Ressourcen (z. B. Energie). Ressourcen-/Energieeffizienz bedingt einen möglichst niedrigen Ressourcen- bzw. Energieeinsatz bei gegebenen Produktionsmengen. Durch optimierte Planung und Steuerung sowie Datenerfassung und Datenverarbeitung können sowohl die Produktion, der Designprozess der Produktion und die Materialverwendung optimiert werden. Dies

kann unter anderem durch Cyber-Physical Systems (CPS), künstliche Intelligenz (maschinelles Lernen etc.), Internet of Things, Edge/Fog/Cloud-Anwendungen, Selbstoptimierung, Selbstkonfiguration, Selbstdiagnose oder Kognitionsmechanismen unterstützt werden.

Folgende Abschätzungen der Effekte für Prozessautomatisierung wurden in der Literatur gefunden. Die Prozessoptimierungen für diese Reduktionen sind allerdings je Industriesektor unterschiedlich und können hier nicht im Detail untersucht werden.

- Die IEA (2019a) hat für Smart Process Control angegeben, dass durch digitale Nutzung von Daten, Kontrollen, Optimierungen und Automatisierung Reduktionen des Energieverbrauchs von bis zu 20 % möglich sind.
- 20 % Energieeinsparungspotenzial durch Prozessautomation und -kontrolle wird auch in einer weiteren Studie (Rogers E. 2013) angegeben.
- Der Verband der Elektro- und Digitalindustrie in Duetschland schätzt das Potenzial für Energieeinsparungen durch bedarfsorientierte Automatisierungstechnologie auf 10 % bis 25 % für Deutschland ein (ZVEI 2012).
- Das Smart Manufacturing Leadership Council (US) hat darauf hingewiesen, dass IKT-gestützte intelligente Prozess- und Produktionssteuerung das Potenzial haben, den Energieverbrauch um 25 % zu reduzieren (SMC 2011).
- Accenture (2021) gibt an, dass durch Automatisierung in der Fertigungsindustrie der Primärenergieverbrauch um 19 % reduziert werden kann, dass die Marktdurchdringung⁹ der Prozessautomatisierung im Jahr 2020 in Deutschland 16 % betrug und dass im Jahr 2030 eine Marktdurchdringung zwischen 41 % und 58 % erwartet werden kann.

3.1.2.2 Motoren

Motorsysteme umfassen u. a. Motoren-, Pumpen-, Ventilator-, Kälte- und Druckluftsysteme (Kulterer 2019a). Laut Kulterer (2019b) bieten viele Hersteller von Motoren bereits Produkte zur Erfassung und Verarbeitung von Daten von Motoren und Motorsystemen, im Sinne der Digitalisierung von Motorsystemen, an. Dies kann bereits in den Produktionsprozessen zu einer Erhöhung der Effizienz führen. Zusätzlich können auf Unternehmensebene Energieverbrauch und Effizienzniveau einzelner Produktionsschritte dargestellt und kontrolliert werden. Frequenzumrichter bei Motoren sind hierfür zentrale Schnittstellen zwischen Datenerfassung und Steuerung. Wesentliche Anforderungen an die Entwicklung von Elektromotoren für erhöhte Energieeffizienz durch Digitalisierung sind unter anderem: Informationserfassung über Sensoren, Konnektivität über Bussysteme, Darstellungsmöglichkeiten der erfassten Daten vor Ort und zentral, automatisierte Auswertungsmöglichkeiten, Aspekte der Mensch-Maschinenkollaboration und effizienter Technologieeinsatz. Für Standmotoren wurden folgende Quellen für mögliche Reduktionen des Energieverbrauchs durch digitalisierte Anwendungen berücksichtigt:

- Die IEA (2019a) hat für smarte Motoren angegeben, dass durch datenunterstützte Steuerung, Lasterkennung und den Einsatz von Optimierung eine Energieverbrauchsreduktion von bis zu 50 % möglich ist.

⁹ Marktdurchdringung bezieht sich in der vorliegenden Studie auf die Anzahl der durchschnittlichen Maschinen und somit auf die Höhe des relevanten Energieverbrauches.

- Laut einer Umfrage (Kulterer 2021) bewerten 25 % der Befragten (n = 82) die Steigerung der Energieeffizienz elektromotorischer Systeme durch den Einsatz digitaler Lösungen mit 6 % bis 10 %. Fast die Hälfte der Befragten schätzt die möglichen Energieeinsparungen mit 11 % bis 40 % sogar höher ein. Weitere 8 % der Befragten denken, dass die Einsparungen mehr als 40 % erreichen könnten.

3.1.2.3 Robotik

Laut AIT (2018) setzten im Jahr 2018 mehr als 40 % aller österreichischen Produktionsbetriebe mit mehr als 20 Beschäftigten bereits Industrieroboter ein. Ein Drittel aller Großbetriebe nutzten kollaborierende Roboter. Laut International Federation of Robotics (IFR) betrug im Jahr 2019 die Anzahl der Roboter in der österreichischen Industrie 189 pro 10.000 Beschäftigte (IFR 2020).¹⁰ Im Sachgüterbereich waren im Jahr 2019 insgesamt 678.299 Personen in Österreich beschäftigt (WKO 2019). In Österreich betrug die Gesamtzahl der Roboter im Jahr 2019 laut diesen Angaben rund 12.800. Brunner errechnete einen Gesamtstromverbrauch von 7.000 kWh pro Jahr auf Basis eines Industrieroboters mit 210 kg Traglast, einer Reichweite von 2,7 m, einer Vollastleistung von 3,5 kW und einem detaillierten Lastprofil (ca. 19 % der Zeit 3 kW, 10 % in Warteposition mit 0,7 kW; restliche Zeit inklusive Wochenendabschaltung und Warten mit Bremsen ca. 0,2 kW) (Brunner 2015). Rechnet man auf Basis dieses Roboters den Energieverbrauch hoch, ergibt dies für Österreich einen Wert von rund 90 GWh. Der Stromverbrauch für Industrieroboter machte daher 2019 einen Anteil von 0,5 % des gesamten Stromverbrauchs elektrischer Standmotoren in der Sachgüterproduktion aus (19.359 GWh im Jahr 2019).

Dies ist ein scheinbar sehr geringer Wert, allerdings kann auf Basis der Abschätzung hier und der Abschätzung in der originalen Analyse in Kulterer (2019a) für 2016 ein Wachstum für den Einsatz von Robotern über die Zeit ermittelt werden. Für das Jahr 2016 wurde die Anzahl an Robotern mit 9.100 und der Energieverbrauch mit 63,5 GWh abgeschätzt (Kulterer 2019a). Somit kann abgeschätzt werden, dass sowohl der Einsatz als auch der Energieverbrauch von Robotern in drei Jahren um ca. 40 % gestiegen ist. Bei einem gleichbleibenden Trend (und linearen Wachstumsraten von ca. 13 %) könnte im Jahr 2040 die Anzahl an Robotern und deren Energieverbrauch um 270 % wachsen. Dies würde einer Anzahl von 34.600 Robotern mit einem Energieverbrauch von 240 GWh im Jahr 2040 in Österreich entsprechen.

Folgende Möglichkeiten zur Reduktion des Energieverbrauchs von Industrierobotern wurden in Kulterer (2019a) identifiziert:


- effizientere Motoren
- Verringerung der Größe
- Verringerung des Stand-by-Verbrauchs
- Rückspeisung von Energie bei Brems- und Senkbewegungen (Yaskawa 2018)
- kompaktere Bauweise / geringere Masse
- verbesserte Kühlung
- optimierte Bewegungsgeschwindigkeit
- statische und dynamische Festigkeit und Verbesserung der Bearbeitungsgenauigkeit (Uhlmann 2016)
- Vermeiden von unnötigen (z. B. durch falsche Installationshöhe, Ausweichmanöver) oder ruckartigen Bewegungen (also das rasche Beschleunigen und Abbremsen).
- Simulationsmodelle, die optimierte Bahnkurven ohne abrupte Richtungswechsel errechnen, ergaben in Labortests Stromesparpotenziale von 10 % bis 50 %.

¹⁰ Für Robotik werden Teile des Exkurses, hier aus Kulterer (2019a), wegen der Verfügbarkeit und Relevanz upgedatet und erweitert.

In dem Stakeholderprozess für dieses Projekt wurde von einem Experten das Energieeinsparungspotenzial bei Robotern durch Internet of Things Lösungen (IoT-Lösungen) mit 10 % bis 15 % angegeben.

Auf Basis dieser Angaben wird für die vorliegende Analyse abgeschätzt, dass durch all diese Effekte bei energieeffizientem Einsatz von Robotern ca. 25 % des Stromverbrauchs eingespart werden könnten. Dies entspricht ca. 60 GWh im Jahr 2040 (240 GWh * 25 %).

Tabelle 12: Annahmen für die Quantifizierung – Prozessautomatisierung; Quelle: AEA

Prozessautomatisierung/Robotik					
 Referenz-EV	↓ Reduktions- potenzial	Aktuelle	Marktdurchdringung 2040		
		Marktdurchdringung	MIN	MID	MAX
EV Standmotoren alle Branchen	-15 % des EV	15 %	40 %	50 %	60 %
EV Prozessenergie alle Branchen	-15 % des EV	15 %	40 %	50 %	60 %
Wichtige Technologien					
<ul style="list-style-type: none"> • Sensoren, Aktuatoren und Programmable Logic Controllers (PLC) • Internet of Things • Künstliche Intelligenz • Robotik • Edge Computing & Cloud Computing • Big Data • Industrial Internet of Things (IIoT) • Industrial Control Systems (ICS) 			<ul style="list-style-type: none"> • Cyber-physical Systems (CPS) oder Cyber-physical Production System (CPPS) • Operations Management (OM) • Radio Frequency Identification (RFID) • Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA) • Manufacturing Execution System (MES) • Enterprise Resource Planning (ERP) • Machine-to-Machine System (M2M) • Flexible Manufacturing System (FMS) 		
Wirkungskette					
Das Reduktionspotenzial umfasst die mögliche Energieeinsparung bei Geräten, Anlagen und Prozessen durch deren Vernetzung und Optimierung.					
Rebound-Effekt					
Es wird angenommen, dass es zu ca. 20 % direkten Rebound-Effekten durch Prozessautomatisierung und die so erhöhte Produktivität kommt.					
Weitere Informationen					
Die Studie Accenture (2021) ist eine Basis für die hier angegebenen konservativeren Annahmen bzgl. Marktdurchdringung (vor allem bezogen auf den Zeitpunkt). Das Reduktionspotenzial wird am unteren Ende der Einschätzungen gewählt, da weitere unterstützende Anwendungen zur Prozessautomatisierung, Robotik und Optimierung von Motoren (z. B. Simulation, digitaler Zwilling) separat betrachtet werden.					
Relevante Quellen					
(Accenture 2021), (Kulterer 2021), (IEA 2019a), (Rogers E. 2013), (ZVEI 2012), (SMLC 2011)					

3.1.3 Simulation und digitaler Zwilling

Digitale Zwillinge simulieren physische Produkte und Prozesse im digitalen Raum über den gesamten Produktionszyklus hinweg (Design, Prototyping, Produktion), um physische Iterationen zu minimieren und Prozesse zu optimieren. Durch Simulationen mit digitalen Zwillingen können die Produktqualität erhöht, Produktionsprozesse verbessert oder Produktionsprozesse schneller und optimierter umgestellt werden. Dies kann zu einer Steigerung der Energie- und Ressourceneffizienz führen.



Laut FEEI (2021) gibt es in der Industrie digitale Zwillinge (Digital Twins) als virtuelle Modelle/Simulationen beispielsweise für Produkte, Produktionsanlagen, Prozesse und Dienstleistungen. Der besondere Wert von Simulation und digitalen Zwillingen in der Industrie ergibt sich aus der Einsparung physikalischer Prototypen und der Möglichkeit, Verhalten, Funktionalität und Qualität des realen Zwillings unter jedem relevanten Aspekt zu simulieren. Anwendungen für digitale Zwillinge liegen unter anderem in folgenden Bereichen:

- Produktentwicklung
- Produktion, Intralogistik sowie Infrastruktur (u. a. Gebäudeinfrastruktur)
- Predictive Maintenance
- Simulierung des physischen Objekts: Darstellung zur Erfassung komplexer Systeme (Produktionsplanung, Steuerung, Logistik, Instandhaltungsmaßnahmen, Supply Chain)
- Selbstoptimierung von Produktionssystemen
- Circular Economy

Für mögliche Reduktionen des Energieverbrauchs durch digitalisierte Anwendungen in den Bereichen Simulation und digitale Zwillinge wurden folgende Quellen aus Literatur und Aussagen aus Stakeholdergesprächen berücksichtigt:

- In Accenture (2021) wurde geschätzt, dass durch den Einsatz von digitalen Zwillingen in der Fertigungsindustrie 20 % des Primärenergieverbrauchs eingespart werden kann, dass die Marktdurchdringung im Jahr 2020 in Deutschland 18 % betrug und dass im Jahr 2030 eine branchenübergreifende Marktdurchdringung zwischen 42 % und 60 % erwartet werden kann.
- Laut VDI (2017) kann es durch die Einsparung überflüssiger Prototypen zu einer Energiereduktion um bis zu 25 % beim Prototypenbau kommen.
- In einer Masterarbeit (Ramschek 2020) wurde auf Basis von Interviews die Möglichkeiten von Industrie 4.0 zur Erhöhung von Energie- und Materialeffizienz in der Eisen- und Stahlindustrie untersucht. In dieser wurde unter anderem eine mögliche Reduktion des Stromverbrauchs um 5 % und des Verbrauchs von Erdgas um 13 % durch Modelleinsatz, Simulation und dynamische Einsatzsteuerung genannt.
- Laut dem Nachhaltigkeitsbericht der OMV (2021) konnte durch die Entwicklung eines Digital Twin zur Optimierung der Vorwärmkette der Rohöldestillationsanlage in Schwechat die Energieeffizienz erhöht werden und somit der CO₂-Ausstoß um bis zu 18.000 t CO₂ jährlich reduziert werden.
- In Stakeholdergesprächen wurde Simulation und digitalem Zwilling ein hohes Potenzial zu einer umfassenden Marktdurchdringung zugesprochen. Die Auswirkung auf Energieverbrauch und THG-Emissionen werden qualitativ unterschiedlich bewertet, nämlich von starken Einsparungen bis gleichbleibend, abhängig von der Betrachtung indirekter Effekte (FEEI 2021).

Tabelle 13: Annahmen für die Quantifizierung – Digitaler Zwilling; Quelle: AEA

Simulation und digitaler Zwilling					
 Referenz-EV	 Reduktions- potenzial	Aktuelle Marktdurch- dringung	Marktdurchdringung 2040		
			MIN	MID	MAX
EV Standmotoren, EV Prozessenergie alle Branchen	-10 % des EV	15 %	40 %	55 %	70 %
Wichtige Technologien					
<ul style="list-style-type: none"> • Sensoren, Aktuatoren und Programmable Logic Controllers (PLC) • Internet of Things (IoT) oder Industrial Internet of Things (IIoT) • Künstliche Intelligenz • Big Data & Cloud Computing • Augmented Reality & Virtual Reality • Enterprise Systems • Industrial Control Systems (ICS) 		<ul style="list-style-type: none"> • Cyber-physical Systems (CPS) oder Cyber-physical Production System (CPPS) • Operations Management (OM) • Radio Frequency Identification (RFID) • Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA) • Manufacturing Execution System (MES) • Enterprise Resource Planning (ERP) • Machine-to-Machine System (M2M) • Flexible Manufacturing System (FMS) 			
Wirkungskette					
Das Reduktionspotenzial umfasst die mögliche Energieeinsparung durch Vermeidung physischer Iterationen und Optimierung von Prozessen.					
Rebound-Effekt					
Es wird angenommen, dass es zu ca. 20 % direkten Rebound-Effekten durch Simulation und digitalen Zwilling und somit zu erhöhter Produktivität kommt.					
Weitere Informationen					
<p>Marktdurchdringung bezieht sich auf den Einsatz von digitalen Zwillingen für Produkte und Produktionsanlagen (aktuell: Mittelwert aus mehreren Branchen). Die Marktdurchdringungen wurden abgeschätzt und im Stakeholderprozess besprochen.</p> <p>Das Reduktionspotenzial wird konservativer als in der Literatur eingeschätzt, da weitere unterstützende Anwendungen z. B. zur Prozessautomatisierung, Robotik und optimierte Motoren separat betrachtet werden.</p>					
Relevante Quellen					
(Accenture 2021), (FEEI 2021)					

3.1.4 Additive Fertigung

Im Jahr 2018 nutzten über 20 % der österreichischen Produktionsbetriebe 3-D-Druck bzw. additive Fertigungsverfahren (AIT 2018). Die additive Fertigung eignet sich für die Fertigung von Anschauungs- und Funktionsprototypen (Rapid Prototyping), von Endprodukten vor allem von Einzelteilen (Rapid Manufacturing) sowie von Werkzeugen und Formen (Rapid Tooling) (FEEI 2021). In der additiven Fertigung (bzw. im 3-D-Druck) werden eine Vielzahl von unterschiedlichen Verfahren verwendet. Die meistgenutzten Verfahren sind pulverbasierte Verfahren wie Powder Bed Fusion Processes, Polymer Laser Sintering oder Metal Laser Sintering (PBF, PLS, MLS) und Extrusionsverfahren (EB – Physisch, Chemisch). Weitere verwendete Verfahren sind Photopolymerization Processes (PP) oder Stereolithografie (SLA), Material Jetting (MJ), Binder Jetting (BJ), Sheet Lamination (SL) sowie Directed Energy Deposition (DED) (UBA DE 2018).



Der Effekt auf Energieverbrauch und THG-Emissionen bei additiven Verfahren hängt grundsätzlich von der Produktart/-anzahl ab. 3-D-Drucker können weniger Energie verbrauchen als andere Herstellungsverfahren. Dies trifft vor allem für den Druck von Prototypen, in der Verwendung von Leichtbau, für Ersatzteildruck und die Werkzeugherstellung zu. Zum Beispiel eignet sich das Selective Laser Sintering (SLS) im Vergleich zu Spritzgussverfahren aus Energieverbrauchssicht für Kleinserien allerdings nicht mehr für Großserien (UBA DE 2018).

Für die additive Fertigung wurden folgende Quellen und Aussagen für mögliche Reduktionen des Energieverbrauchs aus Literatur und Stakeholdergesprächen berücksichtigt:

- In Accenture (2021) wurde geschätzt, dass es in Deutschland durch den Einsatz von additiver Fertigung zu einer Reduktion der Tonnenkilometer des Güterverkehrs um 22 % kommen kann, dass die derzeitige Marktdurchdringung 1 % beträgt und die Marktdurchdringung im Jahr 2030 mit 10 % bis 15 % abgeschätzt werden kann.
- Laut dem Umweltbundesamt in Deutschland (2018) führen 3-D-Drucktechnologien nur zu einer geringen Verbesserung der CO₂-Bilanz im Transport, da die Rohstoffe für das Druckmaterial und die Druckerteile weiterhin transportiert werden müssen.
- Laut Huang (2016) und IEA (2017) können 9 % bis 17 % der gesamten Masse von derzeit genutzten Flugzeugen durch leichtere 3-D-produzierte Komponenten in nächster Zeit ersetzt werden. Dies kann in der US-Flugzeugflotte bis 2050 zu einer Reduktion des Treibstoffbedarfes um 6,4 % führen.
- Der Leichtbau kann nicht nur bei Flugzeugen, sondern auch bei Lkws und Pkws zu Gewichtsreduktion und damit auch zu einem reduzierten Energieverbrauch führen (UBA DE 2018). Laut International Council on Clean Transportation (ICCT 2021) kann das Leergewicht von Sattelzugmaschinen (SZM), durch fortschrittlichen hochfesten Stahl und durch Aluminium-/Magnesium-Bauteile sowie weitere Kompositmaterialien, um 2 t reduziert werden. Dies entspricht einer Reduktion des Gewichtes von beladenen SZM um ca. 10 % und somit einer Reduktion des Energieverbrauchs um ca. 5 %. Bei der Annahme, dass hier von 50 % der Materialien in additiven Verfahren hergestellt werden, entspricht dies einer potenziellen EV-Reduktion von 2,5 %.
- Interviewte Stakeholder nehmen an, dass die Marktdurchdringung stark zunehmen wird. Befragte Experten und Expertinnen gehen von einem unveränderten Energieverbrauch je Gerät, aber aufgrund der indirekten Effekte von einem Rückgang der THG-Emissionen durch additive Fertigungstechnologien aus. Dies resultiert daher, dass insbesondere bei älteren Geräteteilen keine Lagerhaltung von Ersatzteilen mehr notwendig ist, sondern „auf Bedarf“ Bauteile hergestellt werden können (FEEI 2021).

- In der Fertigung von Prototypen und Einzelteilen ist eine Reduktion des Energieverbrauchs durch additive Verfahren möglich (UBA DE 2018). Der Energieverbrauch für Prototypen- und Einzelteilverfertigung ist allerdings deutlich geringer als der Energieverbrauch der Serien- bzw. Massenfertigung. Es wird abgeschätzt, dass der Energieverbrauch für Prototypen und Einzelfertigung ca. 1 % bis 4 % des Energieverbrauchs in der Nutzenergiekategorie Standmotoren ausmacht (Mittelwert 2,5 %). Es wird weiters angenommen, dass das EV-Reduktionspotenzial durch additive Fertigung für Prototypen und Einzelfertigung ca. 15 % ausmacht.

Tabelle 14: Annahmen für die Quantifizierung – Additive Fertigung; Quelle: AEA

Additive Fertigung					
 Referenz-EV	 Reduktions- potenzial	Aktuelle Marktdurch- dringung	Marktdurchdringung 2040		
			MIN	MID	MAX
Tonnenkilometer des Güterverkehrs	-1 %	1 %	2 %	3 %	4 %
Treibstoffbedarf Flugzeuge	-5 %	10 %	40 %	60 %	80 %
Energiebedarf Lkw	-2,5 %	0 %	20 %	40 %	60 %
EV Standmotoren	-15 %	0,1 %	0,5 %	1,2 %	2 %
Wichtige Technologien					
<ul style="list-style-type: none"> • Verfahren: PBF, EB, PP, SLA, MJ, BJ, SL, DED, SLS • IT-Systeme & -Anwendungen 			<ul style="list-style-type: none"> • Big-Data-Analytik • Künstliche Intelligenz 		
Wirkungskette					
Durch lokal hergestellte Prototypen und Ersatzteile können Gütertransportwege eingespart werden. Durch Leichtbauweise kann der Treibstoffbedarf in Flugzeugen reduziert werden.					
Rebound-Effekt					
Es werden für die additive Fertigung keine direkten Rebounds angenommen.					
Weitere Informationen					
Annahmen beruhen auf Accenture (2021), das Reduktionspotenzial wurde allerdings halbiert und die Marktdurchdringung konservativ auf das Jahr 2040 hochgerechnet. Indirekte Effekte durch den mittels additiver Fertigung ermöglichten Leichtbau von Flugzeugen werden betrachtet. Der mögliche Einsatz im Straßengüterverkehr wird in der vorliegenden Analyse nicht betrachtet. Erhöhter Energiebedarf pro Bauteil (höherer Energiebedarf in der Produktion) und reduzierter Materialbedarf pro Bauteil (niedriger Energiebedarf in der Grundstoffproduktion) wird nicht betrachtet.					
Relevante Quellen					
(UBA DE 2018), (Accenture 2021), (FEEI 2021), (IEA 2017)					


3.1.5 Gebäudeautomatisierung

Vernetzte und automatisierte Gebäude nutzen digitale Technologien zur Überwachung, Analyse, Steuerung, Automatisierung und Optimierung von Gebäudeleittechniksystemen für Heizung, Lüftung, Klimaanlage, Beleuchtung. Details zu den möglichen Wirkungsketten sind in Kapitel 3.4.2 angeführt.

Für Gebäudeautomatisierung in der Industrie wurden folgende Quellen für digitalisierte Anwendungen berücksichtigt:

- Die IEA (2019a) hat für nichtindustrielle Prozesse (Beleuchtung, Heizung, Kühlung, Lüftung) angegeben, dass für diese eine Reduktion des Energieverbrauchs von bis zu 10 % möglich ist.
- In Stakeholdergesprächen wurde angegeben, dass die Möglichkeiten zur Reduktion des Energieverbrauchs für Heizung, Kühlung und Lüftung bei ca. 30 % (vor allem unterstützt durch erhöhte Abwärmennutzung) und für Beleuchtung, Geräte und IKT bei ca. 10 % liegen.

Tabelle 15: Annahmen für die Quantifizierung – Gebäudeautomatisierung; Quelle: AEA

Gebäudeautomatisierung					
 Referenz-EV	↓ Reduktionspotenzial	Aktuelle Marktdurchdringung	Marktdurchdringung 2040		
			MIN	MID	MAX
Heizung und Warmwasser: EEV	-20 %	20 %	50 %	60 %	75 %
Kleine Geräte, IKT, Beleuchtung	-10 %	20 %	50 %	60 %	75 %
Wichtige Technologien					
<ul style="list-style-type: none"> • Building Automation System (BAS) • Building Automation and Control System (BACS) • Energiemanagementsystem (EMS) • Sensoren, Aktuatoren und Microcontroller • Smart Meter • Internet of Things (IoT) 			<ul style="list-style-type: none"> • Apps • Data Analytics • Überwachungstechnologien • Digitaler Zwilling • Künstliche Intelligenz • Big Data • Cloud Computing 		
Wirkungskette					
Siehe Kapitel 3.4.2					
Rebound-Effekt					
Es wird angenommen, dass es zu 10 % an direkten Rebounds kommt.					
Weitere Informationen					
Marktdurchdringung bezieht sich auf den Anteil der Gebäude, der mit intelligenter Gebäudetechnik ausgestattet ist. Die Marktdurchdringung wurde an die Marktdurchdringung von Dienstleistungsgebäuden (Kapitel 3.4.2) angepasst. Für diese wurde die Marktdurchdringung mit den Stakeholdern besprochen.					
Relevante Quellen					
(IEA 2019a), (Accenture 2021)					

3.2 Verkehr

3.2.1 Überblick

Im Verkehrssektor werden Autos, Lastwagen, Flugzeuge, Schiffe, Züge und deren unterstützende Infrastruktur durch digitale Anwendungen intelligenter und vernetzter, dies wiederum kann die Sicherheit und Effizienz verbessern. Insgesamt könnte die Digitalisierung ihre größten Auswirkungen auf den Straßenverkehr haben, wo Konnektivität und Automatisierung (neben der weiteren Elektrifizierung) dramatische Folgen haben und die Mobilität neu gestalten können. Im Moment sind die Nettoauswirkungen auf den Energieverbrauch durch digitale Anwendungen unsicher. Unter einem Best-Case-Szenario mit verbesserter Effizienz durch Automatisierung und Mitfahrgelegenheiten könnte sich langfristig der Energieverbrauch deutlich reduzieren. Umgekehrt kann der Energieverbrauch durch Digitalisierung zunehmen, wenn Effizienzsteigerungen ausbleiben und Rebound-Effekte durch Automatisierung deutlich mehr Fahrten ergeben (IEA 2017).

Digitalisierungstechnologien im Verkehrssektor beinhalten: Einsatz von Sensoren für die Datensammlung; Einsatz von Kommunikationstechnologien zur Ermöglichung der Fernsteuerung; und Anwendung fortschrittlicher Analytik zur Verbesserung des Systembetriebs, der Sicherheit und Effizienz sowie zur Steigerung der Kostensenkungen. Alltägliche Beispiele sind Detektoren für den Straßenverkehr zur Steuerung von Ampeln, Radiofrequenz-Identifikation (RFID) zur automatischen Erhebung von Mautgebühren und die Nutzung von Global Positioning System (GPS) und Telekommunikation für die Pannenhilfe (IEA 2017). Laut IEA (2017) sind die drei Haupttrends der Digitalisierung in der Mobilität: Konnektivität, Shared Mobility und Automatisierung. Insgesamt schätzt die IEA (2019b), dass digitale Technologien die Energieeffizienz sowohl des Personen- als auch des Güterverkehrs um ca. 20 % bis 25 % verbessern können.

Tabelle 16: Mögliche Vorteile der Digitalisierung im Verkehr; Quelle: (IEA 2019b), Übersetzung AEA

Technologie	Beschreibung	Mögliche Vorteile
Straße: vernetzte und automatisierte Fahrzeuge	Vernetzte und automatisierte Fahrzeuge könnten zu einer Reduzierung der Energieintensität des Straßenverkehrs auf Fahrzeug-, Flotten- und Stadtsystem-Ebene beitragen. Jedoch können auch Rebound-Effekten als Folge von geringeren Reisekosten und neuen Nutzern und Nutzerinnen auftreten.	Energieeinsparungen auf Fahrzeugebene beinhalten Platooning (bis zu 25 %), umweltfreundliches Fahren (bis 20 %) und das „Right-Sizing“ von Fahrzeugen (20 % bis 45 %). (Versuche zeigen allerdings derzeit noch niedrigere Effekte und die derzeitige Entwicklung geht mehr in Richtung größere Fahrzeuge.)
Straße: Shared Mobility	Gemeinsame Nutzung von Fahrzeugen (z. B. Fahrräder, Roller, Autos) und Shared Mobility Services (z. B. Ride-Sourcing) könnten helfen, den Energieverbrauch zu senken, indem sie die Mobilität von Pkw auf weniger energieintensive Verkehrsmittel verlagern.	Carsharing könnte den Energieverbrauch von einzelnen Transportanwendungen um die Hälfte reduzieren. Gefahrene Distanzen, Energieverbrauch und CO ₂ -Emissionen im Jahr 2050 können rund ein Drittel niedriger sein, wenn Fahrzeuge geteilt werden und elektrisch und automatisiert sind

		– wobei hiervon ein Teil der Reduktion durch die Elektrifizierung kommt.
Straßengüterverkehr	Zu den digitalen Lösungen für den Straßengüterverkehr gehören: GPS gekoppelt mit Echtzeit-Verkehrsinformationen für die Routenoptimierung; Überwachung und Feedback an Bord für umweltfreundliches Fahren; Platooning für kraftstoffsparendes Fahren; und Datenaustausch zwischen Unternehmen entlang der Lieferkette, um Leerfahrten zu vermeiden und dadurch die Anzahl an Fahrten zu reduzieren.	Die Anwendung digitaler Lösungen für Lkw-Betrieb und Logistik könnte zu einem reduzierten Straßengüterverkehr und zu einer Energiereduktion von 20 % bis 25 % führen.
Schieneverkehr	Automatisierter Zugbetrieb (ATO), kommunikationsbasierte Zugsteuerung, Echtzeit-Fahrerberatung (DAS) und energieeffiziente Fahrpläne können den Energieverbrauch reduzieren, da diese Anwendungen zu einer Optimierung des Fahrverhaltens, Steigerung der Auslastung und Förderung des energieeffizienten Fahrens führen können.	ATO kann den Energieverbrauch um bis zu 20 % reduzieren, während das Potenzial von DAS für Energieeinsparungen bei ca. 5 % bis 20 % liegt. Energieeffiziente Zugfahrpläne können zu Energieeinsparungen von bis zu 35 % führen.

In der vorliegenden Analyse werden folgende Anwendungen nicht berücksichtigt:

- Drohnen im Flugmodus: da diese wahrscheinlich in den meisten Fällen negative Auswirkungen auf den Energieverbrauch im Vergleich zu elektrischen Fahrzeugen haben (siehe (Figliozzi M.A. 2018))
- Straßengebundene Lieferdrohnen: da die Änderung des Energieverbrauchs, im Vergleich mit elektrischen Lieferwägen, genauere Analysen der Anwendungssituation in Österreich erfordern würde

3.2.2 Autonomes Fahren

Autonome Fahrtechnologien zielen darauf ab, die Sicherheit und den Fahrkomfort durch fortschrittliche Sensorik und automatisierte Entscheidungsfindung zu erhöhen (IEA 2017). Dies kann in den letzten Graden dazu führen, dass eine menschliche Steuerung der Fahrzeuge nicht mehr notwendig ist. Fahrerassistenzsysteme (Stufe 1) oder teilautomatisiertes Fahren (Stufe 2) sind bereits seit einigen Jahren in Straßenfahrzeugen verfügbar. Seit wenigen Jahren gibt es Fahrzeuge mit Funktionen des hochautomatisierten Fahrens (Stufe 3) auf der Straße. In der vorliegenden Studie wird autonomes Fahren analysiert (Stufe 4: vollautomatisiertes Fahren – autonom in definierten Anwendungsfällen) sowie fahrerloses Fahren (Stufe 5: vollständig autonom vom Start bis zum Ziel auf allen Straßentypen, in allen Geschwindigkeitsbereichen und bei allen Umfeld- und Wettereinflüssen).

Autonomes Fahren wird durch ein komplexes Zusammenspiel unterschiedlicher Sensoren und Realtime-Datenverarbeitung ermöglicht. Die folgenden Sensoren spielen, laut FEEI (2021), dabei eine große Rolle: Videokameras für 360-Grad-Videos, Radarsensoren (Radio Direction and Ranging) und Sensoren auf LiDAR Basis (Light Detection and Ranging). Über die Daten von Sensoren und Kameras laufen dabei Mustererkennungen, die durch GPS-Daten und hinterlegte Kartendaten angereichert werden. Big Data, Machine Learning und Künstliche Intelligenz-Anwendungen sind für das autonome Fahren von großer Bedeutung.

Die möglichen positiven Wirkungen für den Energieverbrauch durch autonomes Fahren, laut Taiebat (2018), sind:

- optimierte Fahrzyklen¹¹
- optimierte Routenführung
- Reduktion von Kaltstarts
- reduzierte Leerlaufzeiten
- reduzierte Fluktuation der Geschwindigkeit
- Verringerung der Leistung des Antriebsstranges
- Selbstparkung
- durch erhöhte Sicherheit ermöglichter Fahrzeugleichtbau
- Platooning

Mögliche negative Wirkungen durch autonome Fahrzeuge auf den Energieverbrauch inkludieren laut Taiebat (2018): erhöhte Autobahngeschwindigkeiten, Strombedarf des IKT-Equipments und sonstigen Equipments oder Erhöhung des Luftwiderstands durch Aufbauten.

In der Studie „Digitalization and Energy“ geht die IEA (2017) davon aus, dass autonomes Fahren die höchsten Potenziale für die Reduktion des Energieverbrauchs im Vergleich zu anderen Digitalisierungsanwendungen hat.

Laut IEA (2019b) können durch autonomes Fahren Energieeinsparungen auf Fahrzeugebene durch Platooning (bis zu 25 %), umweltfreundliches Fahren (bis 20 %) und „Right-Sizing“ von Fahrzeugen (20 % bis 45 %) ¹² unterstützt werden.

Laut Agora (2020) haben autonome Pkws ein durchschnittliches Energieeffizienzpotenzial von 2 kWh pro 100 km. Dies entspricht ca. 10 % des Energieverbrauchs je km eines E-Pkws. Allerdings entsteht durch die notwendigen Komponenten ein zusätzlicher Energieverbrauch. Laut Agora (2020) macht dies im Jahr 2040 ca. 0,30 kWh pro

¹¹ Hierzu kann noch die Möglichkeit hinzugefügt werden, dass in 20 Jahren das Nachtfahrverbot für autonome Lkws eventuell abgewandelt werden könnte und somit bei geringerer Geschwindigkeit in der Nacht ein Teil der Lieferstrecke zurückgelegt wird.

¹² „Right Sizing“ und mögliche Antriebsverkleinerung und durch erhöhte Sicherheit ermöglichter Fahrzeugleichtbau sind in der vorliegenden Studie nicht in den Umwelteffekten enthalten.

100 km aus. Agora untersuchte in dieser Studie zusätzlich den Energieverbrauch durch autonomes Fahren im Telekommunikationsnetz und bei Rechenzentren.

In der vorliegenden Analyse wird vor allem auf die sehr ausführliche Studie von Fraunhofer ISI (2019) aus Deutschland zurückgegriffen, da diese alle Fahrzeugtypen individuell und detailliert auf deren Potenzial zur Autonomisierung in Deutschland untersucht. Es werden daraus die Marktdurchdringungsraten und die Reduktionspotenziale für Pkw, LNF, Lkw (N3) und Busse (M3) für Österreich im Jahr 2040 abgeleitet. Grundsätzlich wurden in der Studie von Fraunhofer ISI (2019) zwei Szenarien gebildet: Szenario 1 „Welt des Fahrzeugbesitzes“ und Szenario 2 „Welt der Mobilitätsdienstleister“ (weniger Privatbesitz). Die THG-/EEV-Reduktionspotenziale von Szenario 1 „Welt des Fahrzeugbesitzes“ für Deutschland sind in den nächsten Abbildungen wiedergegeben. In dieser Studie werden die primären Reduktionspotenziale in Abhängigkeit der Penetrationsrate von autonomen Fahrzeugen, der Fahrstrecke und des Verkehrsflusses für Pkw (Kleinwagen, Mittelklasse und Oberklasse), Schwere Nutzfahrzeuge (SNF), Leichte Nutzfahrzeuge (LNF) und Busse abgeschätzt. Dieses Szenario wird im Weiteren für die Analyse der Potenziale des autonomen Fahrens verwendet. Das Szenario für die Welt der Mobilitätsdienstleister wird hier nicht berücksichtigt, obwohl dies zu zusätzlichen EV-Reduktionen führen kann.

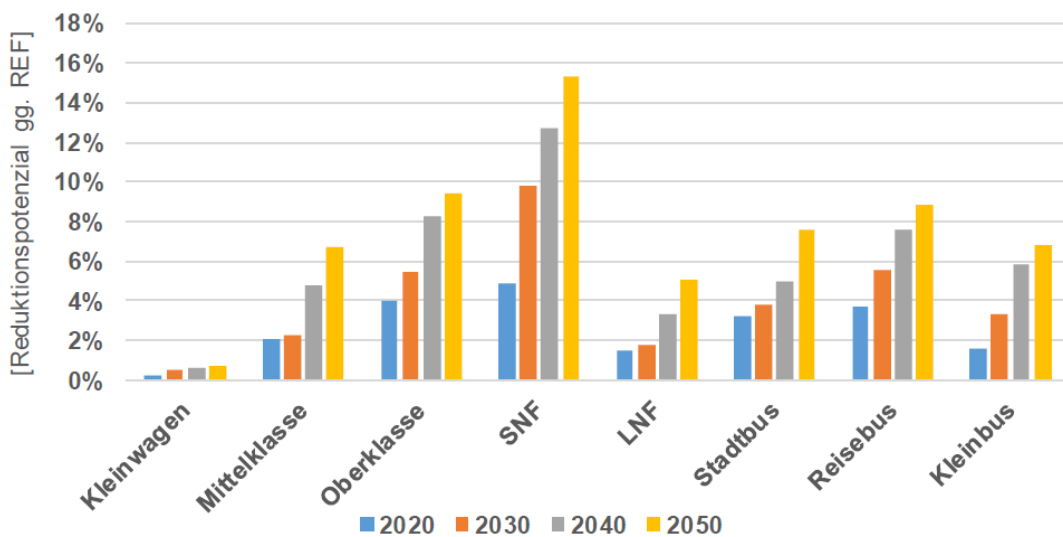


Abbildung 8: Primäre THG-/EEV-Reduktionspotenziale in Deutschland – Welt des Fahrzeugbesitzes; Quelle: (Fraunhofer ISI 2019)

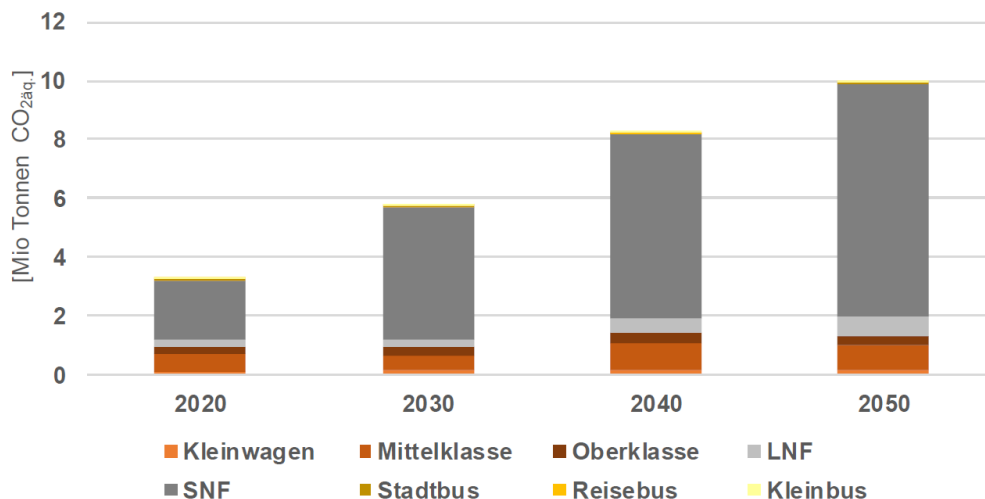




Abbildung 9: Primäres THG-Reduktionspotenzial für Deutschland – Welt des Fahrzeugbesitzes; Quelle: (Fraunhofer ISI 2019)

Tabelle 17: Annahmen für die Quantifizierung – Autonomes Fahren; Quelle: AEA

Autonomes Fahren					
 Referenz-EV	 Reduktions- potenzial	Aktuelle Marktdurch- dringung	Marktdurchdringung 2040		
			MIN	MID	MAX
Pkw – EEV Pkw	-10 %	0 %	0 %	8 %	16 %
Lkw (N3) – EEV Lkw (N3)	-17 %	0 %	0 %	35 %	70 %
Busse (M3) – EEV Busse	-15 %	0 %	0 %	21 %	42 %
Wichtige Technologien					
<ul style="list-style-type: none"> • Echtzeitdaten und Verkehrsanalysen • GPS (Onboard-Navi, Portables Navi) • Sensorik: Radar (SRR, MRR, LRR), Lidar, Multifunktionskamera, Ultraschallsensor • Sensor Fusion • Big Data • Künstliche Intelligenz • Autonomes Fahren 		<ul style="list-style-type: none"> • Fahrassistent: Adaptive Cruise Control (ACC), Predictive Cruise Control (PCC), Lane Keeping Assist (LKA), automatisiertes Eco-Driving (V2V), Parklenkassistent, Platooning, Highway Pilot, Traffic Jam Pilot • Car-to-Infrastructure Communication (C2I) • Car-to-Car Communication (C2C) • Drohnen 			
Wirkungskette					
Durch Platooning und umweltfreundliches Fahren im autonomen Modus kann Energie eingespart werden.					
Rebound-Effekt					
<ul style="list-style-type: none"> • Durch Attraktivierung des MIV kann eine Verschiebung von öffentlicher und aktiver Mobilität hin zum automatisierten Auto erwartet werden (Fraunhofer ISI 2019). Dies ist ein direkter Rebound und führt zu einer Zunahme der Pkw-Verkehrsleistung um 2 % im Vergleich zum Referenzszenario (Fraunhofer ISI 2019). (Reduktionen bei Bus, Schiene werden vernachlässigt.) • Durch autonome Lkw kommt es zu einer Verlagerung des Güterverkehrs von der Schiene auf die Straße. Laut (Fraunhofer ISI 2019) kann hierfür mit einer Fahrleistungszunahme bei Lkw um 2 % im Vergleich zum Referenzszenario gerechnet werden. • Mehr Komfort kann zu längeren Strecken führen (Fraunhofer ISI 2019) – dies wird als indirekter Rebound bewertet und im Weiteren nicht analysiert. • Mehr Zersiedelung (Fraunhofer ISI 2019): Dies ist ein systemischer Rebound und wird im Weiteren nicht betrachtet. 					
Weitere Informationen					
Reduktionspotenziale und Marktdurchdringung für Pkw, Lkw (N3) und Busse (M3) sind für 2040 aus der Studie (Fraunhofer ISI 2019) abgeleitet.					
Relevante Quellen					
(Fraunhofer ISI 2019), (Agora 2020), (IEA 2019b)					

3.2.3 Mobility-as-a-Service (MaaS), Shared Mobility und Ride-Sharing

Laut VCÖ (2020) ist das Potenzial für Sharing-Angebote groß, vor allem aufgrund der durchschnittlich geringen Nutzungszeiten für Pkw. Im Schnitt wird ein privater Pkw nur eine Stunde pro Tag genutzt. Entsprechend steigen die Angebote von Mobility-as-a-Service in Österreich (Die Presse 2021). In die weitere Entwicklung und Verwendung dieser Angebote werden große Erwartungen zur Verlagerung von motorisiertem Individualverkehr in Richtung öffentlicher Verkehr gesetzt (BMK 2021).

Grundsätzlich wird unter Mobility-as-a-Service (MaaS) die Integration von und Zugang zu verschiedenen Verkehrsmitteln sowie Dienstleistungen verstanden, z. B. öffentliche Verkehrsmittel, Mitfahrgelegenheiten, Car-Sharing, Bike-Sharing, Roller-Sharing, Taxi, Autovermietung und Ride-Hailing. Diese sollen gemeinsam mit aktiver Mobilität als Grundlage den individuellen Mobilitätsbedarf decken können (UITP 2019). MaaS-Plattformen sollen vor allem das Angebot an Shared Mobility vereinfachen und diese Dienste durch das Angebot einer einheitlichen Routing- und Zahlungsplattform ermöglichen (IEA 2017).¹³ In einer niederländischen Review-Studie (KiM 2018) wurde festgestellt, dass das Ausmaß, in dem MaaS übernommen wird, und Änderungen des Reiseverhaltens in der breiteren Bevölkerung ungewiss ist und weitere Analysen zur Quantifizierung der Effekte notwendig sind. Eine solche Analyse wird allerdings durch die Vielzahl an unterschiedlichen Angeboten erschwert.¹⁴

Da es in diesem Bereich noch keine konkreten Daten bzw. Analysen für die Effekte von MaaS auf Energieverbrauch und THG-Emissionen gibt, wurden Annahmen getroffen. Es wird unter anderem angenommen, dass 20 % der im Mobilitätsmasterplan (BMK 2021) geplanten Verlagerung des Personenverkehrs bis 2040 auf Mobility-as-a-Service-Angebote zurückgeführt werden können (im Max-Szenario). Dies entspricht ca. 4 Mrd. Pkm, um die der Pkw-Verkehr reduziert wird und die im ÖPNV-Verkehr hinzukommen.


Ride-Sharing-Plattformen sind eine zunehmend relevante Komponente in der Transportinfrastruktur. Ride-Sharing erlaubt ein Teilen der Autoreisekosten und reduziert den Energieverbrauch und die THG-Emissionen des Autoverkehrs durch eine erhöhte Belegung. Laut Accenture (2021) werden 3 % der gefahrenen Pkw-km in Deutschland unter Nutzung von Ride-Sharing-Apps gefahren. Bis 2030 wird in der Accenture-Studie mit einer Marktdurchdringung von 7 % bis 16 % und einem Reduktionspotential der gefahrenen Kilometer von 24 % gerechnet. In der vorliegenden Studie wird mit konservativeren Annahmen für Ride-Sharing¹⁵ gerechnet, nämlich mit einem Reduktionspotential der Fahrzeugkilometer von 10 %. Dies wird zusätzlich mit einer geringeren bzw. späteren Marktdurchdringung verknüpft.

¹³ Während Ride-Sharing laut Literatur zu einer Reduktion der gefahrenen Kilometer beiträgt, führt Car-Sharing hauptsächlich zu einer Reduktion in der Fahrzeugproduktion. Da die indirekten Effekte der Digitalisierung auf die Produktion in der vorliegenden Studie nicht betrachtet werden, wurde Car-Sharing hier vernachlässigt.

¹⁴ Das ITS Austria (2019) hat grundsätzliche Levels von MaaS-Angeboten definiert. Diese oder eine ähnliche Systematik kann bei zukünftigen Analysen hilfreich sein.

¹⁵ Die Accenture-Annahmen werden reduziert, nachdem in anderen Analysen die Accenture-Studie meist an der oberen Grenze der Einschätzungen der Literatur liegen.

Tabelle 18: Annahmen für die Quantifizierung – Mobility-as-a-Service (MaaS), Shared Mobility und Ride-Sharing; Quelle: AEA

Mobility-as-a-Service (MaaS), Shared Mobility und Ride-Sharing					
 Referenz-EV	↓ Reduktions- potenzial	Aktuelle Marktdurch- dringung	Marktdurchdringung 2040		
			MIN	MID	MAX
Verkehrsverlagerung ÖPNV: MIV (-), ÖPNV (+)	MIV -4 Mrd. Pkm ÖPNV +4 Mrd. Pkm	zus. Reduktion	25 %	50 %	100 %
Ride-Sharing	-10 % Fzgkm**	3 %*	5 %	10 %	20 %
Wichtige Technologien					
<ul style="list-style-type: none"> • MaaS-Dienstleistungen • Mobility-Plattformen • Digitale Fahrunterstützung • Echtzeit-Informationssysteme • Apps 		<ul style="list-style-type: none"> • Vernetzte intelligente Sensoren • Big Data / Künstliche Intelligenz • Flottenmanagement und optimierte Routen • Vehicle-Sharing, Ride-Sharing, Pointe-à-Pitre Vehicle Rental, Vehicle Pooling 			
Wirkungskette					
MaaS führt zu einer Verlagerung von MIV auf ÖPNV. Ride-Sharing führt zu einer Reduktion der Personenkilometer (Pkm) im Pkw-Bereich.					
Rebound-Effekt					
Für Mobility-as-a-Service und Ride-Sharing werden keine direkten Rebounds angenommen.					
Weitere Informationen					
* bezieht sich auf die Personenkilometer, die mit Pkw bzw. ÖPNV im Jahr 2040 zurückgelegt werden ** bezieht sich auf die Fahrzeugkilometer für den Pkw-Verkehr					
Relevante Quellen					
(BMK 2021), (Accenture 2021)					

3.2.4 Smart Logistics

Smart Logistics bedeutet die Optimierung der Logistikprozesse durch den umfassenden Einsatz von IKT und digitalisierten Anwendungen. Das Ziel von Smart Logistics ist die durchgängige Vernetzung des Informations- und Materialflusses, um Logistikprozesse effizienter planen, steuern und anpassen zu können (Kohnhauser V. 2017) (Industrie 4.0 2021). IKT-gestützte Lösungen wie fortschrittliche Datenanalyse, Telematik und Sensorik ermöglichen Logistikunternehmen, sowohl die Flexibilität als auch die Effizienz des Transports von Straßen-, Luft-, Bahn- und Seefracht zu erhöhen, indem die Disposition mit ganzen Flotten, einzelnen Fahrzeugen, Straßen, Ladeeinheiten oder auch spezifischen Produkten verbunden wird (GeSI 2015).

Die IEA (2019b) beschreibt, dass Energie durch folgende digitale Anwendungen eingespart werden kann: GPS-gekoppelte Echtzeit-Verkehrsinformation für die Routenoptimierung, digitale Überwachung und Feedback an Bord für umweltfreundliches Fahren, Platooning für kraftstoffsparendes Fahren und Datenaustausch zwischen Unternehmen entlang der Lieferkette, um Leerfahrten zu vermeiden und dadurch die Anzahl der Fahrten zu reduzieren. Laut IEA (2019b) können diese Anwendungen von digitalen Lösungen für Lkw-Betrieb und Logistik zu einem reduzierten Straßengüterverkehr und einer Energiereduktion von 20 % bis 25 % führen.

Laut Accenture (2021) können durch Routen- und Frachtoptimierung 39 % der Tonnenkilometer für den Gütertransport auf der Straße im Luft-, Zug- und Seeverkehr eingespart werden.

Bieser und Hilty (2018) unterscheiden zwischen Smart Logistics, dem verstärkten Teilen von existierenden Assets, und optimierter Verkehrskontrolle, um Routen zu optimieren. Laut (Bieser und Hilty 2018) können durch optimierte Verkehrskontrolle sowie Smart Logistics signifikante Mengen an THG-Emissionen in der Schweiz bis 2030 eingespart werden. Umgerechnet sind dies ca. 3 % bis 35 % der CO₂-Emissionen des Schweizer Verkehrs.¹⁶

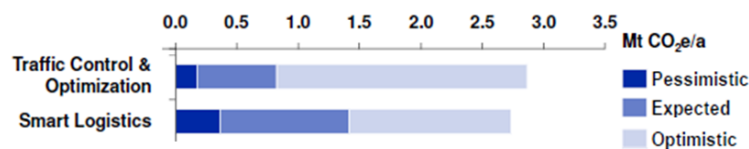




Abbildung 10: THG-Reduktionspotenzial in der Schweiz im Jahr 2030; Quelle: (Bieser und Hilty 2018), Anpassung AEA

¹⁶ Die CO₂-Emissionen des Verkehrs in der Schweiz betragen 2019 insgesamt 14,7 Mio. t CO₂-Äquivalent (exkl. Flugverkehr) (CH-BA Statistik 2021).

Tabelle 19: Annahmen für die Quantifizierung – Smart Logistics; Quelle: AEA

Smart Logistics					
 Referenz-EV	 Reduktions- potenzial	Aktuelle Marktdurch- dringung	Marktdurchdringung 2040		
			MIN	MID	MAX
Logistikoptimierung • EV Lkw	-20 % btkm*	4 %**	20 %	40 %	60 %
Wichtige Technologien					
<ul style="list-style-type: none"> Echtzeitdaten & Verkehrsanalysen Sensorik Big Data 		<ul style="list-style-type: none"> KI (Routen- und Frachtoptimierung) Digitale Lagerhäuser Physical Internet 			
Wirkungskette					
Routen- und Frachtoptimierung führt durch reduzierte Leerfahrten zu einer Reduktion der Bruttotonnenkilometer, dies verringert den Energieverbrauch vor allem bei Lkws (N3) auf der Straße.					
Rebound-Effekt					
Für Smart Logistics wird angenommen, dass es zu keinen signifikanten direkten Rebounds kommt.					
Weitere Informationen					
* in Bruttotonnenkilometer (btkm) ** Anteil der vollvernetzten Logistikunternehmen, die in der Lage sind, Routen- und Frachtoptimierung durchzuführen					
Relevante Quellen					
(IEA 2019b), (Bieser und Hilty 2018), (Accenture 2021)					


3.2.6 Automatisierter Schienengüterverkehr

Eine Verlagerung des Güterverkehrs auf die Schiene wird durch digitale Anwendungen unterstützt. Im Zugverkehr führt die automatisierte Betriebsverführung und automatisierte Kupplung zu einer Erhöhung der Kapazität auf existierenden Güterverkehrsstrecken. Bei automatisierter Betriebsführung/digitalen Zwillingen/Simulation erfolgt eine Realtime-Erfassung und -Verarbeitung von Zugdaten. Dadurch können Beschleunigungs- und Bremsvorgänge sowie Blockabstände optimiert werden. Durch automatisierte Kupplung können Züge schneller gekoppelt werden, und diese Zeitersparnis erhöht die Kapazität der existierenden Güterverkehrsstrecken im Vergleich zur derzeitigen Kapazität. Eine Nutzung dieser erhöhten Kapazitäten führt zu einem höheren Energiebedarf.

Laut Mobilitätsmasterplan (BMK 2021) soll sich das Güterverkehrsaufkommen auf der Straße bis 2040 stabilisieren und der Güterverkehr auf der Schiene von ca. 22 Mrd. Tonnenkilometer (tkm) (2018) auf 35 Mrd. tkm im Jahr 2040 zunehmen. Es wird angenommen, dass die Digitalisierungsanwendungen für ca. 50 % dieses Transportwachstums auf der Schiene notwendig sind.

Laut IEA (2019b) kann der Energieverbrauch mittels automatisierten Zugbetriebs (ATO) um bis zu 20 %, durch Echtzeit-Fahrerberatung (DAS) um 5 % bis 20 % und durch einen energieeffizienten Zugfahrplan um bis zu 35 % reduziert werden. Es wird angenommen, dass diese Reduktionspotenziale in Österreich insgesamt bei ca. 20 % liegen, da der österreichische Schienengüterverkehr bei der Transportleistung bereits im europäischen Spitzenfeld liegt (VCÖ 2018).

Tabelle 20: Annahmen für die Quantifizierung – Automatisierter Schienengüterverkehr; Quelle: AEA

Automatisierter Schienengüterverkehr					
 Referenz-EV	↓ Reduktions- potenzial	Aktuelle Marktdurch- dringung	Marktdurchdringung 2040		
			MIN	MID	MAX
Verlagerung: EV Lkw (-), EV Schiene (+)	Anteil Schiene +55 % x 50%*	26 %**	26 %	31 %	36 %
Energieverbrauchsreduktion durch ATO, DAS, EEff-Zugfahrplan	EV Zug je tkm -20 %	0 %	20 %	40 %	60 %
Wichtige Technologien					
<ul style="list-style-type: none"> • Digitale automatisierte Zugkupplung • Automatisierte Betriebsführung • Digitaler Zwilling/Simulation (Schiene) • Echtzeitdaten & Verkehrsanalysen • Sensorik 		<ul style="list-style-type: none"> • Big Data • KI (Routen- und Frachtoptimierung) • Digitale Lagerhäuser • Condition-Based/Predictive Maintenance 			
Wirkungskette					
Verkehrsverlagerung von der Straße auf die Schiene durch Attraktivierung des Schienenverkehrs Steigerung der Energieeffizienz durch ATO, DAS und EEff-Zugfahrpläne Logistikoptimierung führt zu einer Reduktion des Straßengüterverkehrs.					
Rebound-Effekt					
Für die Automatisierung des Schienengüterverkehrs werden keine direkten Rebounds angenommen.					
Weitere Informationen					
* Es wird angenommen, dass die Digitalisierungsanwendungen für ca. 50 % des Transportwachstums von 55 % laut Mobilitätsmasterplan, auf der Schiene notwendig sind. ** Das bezieht sich auf den Anteil der Transportleistung in Österreich (tkm) auf der Schiene im Vergleich zur Gesamttransportleistung (BMK 2021). Der Anteil der Verkehrsverlagerung, welcher auf Digitalisierungstechnologien zurückzuführen ist, wird auf 50 % geschätzt.					
Relevante Quellen					
(BMK 2021), (IEA 2019b)					

3.3 Haushalte

3.3.1 Überblick

Im Haushaltssektor liegt der Fokus der Analyse auf den möglichen Energieeinsparungen durch Digitalisierungsanwendungen in der Raumwärme und bei elektrischen Geräten sowie auf dem möglichen zukünftigen Stromverbrauch von Informations- und Kommunikationstechnologien. Laut IEA (2019b) sind durch Digitalisierung in Wohngebäuden Energieeinsparungen von bis zu 30 % möglich. Laut Analysen, welche im Rahmen dieser Studie durchgeführt wurden, sind für den IKT-Stromverbrauch im Haushaltssektor Einsparungen von bis zu 27 % realisierbar.

Folgende Anwendungen werden in der vorliegenden Analyse nicht berücksichtigt:

- Building Information Models (BIM) und thermische Simulation werden in der vorliegenden Studie nicht gesondert betrachtet. Der Grund hierfür ist, dass die Abgrenzung zu Effekten, welche nicht durch Digitalisierungsanwendungen hervorgerufen werden, auf der derzeitigen Datenbasis nicht möglich ist.¹⁷
- Mobile Robotik, Augmented oder Virtual Reality werden wegen der wahrscheinlich relativ geringen Gesamtwirkung auf Energieverbrauch und THG-Emissionen vernachlässigt.
- Lokale Strom- und Wärmeerzeugung sowie Smart Meter und Demand-Side-Management werden nicht analysiert, da diese konzeptionell dem Energiesektor sowie den Energietechnologien und nicht den Verbrauchssektoren bzw. Digitalisierungstechnologien zugeordnet werden. Dies betrifft auch Anwendungen im Rahmen von Bürgerenergiegemeinschaften oder Erneuerbare-Energien-Gemeinschaften.¹⁸

¹⁷ Informationen zu BIM und thermischer Simulation können u. a. in JRC (2019) und IEA (2019b) gefunden werden.

¹⁸ Auch zu diesem Thema können Informationen u. a. in JRC (2019) und IEA (2019b) gefunden werden.

3.3.2 Smart Home

Vernetzte und intelligente Verbraucher (und Erzeuger) steigern Energieeffizienz, Komfort und Sicherheit im Haushaltsbereich durch Optimierung und Automatisierung von Heizung, Kühlung, Beleuchtung und Beschattung. In IEA (2019a) wird beschrieben, dass durch die Digitalisierung in Wohngebäuden bei einer Reihe von Anwendungen Energie eingespart kann (siehe Tabelle 21). Reduktionen im Energieverbrauch können durch die genannten Anwendungen separat oder in Kombination erzielt werden. Durch eine Kombination relevanter Anwendungen kann eine Einsparung von bis zu 30 % erreicht werden.¹⁹

Tabelle 21: Möglichkeiten für Reduktionen durch digitale Anwendungen im Haushaltsbereich; Quelle: (IEA 2019a), (IEA 2019b)

Technologien	Vorteile	Reduktionsbereich in Haushalten
Smart Thermostats	Heizen und Kühlen können remote kontrolliert werden.	5 % bis 20 % des Heiz-/Kühlenergieverbrauchs
Smart Plugs	Reduziert die Leistung von Geräten, wenn diese nicht genutzt werden	1 % bis 5 % des Energieverbrauchs
Smart Zoning	Erlaubt einzelne Räume oder Zonen zu bestimmten Zeiten auf bestimmte Temperaturen zu heizen/kühlen	10 % des Heiz-/Kühlenergieverbrauchs
Smart Lighting	Stellt die Beleuchtung anhand der Anwesenheit von Personen oder des erforderlichen Lichtlevels ein	1 % bis 10 % des gesamten Energieverbrauchs
Smarte Fensterkontrolle	Kontrolliert Lichteinfall und optimierte Lüftung	10 % bis 20 % des Heiz-/Kühlenergieverbrauchs, zusätzliche Reduktion des Energiebedarfs für Beleuchtung
Energiemonitoringsystem	Liefert dem Nutzer Informationen über die Art und Höhe des Energieverbrauchs und gibt Empfehlungen oder Erinnerungen	4 % bis 7 % des gesamten Energieverbrauchs
Smartes Energiemanagementsystem	Gibt die Möglichkeit, den Energieverbrauch zu kontrollieren (auch ferngesteuert), und kann den Energieverbrauch auf Basis des Verhaltens von Personen optimieren	8 % bis 20 % des gesamten Energieverbrauchs
Smart Home	Kombination von Smart-Home-Technologien für Messung, Monitoring, Anzeige, Management, Kontrollautomation, Zonierung etc.	Bis zu 30 % des gesamten Energieverbrauchs

Weitere Quellen gehen von ähnlichen Größenordnungen der möglichen Energieeinsparung aus:



- LeanHeat, eine Firma aus Finnland, bietet smarte Gebäudekontrolle und Wartung basierend auf IoT und KI-Analysen an. Nach eigenen Angaben erreicht LeanHeat damit eine Reduktion des Energieverbrauchs um 10 % bis 20 % (JRC 2019).
- Die Firma BeeBryte bietet automatische Kontrolle von Heiz- und Kühlequipment basierend auf Wettervorhersagen, Anwesenheit, Nutzung und Energiepreisen. Das Unternehmen gibt an, dass durch Algo-

¹⁹ In der vorliegenden Analyse werden mögliche Effekte von Smart Homes hier dargestellt, während der Stromverbrauch dieser Geräte bei IKT erfasst wird. Der Grund hierfür ist, eine möglichst hohe Vergleichbarkeit des IKT-Stromverbrauchs mit anderen Quellen zu erreichen.

rithmen, Cloud Computing, IoT und Predictive Analytics Energieverbrauchsreduktionen von 40 % erreicht werden (JRC 2019). Nest, ein Hersteller von smarten Thermostaten, benennt die möglichen Reduktionen in der Stromrechnung mit 10 % bis 12 % für Heizung und 15 % für Kühlung (JRC 2019).

- Laut Accenture (2021) können in Wohngebäuden durch Gebäude- und Energiemanagement 12 % und durch Gebäudeautomatisierungssysteme 5 % des Energieverbrauchs eingespart werden.
- Stakeholder (FEEI 2021) bestätigten, dass 15 % bis 30 % an Heizenergie durch Gebäudeautomatisierung eingespart werden können. In Wohngebäuden liegt das Potenzial laut Aussagen bei ca. 20 %.

Tabelle 22: Annahmen für die Quantifizierung – Smart Home; Quelle: AEA

Smart Home					
 Referenz-EV	 Reduktions- potenzial	Aktuelle Marktdurch- dringung	Marktdurchdringung 2040		
			MIN	MID	MAX
Heizung und Warmwasser: EEV	-20 % EEV	15 %*	40 %	50 %	60 %
Geräte, IKT, Beleuchtung	-5 % EEV	15 %*	40 %	50 %	60 %
Wichtige Technologien					
<ul style="list-style-type: none"> • Intelligente Thermostate • Individuelle Raumregulierung • Internet of Things • Smart Meter • IKT-Plattformen, Apps • Data Analytics/KISimulation 			<ul style="list-style-type: none"> • Alarmmanagement & Automatisierung • IoT • Predictive Control inkl. Wetterdatenvorhersage • Smart Plugs, Smart Lighting • Energiemanagement • Smart Home 		
Wirkungskette					
Optimierte intelligente Steuerung führt zu Energieeinsparungen.					
Rebound-Effekt					
<p>Die direkten Rebound-Effekte für Raumwärmenutzung werden mit 30 % abgeschätzt. Laut dem deutschen Umweltbundesamt (UBA DE 2019) können durch Energieeffizienzmaßnahmen direkte Rebounds von 10 % bis 30 % entstehen. Es wird angenommen, dass durch die Komplexität von Smart-Home-Systemen die Rebounds am oberen Ende dieser Einschätzung liegen.</p> <p>Bei Beleuchtung, IKT und anderen Geräten wird mit einem direkten Rebound im Ausmaß von 30 % gerechnet. Laut deutschem Umweltbundesamt (UBA DE 2019) kann bei Beleuchtung von einem direkten Rebound von 20 % ausgegangen werden. Es wird angenommen, dass dies bei digitalen Technologien höher liegt.</p>					
Weitere Informationen					
* Marktdurchdringung bezieht sich auf den Mittelwert der folgenden Technologien: smarte Thermostate, intelligente Lichtsysteme, und vernetzte Heizung, Lüftung, Klimatechnik.					
Relevante Quellen					
(IEA 2019a), (JRC 2019), (Accenture 2021), (UBA DE 2019)					

3.3.3 IKT-Nutzung

Informations- und Kommunikationstechnologien wie Computer, Fernsehgeräte, Telekommunikationsgeräte etc. verbrauchten im Jahr 2020 ca. 1,8 TWh an Strom, dies entspricht 10 % des Stromverbrauchs im Haushaltsbereich (Statistik Austria 2021). Die Frage, wie sich dies in Zukunft entwickeln kann, ist im Kontext der Analyse des Energieverbrauchs und der THG-Emissionen, welche durch Digitalisierung verursacht werden, relevant.

Die nachfolgende Untersuchung für den IKT-Verbrauch im Haushaltssektor baut stark auf der detaillierten Studie „Entwicklung des IKT-bedingten Strombedarfs in Deutschland“ von Fraunhofer IZM (2015) auf. Diese Studie beschreibt u. a. detaillierte Prognosen für den IKT-bedingten Strombedarf im Haushaltssektor, und zwar für 33 Geräte in acht Kategorien (siehe Tabelle 23).

Tabelle 23: IKT in Haushalten – Kategorien und Geräte; einige dieser Geräte sind zwar bereits heute nicht mehr relevant, es wird allerdings angenommen, dass der entsprechend berechnete Energieverbrauch durch andere in Zukunft verwendete Geräte ersetzt wird; Quelle: Fraunhofer IZM (2015)

		Kategorien							
		Computer	Monitore	Computerperipherie	Telekommunikation	Fernseher	Fernsehperipherie	Audio	Sonstiges
Geräte	Desk-top PC	Monitore	Drucker	Smartphone	LCD < 20"	Spielekonsolen	MP3-Player	Kompaktkameras digital	
	Notebook		Flachbett-MFD	Mobiltelefon	LCD 20–29"	Set-Top-Boxen	Lautsprecher-Boxen	Camcorder digital	
	Tablet PC		Scanner	DECT-Telefon	LCD 30–39"	Beamer/Projektoren	Radio-Rekorder		
			Telefax- und Kombigeräte	Router	LCD 40–49"	Blu-Ray-Player	Docking-Lautsprecher		
					LCD 50–59"	DVD-Player/-Recorder	Hi-Fi-Anlage		
					LCD > 60"	VHS-Video			
					CRT				

Für jedes Gerät wurden in der Fraunhofer-Studie die Anzahl der Geräte in Deutschland, die Leistung im Betrieb und im Stand-by-Modus sowie die Betriebszeiten für die Jahre 2010, 2015, 2020 und 2025 abgeschätzt. Für die hier vorliegende Studie wurden die Leistungen und Betriebszeiten für diese Jahre übernommen und die Anzahl der Geräte in Österreich mittels errechneter Faktoren abgeleitet. Die Methodik wurde in einem separaten Bericht für dieses Projekt (AEA 2021) im Detail für das Jahr 2020 beschrieben. Für den Zeitraum von 2025 bis 2040 wurde angenommen, dass weitere Netto-Reduktionen des Energieverbrauchs für den gesamten IKT-Stromverbrauch im Haushaltssektor von 1 % pro Jahr möglich sind.

Zu dem klassischen IKT-Verbrauch in Haushalten wird der Energieverbrauch von intelligenten Messsystemen und Energiemanagementsystemen (EMS) hinzugerechnet. Hierfür werden wiederum für 2010 bis 2025 die Daten von Deutschland und Österreich abgeleitet. Der Energieverbrauch wird danach für den Zeitraum von 2025 bis 2040 allerdings mit einer Steigerung von 1 % pro Jahr prognostiziert. Hiervon werden 80 % dem Haushaltssektor und 20 % dem Dienstleistungssektor (vereinfacht) zugeordnet. Die auf Grundlage dieser Methoden errechneten IKT-Stromverbräuche für die Jahre 2020, 2025, 2030, 2035 und 2040 sind in Abbildung 11 dargestellt.

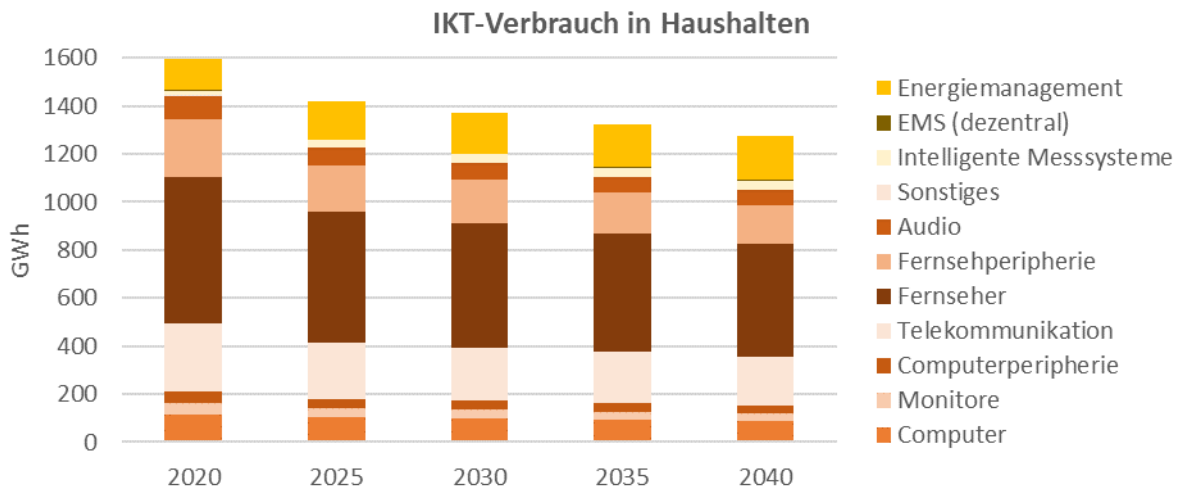


Abbildung 11: IKT-Energieverbrauch in Haushalten in Österreich; Quelle: AEA, Berechnungen auf Basis von (Fraunhofer-IZM 2015)

Die oben beschriebene Methodik entspricht anscheinend einem maximalen Szenario für Energieeinsparung im IKT-Bereich, da die Prognosen der Fraunhofer-Studie für das Jahr 2020 niedrigere Energieverbräuche für IKT beinhalten als deutsche statistische Analysen. Insgesamt führen die Fraunhofer-Prognosen zu dem Ergebnis, dass der Energieverbrauch für IKT im Haushaltsbereich in Deutschland durch energieeffizientere IKT-Geräte von 29 TWh im Jahr 2010 auf 15 TWh im Jahr 2020 sinken kann. Statistische Analysen für diesen Zeitraum in Deutschland (AGEB 2021) zeigen allerdings eine niedrigere Basis im Jahr 2010 von 25 TWh mit geringeren Reduktion des Energieverbrauchs bis 2020 auf 21 TWh.²⁰ Statistische Analysen in Österreich beschreiben für den IKT-Energieverbrauch im Haushaltssektor ebenfalls eine geringe Entwicklung von 1,82 TWh auf 1,75 TWh im Zeitraum 2010 bis 2020. Auf dieser Grundlage lässt sich für ein minimales Szenario abschätzen, dass der IKT-Energieverbrauch im Haushaltssektor auch in Zukunft weitgehend stabil bleiben kann. Abbildung 12 illustriert die drei angenommenen Szenarien (Min, Mid und Max) für den IKT-Stromverbrauch im Haushaltssektor für Österreich.²¹

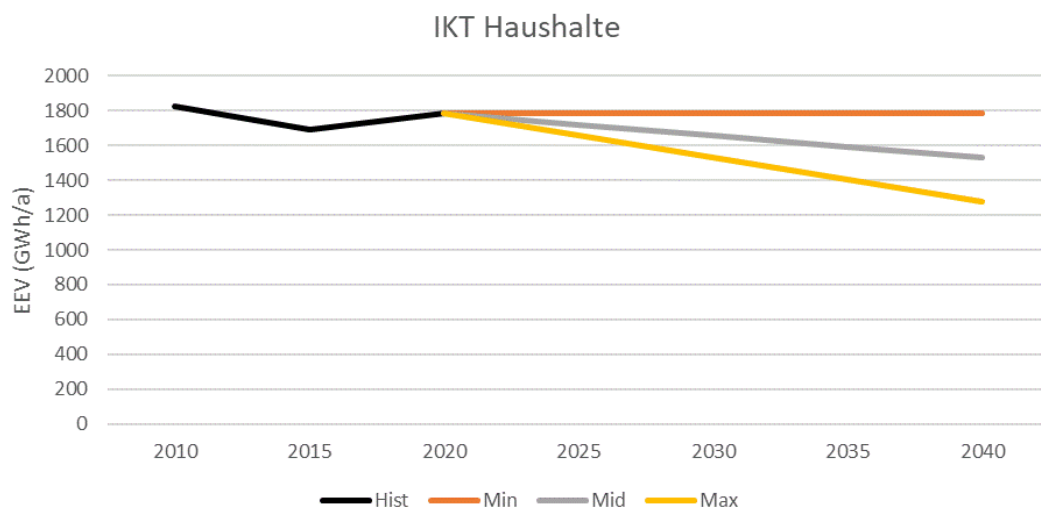


Abbildung 12: IKT-Stromverbrauch Haushalte – Szenarien; Quelle: AEA

²⁰ Es wird angenommen, dass die in der Fraunhofer-Studie angenommenen Energieeffizienzpotenziale allerdings in Zukunft vorhanden sind und dass der Grund für die Abweichung zwischen Prognose und Statistik ein langsamerer Austausch mit energieeffizienteren Geräten ist.

²¹ In der IKT-Nutzung im Haushaltsbereich ist implizit der Energieverbrauch von Streaming und Gaming der Endgeräte berücksichtigt.

Tabelle 24: Annahmen für die Quantifizierung – IKT-Nutzung; Quelle: AEA

IKT-Nutzung					
 Referenz-EV	 Reduktions- potenzial	Aktuelle Marktdurch- dringung	Marktdurchdringung 2040		
			MIN	MID	MAX
IKT-Verbrauch im Haushaltssektor	-28 %	Zus. Reduktion Basis 2020	0 %	50 %	100 %
Wichtige Technologien					
<ul style="list-style-type: none"> • Computer • Monitore • Computerperipherie • Telekommunikation • Fernseher 		<ul style="list-style-type: none"> • Fernsehperipherie • Audio • Energiemanagement • Intelligente Messsysteme 			
Wirkungskette					
Durch effizientere Geräte kommt es zu einer Reduktion des Energieverbrauchs. Die steigende Anzahl an Geräten durch Bevölkerungswachstum und eine erhöhte Anzahl an Geräten je Haushalt jedoch wirken den Energieverbrauchsreduktionen durch effizientere Geräten entgegen.					
Rebound-Effekt					
Es wird angenommen, dass etwaige Rebounds bereits inkludiert sind.					
Weitere Informationen					
Fraunhofer IZM (2015) abgeleitet von DE auf AT von 2010 auf 2025 – Trends 2030–2040 Detailanalyse für das Jahr 2020 in Deliverable 2.1 dieses Projektes (AEA 2021)					
Relevante Quellen					
(Fraunhofer-IZM 2015), (AEA 2021)					

3.4 Dienstleistung

3.4.1 Überblick

Der Dienstleistungssektor umfasst eigenständige Dienstleistungsunternehmen (inklusive Handelsunternehmen) sowie staatliche oder öffentliche Einrichtungen. Die Breite an Dienstleistungen spiegelt sich auch in der diversen Anzahl an digitalen Anwendungen wider, die in diesem Sektor genutzt werden:

- Gebäudeautomatisierung
- Homeoffice und Tele-Conferencing
- E-Commerce
- E-Health, E-Learning, E-Banking, E-Governance
- IKT am Arbeitsplatz
- Rechenzentren
- Telekommunikationsinfrastruktur

Für Gebäudeautomatisierung werden die möglichen Einsparungen auf den Energieverbrauch in Dienstleistungsgebäuden analysiert. Für Homeoffice, Tele-Conferencing, E-Commerce sowie E-Health, E-Learning, E-Banking und E-Governance werden hingegen die Effekte dieser Anwendungen auf den Verkehrssektor betrachtet. Für IKT am Arbeitsplatz wird abgeschätzt, wie sich der Energieverbrauch durch Computer und anderes IKT-Equipment am Arbeitsplatz entwickelt.

Rechenzentren und Telekommunikationsinfrastruktur sind die notwendige Backbone-Infrastruktur für die meisten Digitalisierungsanwendungen. Durch zunehmende Digitalisierung nimmt die Datenmenge deutlich zu. Dieser Effekt auf Rechenzentren und Telekommunikation wird im Folgenden separat untersucht. Nicht separat berücksichtigte Anwendungen sind unter anderem Blockchain, Kryptowährungen, AI im Dienstleistungssektor sowie mobile Roboter.

3.4.2 Gebäudeautomatisierung

Vernetzte und automatisierte Gebäude nutzen digitale Technologien zur Überwachung, Analyse, Steuerung, Automatisierung und Optimierung von Gebäudeleittechniksystemen wie Heizung, Lüftung, Klimaanlage, Beleuchtung.

In IEA (2019a) wurden folgende Möglichkeiten für die Reduktion des Energieverbrauchs durch digitale Anwendungen für kommerzielle und öffentliche Gebäude identifiziert: Smart Plugs, Smart Lighting, anwesenheitsbasierte Wireless-Thermostate, smarte Verschattung und smarte Fenster, Heizungs-, Lüftungs- und Klimakontrolle sowie smarte Energiemanagementsysteme.

Tabelle 25: Möglichkeiten für die Reduktion des Energieverbrauchs durch digitale Anwendungen in kommerziellen und öffentlichen Gebäuden; Quelle: (IEA 2019a)



Technologien	Vorteile	Reduktionsbereich in Gebäuden
Smart Plugs	Reduziert die Leistung von Geräten, wenn diese nicht genutzt werden	25 % bis 60 % des Energieverbrauchs von Geräten
Smart Lighting	Stellt die Beleuchtung anhand der Anwesenheit von Personen oder des erforderlichen Lichtlevels ein	Bis zu 45 % des Energieverbrauchs für Beleuchtung
Anwesenheitsbasierte Wireless-Thermostate	Stellt Heizung und Kühlung anhand der Anwesenheit von Personen ein	5 % bis 10 % der Heiz- und Kühlenergie
Smarte Verschattung und smarte Fenster	Reduziert Wärme oder Blendung und erlaubt eine optimale Nutzung der Beleuchtung	19 % bis 26 % der Kühlenergie 48 % bis 67 % des Energieverbrauchs für Beleuchtung
Heizungs-, Lüftungs-, Klimakontrolle	Stellt Heizung, Lüftung und Klimaanlage anhand der Temperatur und Anwesenheit von Personen ein	24 % bis 32 % des Heizungs-, Lüftungs-, Kühlungs-Energieverbrauchs
Smartes Energiemanagementsystem	Sammelt Daten des Endverbrauchs, stellt Informationen für Building Manager bereit und ermöglicht Automatisierung	13 % bis 66 % des gesamten Energieverbrauchs, im Durchschnitt 23 %

Weitere Quellen bestätigen die Reduktionsbereiche in Gebäuden:

- JRC (2019) beschreibt, dass in der EU Optimierungen von technischen Gebäudesystemen (ohne Heizkesseltausch) zu durchschnittlichen Energiereduktionen von 30 % (im Bereich 14 % bis 49 %) führen können. Diese Optimierungen können schnell erfolgen, Austauschraten von 3 % bis 4 % (ca. dreimal höher als die derzeitigen Renovierungsraten) pro Jahr sind möglich.
- Laut Accenture (2021) können in kommerziellen und öffentlichen Gebäuden durch Gebäude- und Energiemanagement 18 % des Energieverbrauchs und durch Gebäudeautomatisierungssysteme 28 % des Energieverbrauchs eingespart werden.

- Stakeholder (FEEI 2021) bestätigten, dass 15 % bis 30 % an Heizenergie durch Gebäudeautomatisierung in Österreich eingespart werden können. In kommerziellen und öffentlichen Gebäuden liegt das Potenzial laut den Stakeholdern an der oberen Grenze, nämlich in der Nähe von 30 %.

Tabelle 26: Annahmen für die Quantifizierung – Gebäudeautomatisierung; Quelle: AEA

Gebäudeautomatisierung					
 Referenz-EV	 Reduktions- potenzial	Aktuelle Marktdurch- dringung	Marktdurchdringung 2040		
			MIN	MID	MAX
Gebäudeautomatisierung – Heizung und Warmwasser: EEV	-30 % EEV	20 %	50 %	60 %	75 %
Gebäudeautomatisierung – kleine Geräte, IKT, Beleuchtung	-10 % EEV	20 %	50 %	60 %	75 %
Wichtige Technologien					
<ul style="list-style-type: none"> • Building Automation System (BAS) • Building Automation and Control System (BACS) • Energiemanagementsystem (EMS) • Sensoren, Aktuatoren und Microcontroller • Smart Meter • Internet of Things (IoT) 		<ul style="list-style-type: none"> • Apps • Data Analytics • Digitaler Zwilling • Künstliche Intelligenz • Big Data • Cloud Computing 			
Wirkungskette					
Optimierte intelligente Steuerung führt zu Energieeinsparungen.					
Rebound-Effekt					
Es wird angenommen, dass es durch Gebäudeautomatisierung bei Dienstleistungsgebäuden zu 10 % an direkten Rebounds kommt.					
Weitere Informationen					
Marktdurchdringung bezieht sich auf den Anteil der Gebäude, der mit intelligenter Gebäudetechnik ausgestattet ist.					
Relevante Quellen					
(IEA 2019a), (JRC 2019), (Accenture 2021)					

3.4.3 Homeoffice, Telework und Tele-Conferencing

Digitale Technologien ermöglichen es Angestellten, unabhängig vom Standort zu arbeiten, womit regelmäßige Pendelwege und Dienstreisen mit Pkw und Flugzeug durch virtuelle Meetings und Kommunikationsplattformen substituiert werden können.

Homeoffice, eine Sonderform der Telearbeit, bezeichnet die Arbeit am eigenen Wohnstandort. Im April 2020, während des Höhepunkts der österreichischen Ausgangsbeschränkungen aufgrund der Covid-19-Pandemie, waren 42 % der Beschäftigten zumindest teilweise im Homeoffice aktiv (UBA AT 2020). Langfristig kann für die Nutzung von Homeoffice, laut der PoviMob-Studie des UBA (2020), damit gerechnet werden, dass für 39,3 % aller Erwerbstätigen Homeoffice dauerhaft oder temporär möglich ist. Wenn ein Viertel aller Erwerbstätigen in Österreich 40 % der Arbeitszeit (oder zwei von fünf Arbeitstagen) im Homeoffice arbeiten kann, können laut der PoviMob-Studie rund 300 bis 470 kt CO₂-Äquivalent pro Jahr eingespart werden. Umgerechnet²² auf den Energieverbrauch bzw. die gefahrenen km im motorisierten Individualverkehr ist dies eine Reduktion um 2,0 % bis 3,2 %. In Accenture (2021) wurde angenommen, dass durch mobiles Arbeiten bis 2030 eine Reduktion des Platzbedarfs in Bürogebäuden um 13 % herbeigeführt werden kann und damit THG-Einsparungen von 5 % bis 6 % erreicht werden können.

Die Wirkungsmodellierung für Tele-Conferencing in der PoviMob-Studie (UBA AT 2020) beschreibt, dass 31 % der 7,7 Millionen Geschäftsreisen (2017) in den virtuellen Raum verlegt werden können.²³ Diese Einsparungen bei Pkw, Flugzeug, Bahn und sonstigen Verkehrsmitteln werden in der PoviMob-Studie sowohl für internationale als auch nationale Dienstreisen mit dem Flugzeug angegeben.²⁴ Internationale Flugreisen werden in der vorliegenden Studie aufgrund von Bilanzgrenzen nur für den Energieverbrauch allerdings nicht für die THG-Emissionen betrachtet. Die Inlandsflüge, die für Geschäftsreisen erforderlich sind, werden sowohl für Energieverbrauchs- als auch für THG-Reduktionen berücksichtigt. Mittels Pkws wurden 3,8 Mio. Geschäftsreisen mit einer durchschnittlichen Fahrstrecke von 200 km durchgeführt. Das ergibt insgesamt 760 Mio. Pkw-km und entspricht ca. 1,4 % der zurückgelegten km im MIV²⁵. Diese Geschäftsreisen mittels Pkw verursachen gesamt ca. 210 kt CO₂-Äquivalent. Eine Einsparung von 31 % der Geschäftsreisen mit Pkw ergibt 65 kt CO₂-Äquivalent.

Laut (UBA AT 2020) wurden im Jahr 2017 ca. 220.000 Dienstreisen mittels Inlandsflügen durchgeführt. Dies entspricht ca. 25 % aller nationaler Flugreisen^{26, 27}. Für die Berechnung der Energie- und THG-Emissionseinsparungen wird ein vereinfachter Ansatz gewählt: Die Einsparung von 31 % der Dienstreisen wird mit dem angenommenen Anteil der Dienstreisen am inländischen Flugverkehr (25 %) multipliziert. Das Ergebnis (8 %) wird als Faktor für die Energieverbrauchs- und THG-Reduktion für nationale Dienstreisen mit dem Flugzeug angesetzt.

²² Laut Klimaschutzbericht (UBA 2021) lagen die Emissionen des Personenverkehrs im Jahr 2019 bei 14.911 kt CO₂-Äquivalent.

²³ Laut Österreichischem ReiseVerband (ÖRV) wurden im Jahr 2018 3,3 Mio. Geschäftsreisen unternommen, hiervon 45 % ins Ausland und 55 % im Inland. Der unterschied in den Quellen konnte im Rahmen dieser Studie nicht aufgeklärt werden.

²⁴ Laut (UBA AT 2020) werden die THG-Einsparungen gesamt auf 700 kt CO₂-Äquivalent pro Jahr in der Studie beziffert. Auf den internationalen Flugverkehr entfallen hiervon 600 kt CO₂-Äquivalent. Dies scheint auf Grundlage des Klimaschutzberichtes (UBA 2021) als nicht plausibel. In diesem werden die THG-Einsparungen für 2018 für den internationalen Flugverkehr gesamt auf 2,6 Mio. t CO₂-Äquivalent beziffert. Eine Einsparung von 600 kt CO₂-Äquivalent entspräche einer Reduktion von 23 %. Die 1,8 Mio. internationalen Geschäftsreisen mit dem Flugzeug machen allerdings nur insgesamt (ohne Reduktion) ca. 7 % aller österreichischen Passagiere aus (OERV 2018).



²⁵ „Hochgerechnet auf ein gesamtes Jahr ergibt sich eine Jahresverkehrsleistung der Österreicherinnen und Österreicher ab 6 Jahren von rund 104 Milliarden Kilometern bei 7,5 Milliarden Wegen, für die in Summe 3,3 Milliarden Stunden benötigt werden. 55 Milliarden Kilometer werden mit dem MIV als Lenker:in, weitere 22 Milliarden Kilometer als Mitfahrer:in zurückgelegt.“ (ÖU 2016)

²⁶ Von den Flughäfen, ohne Wien, wurden ca. 4,7 Mio. Passagiere befördert. Bei der Annahme, dass es sich hierbei bei 25 % um inländische Flugreisende handelt, wurden also ca. 1,2 Mio. nationale Flugreisen durchgeführt (OERV 2018).

²⁷ Diese 223.000 Inlandsflüge, bei durchschnittlichen Wegelängen von 300 km und durchschnittlichen Emissionsfaktoren von 820 g/Pkm, verursachen 55 kt CO₂-Äquivalent. Laut Klimaschutzbericht (UBA 2021) verursachte der nationale Flugverkehr insgesamt (für Urlaubs- und Dienstreisen) Emissionen von ca. 50 kt CO₂-Äquivalent. Diese Unstimmigkeiten konnten im Rahmen der Studie nicht gelöst werden. Aus diesem Grund wurde ein vereinfachter Lösungsansatz gewählt.

Im Jahr 2018 wurden in Österreich insgesamt 32 Mio. Passagiere im Flugzeug befördert, ca. 30 Mio. davon in Auslandsflügen. Eine Reduktion der ca. 1,8 Mio. internationalen Dienstreisen via Flugzeug um 31 % entspricht ca. 0,6 Mio. Auslandsflügen, dies wiederum sind ca. 2 % aller internationalen Flugreisen.

Tabelle 27: Annahmen für die Quantifizierung – Homeoffice und mobiles Arbeiten; Quelle: AEA

Homeoffice und mobiles Arbeiten					
 Referenz-EV	 Reduktionspotenzial	Aktuelle Marktdurchdringung	Marktdurchdringung 2040		
			MIN	MID	MAX
Homeoffice – Reduktion gefahrene km	-3,2 %		30 %	65 %	100 %
Homeoffice – Bürofläche pro Angestellten	-10 %		10 %	25 %	40 %
Homeoffice – HH EV Beleuchtung & EDV	20 %		30 %	65 %	100 %
Tele-Conferencing: Dienstreise – Pkw	-1 %	zus. Reduktion*	30 %	65 %	100 %
Tele-Conferencing: Dienstreise – Inlandsflüge Anzahl	-8 %		30 %	65 %	100 %
Tele-Conferencing: Dienstreise – Auslandsflüge Anzahl	-2 %		30 %	65 %	100 %
Wichtige Technologien					
<ul style="list-style-type: none"> • Cloud-basierte Plattformen • Telekommunikationsplattformen • Videokonferenzen • Augmented Reality & Virtual Reality • Voice over IP (VoIP) 					
Wirkungskette					
Homeoffice führt zu einer Verringerung des Berufsverkehrs. Tele-Conferencing führt zu einer geringen Anzahl an Dienstreisen mittels Pkw und Flugzeug. Beides reduziert den Energieverbrauch und die THG-Emissionen.					
Rebound-Effekt					
Größere Distanz zwischen Wohnort und Arbeitsstätte sowie zunehmende Wohnflächen und eventuell steigender Konsum sind strukturelle bzw. systemische Rebounds und werden aus diesem Grund in der vorliegenden Analyse nicht weiter betrachtet. In einer Studie für die flämische Regierung wurden diese Rebounds mit 73 % beziffert (Delays 2013). Für Tele-Conferencing werden keine direkten Rebounds angenommen (siehe auch (UBA AT 2020)).					
Weitere Informationen					
* Das Reduktionspotenzial wird in den Szenarien vereinfacht mit der Marktdurchdringung 2040 berechnet.					
Relevante Quellen					
(UBA AT 2020), (OERV 2018), (UBA 2021)					

3.4.4 E-Commerce

Im Jahr 2021 nutzten, laut KMU Forschung Austria (2021), 75 % der Österreicher:innen das Internet- und den Versandhandel für Einkäufe. Insgesamt wurden dabei Waren im Wert von 10,4 Mrd. EUR (14 % der Einzelhandelsausgaben) bestellt. In den Jahren 2020 und 2021 nahm die Anzahl der Nutzer:innen des Distanzhandels Covid-bedingt um 12 % zu. Die damit verbundenen Einzelhandelsausgaben stiegen um 27 % an. Laut Branchenradar (2021) wurden im Jahr 2020 ca. 290 Mio. Pakete von KEP-Diensten (Kurier, Express und Post) transportiert.²⁸ Im Jahr 2014 wurden hingegen, laut (BMVIT 2015), nur ca. 115 Mio. Pakete zugestellt. Dies ist ein Wachstum innerhalb von sechs Jahren von 150 %, was einem durchschnittlichen Wachstum von 17 % p. a. entspricht.

Zwei relevante Studien, welche die Effekte von E-Commerce auf THG-Emissionen in Österreich untersucht haben, sind die eComTraf-Studie (BMVIT 2015) mit Szenarien bis 2020 und die PoviMob-Studie mit Szenarien bis 2050 (UBA AT 2020). In beiden Studien wird die Reduktion des Verkehrs für den stationären Einkauf anhand von Marktentwicklungen im KEP-Bereich abgeschätzt. Diese Reduktion der Einkaufsfahrten wird mit der Erhöhung der Zustellungsfahrten von Waren verglichen, welche im Business-to-Consumer (B2C) und Consumer-to-Consumer (C2C) Bereich (inklusive Retourfahrten) im Hauptlauf und in der Verteilung anfallen. Laut BMVIT (2015) lassen sich die Ergebnisse je Onlineeinkauf wie folgt zusammenfassen:

- Verkehrsleistungsänderung der Kunden und Kundinnen durch Onlineeinkauf: \emptyset -7,2 km
- Verkehrsleistungsänderungen KEP-Dienstleister je Paket (Hauptlauf & Zustellung): \emptyset +1,2 km

Hierfür wurden in der eComTraf-Studie (BMVIT 2015) mehrere Faktoren berücksichtigt. Für das Verkehrsverhalten der Kunden und Kundinnen:

- Kompletter Ersatz eines stationären Einkaufs durch einen Onlineeinkauf
- Art der Zustellung/Abholung (zu Hause, Arbeit, Nachbar, Abholstation, Geschäft ...)
- Verkehrsverhalten beim stationären Einkauf (Verbinden mehrerer Einkäufe, Verbinden unterschiedlicher Wegzwecke, Verkehrsmittelwahl, durchschnittliche Wegelänge)
- Induzierung neuer Einkäufe durch E-Commerce
- Einkaufsbündelung stationär versus online

Für die Zustellung durch KEP-Dienstleister:

- Aktuelle und maximal mögliche Auslastung der Zustellfahrzeuge
- Aktuelle und maximal mögliche Anzahl der Stopps pro Tour
- Durchschnittlich gefahrene Kilometer pro Stopp in Abhängigkeit der Auslastung der Fahrzeuge
- Anzahl der Pakete pro Stopp
- Aktuelle und maximal mögliche Auslastung der Lkw im Hauptlauf

Da die internationale Literatur meist die Verkehrsleistungsänderung der Kunden und Kundinnen und der KEP-Dienstleister als wichtigsten Umwelteffekt identifiziert²⁹, werden die Ergebnisse der eComTraf-Studie auch in der vorliegenden Studie verwendet.³⁰ Für die spätere Modellierung müssen die Verkehrsleistungsänderungen durch E-Commerce auf den jeweiligen Gesamtverkehr im Pkw- und LNF-Bereich bezogen werden und Annahmen bezüglich der möglichen weiteren Entwicklung der Anzahl an zugestellten Paketen getroffen werden.

²⁸ Im Weiteren wird vereinfacht angenommen, dass diese KEP-Dienste durch E-Commerce bedingt sind.

²⁹ Laut einer Review-Studie (Mangiaracina R. 2015) aus dem Jahr 2015 untersuchen im Bereich der Umwelteffekte von B2C-E-Commerce 90 % der Studien Verkehrseffekte, 25 % Effekte durch Veränderungen in der Lagerhallennutzung, 20 % Effekte durch zusätzlich notwendige Verpackung und 20 % Effekte durch die Veränderungen der Logistikwege.

³⁰ Studienergebnisse in diesem Bereich schwanken international stark – aufgrund unterschiedlicher Systemgrenzen, untersuchten Effekten und Annahmen. Eine gute Übersicht der Ergebnisse internationaler Studien ist in Horner et al. (2016) zu finden.

Die PoviMob-Studie geht von einer Steigerung um 25 % von 2019 bis 2035 aus. Da die Steigerung in den letzten sechs Jahren allerdings 150 % ausgemacht hat, werden diese 25 % als Minimalwert angenommen. Im Max-Szenario wird bis 2040 eine weitere Erhöhung der Paketzustellungen von 75 % und im Mid-Szenario von 50 % angenommen.

Die ca. 290 Mio. zugestellten Pakete im Jahr 2020 reduzieren den Pkw-Verkehr um 2,1 Mrd. km und verursachen 350 Mio. km von leichten Nutzfahrzeugen.³¹ Eine weitere Steigerung von 50 % entspräche im Jahr 2040 einer Einsparung von 1,05 Mrd. Pkw-km und zusätzlichen 175 Mio. km von leichten Nutzfahrzeugen. In den Annahmen für die Quantifizierung wurde dies für das Mid-Szenario verwendet.

Tabelle 28: Annahmen für die Quantifizierung – E-Commerce; Quelle: AEA

E-Commerce						
Referenz-EV	Reduktions- potenzial	Aktuelle Markt- durchdringung	Marktdurchdringung 2040			
			MIN	MID	MAX	
EEV Pkw	-2,1 Mrd. Fzgm*	zus. Reduktion auf Basis 2019**	25 %	50 %	75 %	
EEV LNF	+350 Mio. km*		25 %	50 %	75 %	
Wichtige Technologien						
<ul style="list-style-type: none"> • Cloud-basierte Plattformen • Telekommunikationsplattformen • Videokonferenzen 			<ul style="list-style-type: none"> • Digitale Assistenten • Augmented Reality & Virtual Reality • Voice over IP (VoIP) 			
Wirkungskette						
E-Commerce reduziert persönliche Einkaufswege und erhöht durch zusätzliche Lieferfahrten den Zustellverkehr.						
Rebound-Effekt						
Der gesteigerte Verkehr von LNF wird als eine Hauptwirkung und nicht als Rebound modelliert. Es wird angenommen, dass Fahrten, welche zuvor kombiniert durchgeführt wurden (Kombination von Einkaufswegen mit Pendelwegen etc.), in dem Reduktionspotenzial nicht enthalten sind und somit kein extra Rebound-Effekt hierfür berechnet werden muss.						
Weitere Informationen						
* In diesem Fall wird das Reduktionspotenzial absolut angegeben, da diese Entwicklung unabhängig der sonstigen Verkehrsentwicklung im Pkw- und LNF-Bereich angenommen wird. ** Das Reduktionpotenzial wird entsprechend der Marktdurchdringung im Jahr 2040 abgeschätzt.						
Relevante Quellen						
(BMVIT 2015), (UBA AT 2020), (Mangiaracina R. 2015), (Horner et al 2016)						

³¹ Dies wird berechnet, indem die oben beschriebenen -7,2 km für Pkw- und +1,2 km LNF-Verkehr verwendet werden. Es wird vereinfacht angenommen, dass der zusätzliche Verkehr von KEP-Dienstleistern im LNF-Bereich stattfindet.

3.4.5 E-Health, E-Learning, E-Banking, E-Governance

E-Learning, E-Banking, E-Health, E-Governance werden hier gemeinsam dargestellt, da der Haupteinflussfaktor all dieser digitalen Anwendungen in einer möglichen Verkehrsreduktion liegt.

Bereits heute werden zahlreiche Bank- und Behördenwege digital erledigt (EY 2018). E-Governance wurde in Österreich mit der Einführung der Handy-Signatur im Jahr 2009 ermöglicht und durch die im Jahr 2019 gelaunchte App „Digitales Amt“ für Smartphones unterstützt (UBA AT 2020). Auch die Nutzung von Onlinebanking ist in Österreich sehr weitverbreitet. Laut einer Studie für Mastercard nutzten im Jahr 2019 58 % der Befragten Onlinebanking über das Handy bzw. 73 % über einen Webbrowser (Kleine Zeitung 2019) (UBA AT 2020).

E-Health-Anwendungen bieten eine Plattform für Informationsverbreitung, Interaktion und Zusammenarbeit zwischen Institutionen, Fachleuten, medizinischem Personal sowie Patienten und Patientinnen (GeSI 2015). Eine Reduktion des Energieverbrauchs und der THG-Emissionen kann laut GeSI (2015) durch vier Kerntechnologien erfolgen: Remote Diagnostics, Videokonferenzen, elektronische Datenverarbeitung und -speicherung und Augmented Reality. Weitere Anwendungen von digitalen Technologien im Gesundheitsbereich (welche hier nicht weiter untersucht werden) sind in der Diagnostik (KI-unterstützt), in der Herstellung von Prothesen (additive Verfahren) und in der Medikamentenforschung, -entwicklung und -herstellung zu finden. Laut Accenture kann es durch E-Health, unter anderem durch Telemedizin und Selbstdiagnose-Technologien, zu einer Vermeidung von 22 % der persönlichen Besuche beim Arzt bzw. der Ärztin kommen.

Laut der Studie „Österreich unterwegs 2013/2014“ (ÖU 2016) fielen im Jahr 2014 ca. 13 % aller Wege in Österreich für private Erledigungen an (exklusive Einkäufen, Freizeit, Besuchen). Bei 7,5 Mrd. Wegen in Österreich pro Jahr³² ergeben sich hierdurch ca. 1 Mrd. Wege für private Erledigungen. Die durchschnittliche Weglänge für diese beträgt ca. 10 km und es wurden 62 % mittels motorisiertem Individualverkehr (MIV) erledigt. Dies entspricht ca. 10 Mrd. Kilometer für private Erledigungen und 6 Mrd. Kilometer, welche hierfür mittels MIV zurückgelegt werden. Wenn dies durch E-Health, E-Banking und E-Governance um 20 % (Annahme) reduziert werden kann, errechnet sich eine mögliche Einsparung von ca. 1,2 Mrd. Pkw-km. Somit können ca. 2 % der Wege im motorisierten Individualverkehr durch E-Health, E-Banking und E-Governance eingespart werden.

Bei E-Learning werden Lehrinhalte nicht (bzw. nicht ausschließlich) in physischen Veranstaltungen, sondern (auch) digital über das Internet weitergegeben. Laut der „Studie Österreich unterwegs 2013/2014“ (ÖU 2016) fielen im Jahr 2014 ca. 8,5 % aller Wege in Österreich für Schule und Ausbildung an, von diesen wurden 25 % mittels motorisierten Individualverkehrs zurückgelegt. Bei insgesamt 7,5 Mrd. Wegen in Österreich pro Jahr und 8,5 % Anteil an Schul- und Ausbildungswegen ergeben sich ca. 0,6 Mrd. Wege für Schule und Ausbildung. Diese entsprechen bei einer durchschnittlichen Weglänge von ca. 9 km insgesamt ca. 6 Mrd. km, von denen 1,4 Mrd. km mit MIV zurückgelegt werden. Wenn von diesen Wegen ca. 20 % durch E-Learning entfallen, können 0,3 Mrd. km mit MIV eingespart werden. Das bedeutet, dass ca. 0,4 % des motorisierten Individualverkehrs durch E-Learning eingespart werden kann.


Bieser und Hilty (2018) haben für die Schweiz unter anderem die Reduktionspotenziale bei THG-Emissionen durch E-Learning, E-Banking und E-Health in Szenarien zusammengefasst. Die Summe der Einschätzungen reicht

³² „Hochgerechnet auf ein gesamtes Jahr ergibt sich eine Jahresverkehrsleistung der Österreicherinnen und Österreicher ab 6 Jahren von rund 104 Milliarden Kilometern bei 7,5 Milliarden Wegen, für die in Summe 3,3 Milliarden Stunden benötigt werden. 55 Milliarden Kilometer werden mit dem MIV als LenkerIn, weitere 22 Milliarden Kilometer als MitfahrerIn zurückgelegt.“ (ÖU 2016)

hierbei von ca. 0,1 bis 0,4 Mio. t CO₂-Äquivalent im Vergleich zu einer Prognose für das Jahr 2030.³³ Dies entspricht einer Reduktion von 1,5 % bis 6 % im Jahr 2030.³⁴

Der zuvor beschriebene Ansatz für die Abschätzung der Effekte in Österreich liegt mit 2,4 % im niedrigen Bereich der Einschätzungen von Bieser und Hilty für die Schweiz. Durch die angenommene Marktdurchdringung führt dies insgesamt zu niedriger eingeschätzten EV- und THG-Reduktionspotenzialen.

Tabelle 29: Annahmen für die Quantifizierung – E-Learning, E-Banking, E-Health, E-Governance; Quelle: AEA

E-Learning, E-Banking, E-Health, E-Governance					
 Referenz-EV	↓ Reduktions- potenzial	Aktuelle Marktdurch- dringung	Marktdurchdringung 2040		
			MIN	MID	MAX
Reduktion der MIV-km	-2,4 %	Zus. Reduktionspotenzial*	20 %	60 %	100 %
Wichtige Technologien					
<ul style="list-style-type: none"> • Cloud-basierte Plattformen • Telekommunikationsplattformen • Videokonferenzen • Apps 		<ul style="list-style-type: none"> • Augmented Reality & Virtual Reality • Voice over IP (VoIP) • Virtuelle Assistenzsysteme 			
Wirkungskette					
Diese Anwendungen reduzieren die Anzahl der zurückgelegten Wege und somit die Anzahl der zurückgelegten Wege mittels motorisierten Individualverkehrs (siehe Beschreibung im Text).					
Rebound-Effekt					
Es werden hier keine direkten Rebounds angenommen.					
Weitere Informationen					
* Zwecks Vereinfachung wird mit einer aktuellen Marktdurchdringung von 0 gerechnet, um das zusätzliche Reduktionpotenzial entsprechend der Marktdurchdringung im Jahr 2040 abzuschätzen.					
Relevante Quellen					
(Bieser und Hilty 2018), (GeSI 2015), (EY 2018)					

³³ Dies entspricht einer relativen Reduktion von 1 % bis 4 % im Vergleich zu den Emissionen im Jahr 2019. Die CO₂-Emissionen des Verkehrs in der Schweiz betragen 2019 insgesamt 14,7 Mio. t CO₂-Äquivalent (exkl. Flugverkehr). Hiervon fallen 72 % im Pkw-Verkehr an. Somit errechnen sich 10,6 Mio. t CO₂-Äquivalent an THG-Emissionen in diesem Sub-Sektor (CH-BA Statistik 2021).

³⁴ Dies ist dadurch begründet, dass hier von einer höheren Elektrifizierungsrate ausgegangen werden kann. Die Studie von Bieser und Hilty wurde im Jahr 2019 geschrieben, es wurde versucht, die Einschätzung zu dieser Zeit zu beziffern.

3.4.6 IKT am Arbeitsplatz

Informations- und Kommunikationstechnologien am Arbeitsplatz wie Computer, Netzwerke, Präsentationstechnik etc. verbrauchten im Jahr 2020 ca. 1,0 TWh an Strom (AEA 2021), dies entspricht 7 % des Stromverbrauchs im Dienstleistungssektor (Statistik Austria 2021). Die Frage, wie sich dies in Zukunft entwickeln kann, ist relevant im Zusammenhang mit der Analyse des Energieverbrauchs und der THG-Emissionen, die durch Digitalisierung verursacht werden.

Die nachfolgende Analyse für den IKT-Verbrauch am Arbeitsplatz baut stark auf der detaillierten Studie „Entwicklung des IKT-bedingten Strombedarfs in Deutschland“ von Fraunhofer IZM (2015) auf. Diese Studie beschreibt u. a. detaillierte Prognosen für den IKT-bedingten Strombedarf am Arbeitsplatz, und zwar für 18 Gerätearten in fünf Kategorien (siehe Tabelle 30).

Tabelle 30: IKT am Arbeitsplatz – Kategorien und Geräte; manche dieser Geräte sind zwar bereits heute nicht mehr relevant, es wird allerdings angenommen, dass der entsprechend berechnete Energieverbrauch durch andere in Zukunft verwendete Geräte ersetzt wird; Quelle: Fraunhofer IZM (2015)

		Kategorien				
		Computer	Monitore	Computerperipherie	Netzwerk und Telefontelefonie	Präsentationstechnik
Geräte	Desktop PC		Monitore bis 19“ Bildschirmdiagonale	Drucker	LAN-Ports 1 GBit	Beamer
	Notebook		Monitore über 19“ Bildschirmdiagonale	Multifunktionsgeräte	LAN-Ports 10 GBit+	Beamer in Whiteboards
	Thin Client			Faxgeräte	WLAN-Systeme	Whiteboards allein
	Tablet PC			Scanner	Telefone	
					Smartphones	

Für jedes Gerät wurden in der Fraunhofer-Studie die Anzahl der Geräte in Deutschland, die Leistung im Betrieb und während des Stand-by sowie die Betriebszeiten für die Jahre 2010, 2015, 2020 und 2025 abgeschätzt. Für die hier vorliegende Studie wurden die Leistungen und Betriebszeiten für diese Jahre übernommen und die Anzahl der Geräte in Österreich mittels errechneter Faktoren abgeleitet. Die Methodik wurde in einem separaten Bericht für dieses Projekt (AEA 2021) im Detail für das Jahr 2020 beschrieben. Für den Zeitraum von 2025 bis 2040 wurde angenommen, dass weitere Netto-Reduktionen des Energieverbrauchs für Computer, Monitore und Computerperipherie am Arbeitsplatz von 1 % pro Jahr möglich sind. Zusätzliche Reduktionen für Netzwerk und Telefontelefonie sowie Präsentationstechnik werden entsprechend der Trendentwicklung aus der Analyse von 2010 bis 2025 abgeleitet.

Zu dem klassischen IKT-Verbrauch am Arbeitsplatz wird der Energieverbrauch von intelligenten Messsystemen und Energiemanagementsystemen (EMS) hinzugerechnet. Hierfür werden wiederum für 2010 bis 2025 die Daten von Deutschland und Österreich abgeleitet. Für den Energieverbrauch im Zeitraum von 2035 bis 2040 wird aller-

dings eine jährliche Steigerung von 1 % angenommen. Von diesem Energieverbrauch werden 20 % im Dienstleistungssektor (vereinfacht)³⁵ zugeordnet. Die auf Grundlage dieser Methoden errechneten IKT-Stromverbräuche für die Jahre 2020, 2025, 2030, 2035 und 2040 sind in Abbildung 13 dargestellt.

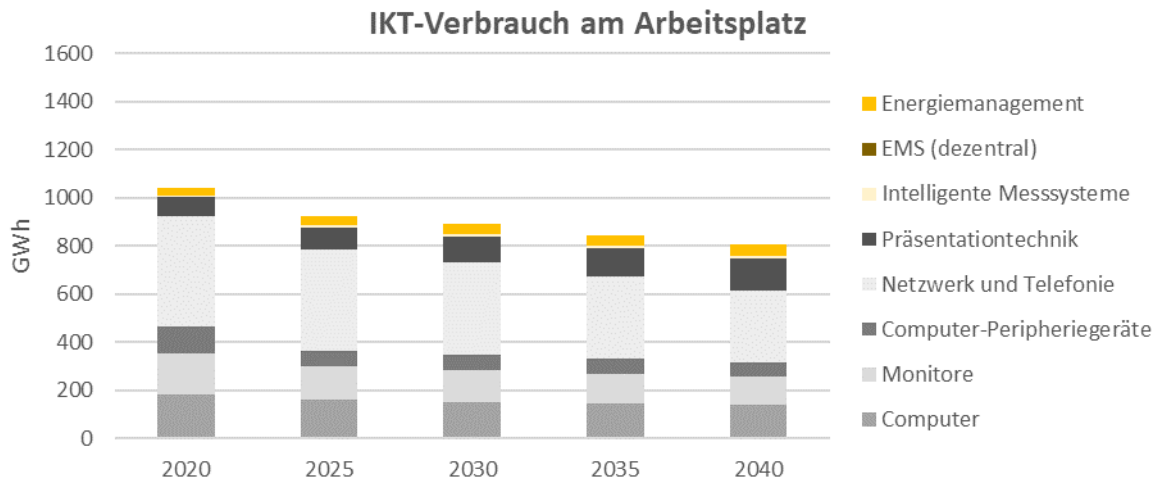


Abbildung 13: IKT-Energieverbrauch am Arbeitsplatz in Österreich; Quelle: AEA, Berechnungen auf Basis von (Fraunhofer-IZM 2015)

Die oben beschriebene Methodik entspricht anscheinend einem maximalen Szenario für Energieeinsparung im IKT-Bereich. Der Grund dafür sind die Analysen, welche für den IKT-Verbrauch im Haushaltssektor durchgeführt wurden. Es wird angenommen, dass diese Ergebnisse für den IKT-Verbrauch auf den Arbeitsplatz übertragbar sind. Auf dieser Grundlage lässt sich für ein minimales Szenario abschätzen, dass sich der IKT-Energieverbrauch am Arbeitsplatz in Zukunft stabilisiert. Abbildung 14 illustriert die angenommenen Min-, Mid- und Max-Szenarien für den IKT-Stromverbrauch am Arbeitsplatz für Österreich.

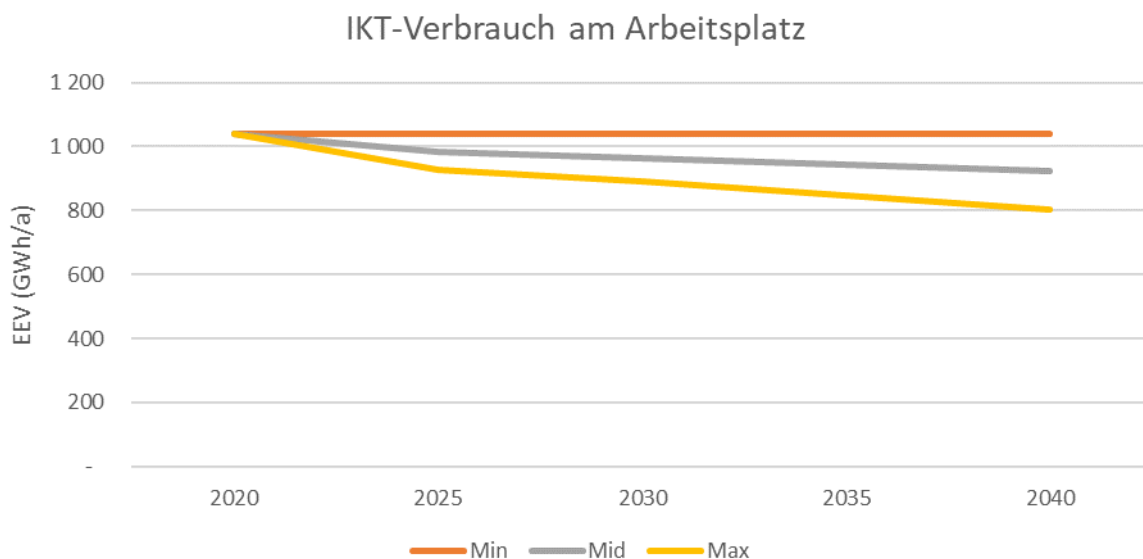


Abbildung 14: IKT-Stromverbrauch am Arbeitsplatz – Szenarien; Quelle: AEA

³⁵ Der Energieverbrauch von IKT am Arbeitsplatz inklusive 20 % des Energieverbrauchs für EMS und intelligente Messsysteme werden vereinfacht dem Dienstleistungssektor zugeordnet (und nicht zwischen Industrie- und Dienstleistungssektor aufgeteilt).

Tabelle 31: Annahmen für die Quantifizierung – IKT am Arbeitsplatz; Quelle: AEA

IKT am Arbeitsplatz					
 Referenz-EV	 Reduktions- potenzial	Aktuelle Marktdurch- dringung	Marktdurchdringung 2040		
			MIN	MID	MAX
Beleuchtung und EDV im Dienstleistungssektor* (für IKT)	-7 % (-23 %)	Zus. EV-Reduktion**	0 %	50 %	100 %
Wichtige Technologien					
<ul style="list-style-type: none"> • Computer • Monitore • Computerperipherie 		<ul style="list-style-type: none"> • Netzwerke und Telefonie • Präsentationstechnik 			
Wirkungskette					
Durch effizientere Geräte kommt es zu einer Reduktion des Energieverbrauchs.					
Rebound-Effekt					
Es wird angenommen, dass etwaige Rebounds bereits inkludiert sind.					
Weitere Informationen					
Fraunhofer IZM (2015), abgeleitet von Deutschland auf Österreich und von 2010 auf 2025 – Trends 2030–2040 Detailanalyse für das Jahr 2020 in Deliverable 2.1 dieses Projektes (AEA 2021) * Da in der NEA für den Dienstleistungssektor EDV nicht separat, sondern gemeinsam mit Beleuchtung ausgewiesen wird, muss das Reduktionspotenzial für die Modellierung entsprechend umgerechnet werden. (Im Dienstleistungssektor wurde für Beleuchtung und EDV im Jahr 2020 3,39 TWh an elektrischer Energie verbraucht (Statistik Austria 2021).) ** Zwecks Vereinfachung wird mit einer aktuellen Marktdurchdringung von 0 gerechnet, um das zusätzliche Reduktionspotenzial entsprechend der Marktdurchdringung im Jahr 2040 abzuschätzen.					
Relevante Quellen					
(Fraunhofer-IZM 2015), (AEA 2021)					

3.4.7 Rechenzentren

Der weltweite Stromverbrauch in Rechenzentren (exkl. Cryptocurrency Mining) betrug im Jahr 2020 etwa 1 % des weltweiten Endenergieverbrauchs von elektrischer Energie. Der weltweite Internetverkehr stieg im Jahr 2020 um über 40 %, angetrieben durch vermehrtes Video-Streaming und die Nutzung von Videokonferenzen, Online-spielen und sozialen Netzwerken. Dieses Wachstum kommt zusätzlich zur kontinuierlich steigenden Nachfrage. Seit 2010 hat sich die Zahl der Internetnutzer:innen weltweit verdoppelt, während sich der weltweite Internetverkehr um das 15-Fache oder ca. 30 % pro Jahr erhöht hat (IEA 2021). Es kann erwartet werden, dass datenintensive digitale Anwendungen wie Automatisierung in der Industrie, autonomes Fahren und Smart Homes zu weiteren Steigerungen des Internetverkehrs in der Zukunft führen.

Der größte Teil des weltweiten Internet-Protocol-(IP-)Datenverkehrs läuft über Rechenzentren. Ein erhöhter Internetverkehr treibt daher die Nachfrage nach Diensten von Rechenzentren und damit auch deren Energieverbrauch. Ein beachtlicher Multiplikatoreffekt ist der Datenverkehr zwischen Rechenzentren. Für jedes Datenbit, das über das Netzwerk von Rechenzentren zu den Endbenutzern transportiert wird, werden ca. fünf weitere Datenbits innerhalb und zwischen den Rechenzentren übertragen. Die stark wachsende Nachfrage nach Rechenzentrumsservices wird allerdings größtenteils durch kontinuierliche Effizienzsteigerungen bei Servern, Speichergeräten, Netzwerkschichten und der Rechenzentrums-Infrastruktur ausgeglichen sowie durch den hohen und wachsenden Anteil an Services, die von hocheffizienten Cloud- und Hyperscale-Rechenzentren abgedeckt werden (IEA 2021). Dies ist in Abbildung 15 dargestellt.

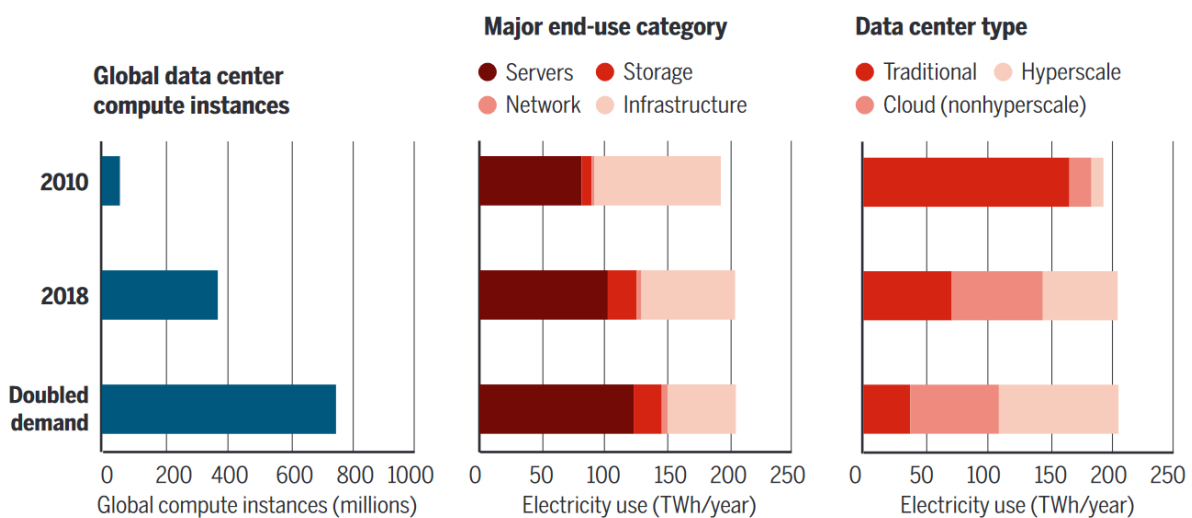


Abbildung 15: Energieverbrauch von Datenzentren – historisch und projiziert bei einer Verdopplung des Computing-Bedarfs; Quelle: (Masanet E. 2020)

Seit 2010 ist der Stromverbrauch pro Berechnung eines typischen Volume-Servers um den Faktor vier gefallen, vor allem wegen der Effizienzsteigerungen bei Prozessoren und der Reduktion von Leerlaufzeiten. Gleichzeitig ist die Leistung (Watt) pro Terabyte installierten Speichers aufgrund von erhöhter Speicherlaufwerksdichte und von -effizienzgewinnen um einen Faktor von ca. neun gesunken (Masanet E. 2020).³⁶ Cloud- und Hyperscale-Rechenzentren werden mit hoher Kapazität betrieben, was zum Teil auf Virtualisierungssoftware zurückzuführen ist, die es den Betreibern von Rechenzentren ermöglicht, mit weniger Servern eine höhere Arbeitsleistung zu erbringen (IEA 2021). Es ist jedoch wichtig anzumerken, dass bei großen Rechenzentren zwar hohe Fortschritte

³⁶ Im Jahr 2008 wurde der Europäische Verhaltenskodex für Rechenzentren eingeführt mit dem Ziel, die Energieeffizienz in Rechenzentren zu verbessern (EC 2021). Die letztgültigen Best Practice Guidelines hierzu sind in JRC (2021) beschrieben.

bei der Energieeffizienz erzielt wurden, dies jedoch bei kleinen und mittleren Zentren, die mehr als 50 % des Stromverbrauchs des Sektors ausmachen, noch nicht der Fall ist (Vasques 2017) (JRC 2019). Laut Masanet (2020) können derzeitige Trends der Energieeffizienzentwicklung in Rechenzentren die nächste Verdopplung an Daten und Recheninstanzen kompensieren (siehe Abbildung 15). Diese nächste Verdopplung an Leistung wird allerdings bereits in den nächsten drei bis vier Jahren erwartet (Masanet E. 2020).

Große Rechenzentren haben in der Regel eine sehr gute Stromnutzungseffektivität (PUE – Power Usage Effectiveness), die ein Maß dafür ist, wie effizient ein Rechenzentrum Energie abseits der Energie für IT nutzt. Die effizientesten Hyperscale-Rechenzentren können PUE-Werte von ca. 1,1 aufweisen (d. h., 0,1 kWh werden für die Kühlung/Stromversorgung pro 1 kWh für IT-Geräte verwendet) (IEA 2021). ReUseHeat beschreibt, dass ca. 40 % des Energieverbrauchs für das Kühlsystem in (traditionellen) Rechenzentren anfällt (JRC 2019), dies würde einem PUE von ca. 1,4 entsprechen. Die Abwärme, welche in größeren Rechenzentren anfällt, kann in Fernwärmenetze eingespeist werden und somit einen wertvollen Zusatznutzen erbringen.³⁷

Eine genaue Analyse darüber, wie hoch der Energieverbrauch von Rechenzentren in Österreich derzeit ist und wie sich dieser in Zukunft entwickeln kann, ist leider aufgrund mangelnder Daten nicht möglich. Aus diesem Grund werden hierfür in einem ersten Schritt Analysen der detaillierten Studie „Entwicklung des IKT-bedingten Strombedarfs in Deutschland“ von Fraunhofer IZM (2015) auf Österreich abgeleitet. Dies wird anschließend mit den globalen Trends verglichen. Abschließend wird eine Abschätzung der Entwicklung bis 2040 durchgeführt.³⁸

Die Studie von Fraunhofer IZM (2015) beschreibt u. a. detaillierte Prognosen für den Strombedarf von Rechenzentren, und zwar für zehn Gerätearten in vier Kategorien (siehe Tabelle 32). Die Kategorien Server, Speicher, Netzwerke und Infrastruktur sind deckungsgleich mit den Kategorien in den Analysen von Masanet (2020) und IEA (2021).

Tabelle 32: IKT in Rechenzentren – Kategorien und Geräte; Quelle: Fraunhofer IZM (2015)

		Kategorie			
		Server	Speicher	Netzwerk	Infrastruktur
Geräte	Bladeserver	3,5“-Festplatten	1 Gigabit Ethernet	Kühlung/Klimatisierung	
	Rack-/Towerserver	2,5“-Festplatten	10 Gigabit Ethernet	Unterbrechungsfreie Stromversorgung	
	Midrange/Mainframe-Server	SSD-Festplatten	40 Gigabit Ethernet	Sonstige Infrastruktur	
		Speichercontroller	Speicher Netzwerke		

Für jedes Gerät wurden in der Fraunhofer-Studie die Anzahl der Geräte in Deutschland, die Leistung im Betrieb und während des Stand-by sowie die Betriebszeiten für die Jahre 2010, 2015, 2020 und 2025 abgeschätzt. Für die hier vorliegende Studie wurden die Leistungen und Betriebszeiten für diese Jahre übernommen und die Anzahl der Geräte in Österreich mittels errechneter Faktoren abgeleitet. Die Methodik wurde in einem separaten Bericht für dieses Projekt (AEA 2021) im Detail für das Jahr 2020 beschrieben. Für den Zeitraum von 2025 bis 2040 wurde angenommen, dass weitere Entwicklungen des Energieverbrauchs für Server, Speicher, Netzwerk und Infrastruktur in Rechenzentren entsprechend der zuvor berechneten Entwicklungen des EV von 2010 bis 2025 in Zukunft demselben Trend folgen. Der auf Grundlage dieser Methoden errechnete Energieverbrauch in Rechenzentren für die Jahre 2020, 2025, 2030, 2035 und 2040 ist in Abbildung 16 dargestellt.

³⁷ Diese mögliche kaskadische Nutzung von Abwärme wird in der vorliegenden Studie nicht betrachtet.

³⁸ In der Fachliteratur wird oft empfohlen, diese nicht zu versuchen, da solche langfristigen Prognosen nicht plausibel sind.

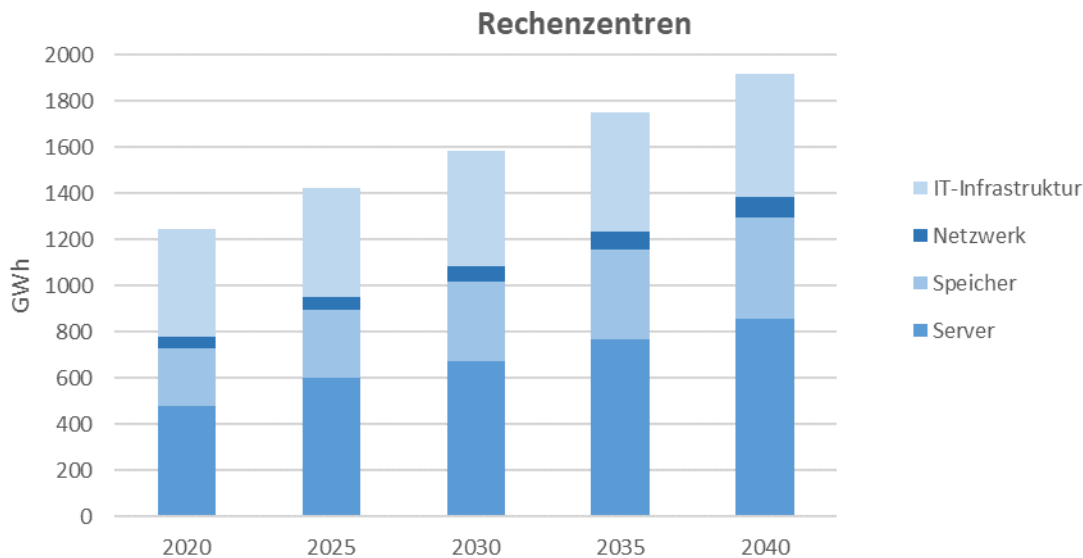


Abbildung 16: IKT-Energieverbrauch in Rechenzentren in Österreich³⁹; Quelle: AEA, Berechnungen auf Basis von (Fraunhofer-IZM 2015)

Die oben beschriebene Methodik wurden mit Daten von Borderstep (2016) verglichen, welche u. a. den Energiebedarf von Rechenzentren in Österreich im Jahr 2016 ermittelte. Die Borderstep-Analyse zeigt einen Energieverbrauch von Rechenzentren in Österreich im Jahr 2016 von 1,24 TWh. Somit kann angenommen werden, dass zumindest der Ausgangspunkt der Energieverbrauchs-Entwicklung im Jahr 2020 in Abbildung 16 eine eher konservative (niedrige) Abschätzung darstellt.

Ein weiterer wesentlicher Faktor ist die Entwicklung der Daten- und Recheninstanzen. Hier kann mit einer Verdopplung alle drei Jahre gerechnet werden. Wenn dieser Trend anhält, entspräche dies bis 2040 einer ca. 100-mal höheren Daten- und Rechenleistung.⁴⁰ Somit erscheint die ca. 55-prozentige Zunahme des Energieverbrauchs bis 2040 (siehe Abbildung 16) selbst mit weiteren Energieeffizienzverbesserungen als niedrige Abschätzung. Aus diesem Grund wird die IKT-Energieverbrauchsanalyse oben als Mid-Szenario gewählt.⁴¹ Ein Min-Szenario wird diese Zunahme mit einer Sensitivität von -90 % (EV-Zunahme von 5 %)⁴², ein Max-Szenario mit einer Sensitivität von +100 % abbilden (EV-Zunahme von 110 %)⁴³. Als Basis für das Min-Szenario im Jahr 2020 wird die Ableitung aus der Fraunhofer-Studie (siehe Abbildung 16) verwendet. Als Ausgangspunkt für das Max-Szenario wird eine Extrapolation der Entwicklung der Borderstep-Analyse (welche Werte für 2010 und 2016 angibt) bis zum Jahr 2020 herangezogen. Das Mid-Szenario verwendet als Basis im Jahr 2020 den Mittelwert der Basis des Min- und des Max-Szenarios. Abbildung 17 illustriert das angenommene Min-, Max- und Mid-Szenario für den Energieverbrauch in Rechenzentren für Österreich gemeinsam mit den Daten von Borderstep für 2010 und 2015.

Rechenzentren werden in der vorliegenden Studie im Sektor Dienstleistung modelliert. In diesem Sektor werden Netzwerke, Speicher und Server in der Nutzenergiekategorie Beleuchtung und EDV inkludiert, während IT-Infrastruktur der Nutzenergiekategorie Raumtemperatur zugeordnet wird. Laut (Masanet E. 2020) kann mit einem PUE von 1,1 bei der nächsten Verdopplung damit gerechnet werden, dass ca. 25 % des Energieverbrauchs für die Infrastruktur (Kühlung) anfallen. ReUseHeat beschreibt, dass ca. 40 % des Energieverbrauchs für das Kühlsystem in Rechenzentren anfällt (JRC 2019). In der vorliegenden Studie wird für das Jahr 2040 mit 28 % gerechnet.

³⁹ Streaming und Gaming in der Cloud ist implizit berücksichtigt.

⁴⁰ 20 Jahre, von 2021 bis 2040, würden in etwa 6,6 Verdopplungen entsprechen ($2^{6,6} = 97$).

⁴¹ Borderstep (2016) beschreibt ein Energieverbrauchswachstum von Rechenzentren in Österreich um 25 % im Zeitraum 2010 bis 2016.

⁴² Aslan (2017) berechnet mittels Regressionsanalyse eine Schätzung der durchschnittlichen Stromintensität im Internetübertragungsnetz (inklusive Rechenzentren) und kommt auf eine Halbierung der Energieintensität alle zwei Jahre.

⁴³ Die Sensitivität für das Max-Szenario ist eine Annahme.

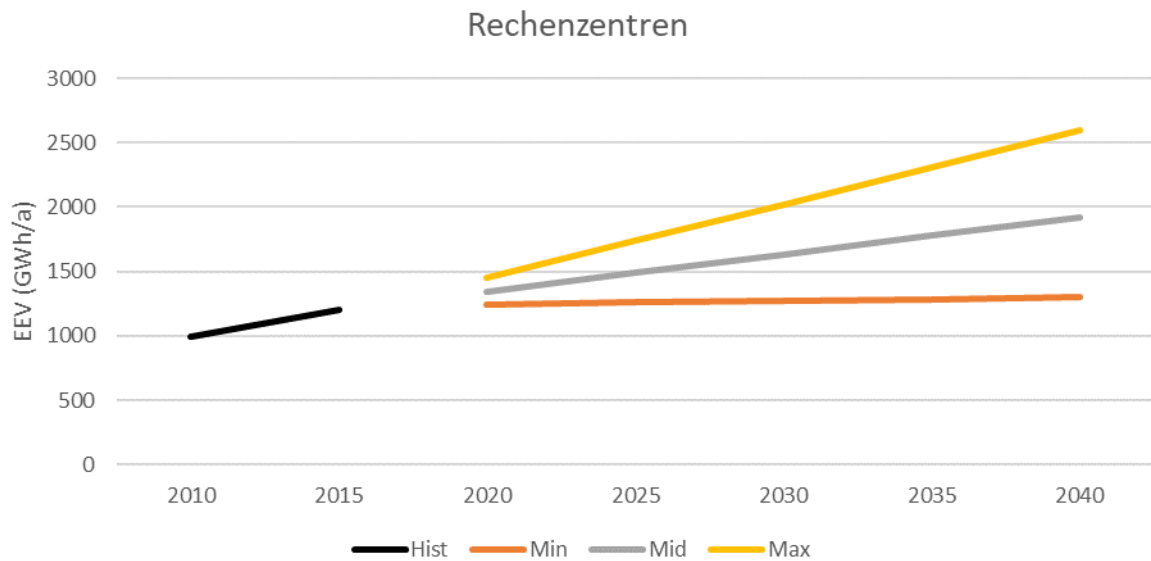


Abbildung 17: IKT-Stromverbrauch am Arbeitsplatz – Szenarien; Quelle: AEA, (Borderstep 2016)

Tabelle 33: Annahmen für die Quantifizierung – Rechenzentren; Quelle: AEA

Rechenzentren					
Referenz-EV	Entwicklungs- potenzial	Basis	Entwicklung 2040		
			MIN	MID	MAX
Dienstleistung – Beleuchtung & EDV	zus. Erhöhung	0,88 TWh	0,93 TWh	1,38 TWh	1,88 TWh
Dienstleistung – Raumwärme	zus. Erhöhung	0,47 TWh	0,37 TWh	0,54 TWh	0,72 TWh
Wichtige Technologien					
<ul style="list-style-type: none"> • Server • Speicher • Netzwerk • IT-Infrastruktur (Kühlung etc.) 			<ul style="list-style-type: none"> • Data Analytics und KI • Virtualisierungssoftware • Erhöhte Softwareeffizienz • Virtual Reality und Augmented Reality 		
Wirkungskette					
Durch erhöhtes Datenvolumen wird mehr Energie in Rechenzentren benötigt. Effizienzverbesserungen kompensieren dies größtenteils.					
Rebound-Effekt					
Es wird angenommen, dass etwaige Rebounds bereits inkludiert sind.					
Weitere Informationen					
Fraunhofer IZM (2015), abgeleitet von DE auf AT von 2010 auf 2025 – Trends 2030–2040 Detailanalyse für das Jahr 2020 in Deliverable 2.1 dieses Projektes (AEA 2021)					
Relevante Quellen					
(IEA 2021), (Masanet E. 2020), (JRC 2019), (Vasques 2017), (Aslan J. 2017), (Fraunhofer-IZM 2015)					

3.4.8 Telekommunikations-Infrastruktur

Datenübertragungsnetze verbrauchten im Jahr 2020 1,1 % bis 1,4 % der weltweit erzeugten elektrischen Energie. Die Technologien für Datenübertragungsnetze werden allerdings rasch effizienter: Die Energieintensität von Festnetzen hat sich in den Industrieländern seit dem Jahr 2000 alle zwei Jahre halbiert, und die Energieeffizienz von Mobilfunknetzen hat sich in den letzten Jahren um 10 % bis 30 % jährlich verbessert. Der weltweite Internetverkehr hat sich zwischen 2017 und 2020 mehr als verdoppelt und, wenn die aktuellen Trends anhalten, könnte sich bis 2023 wieder verdoppeln (dies entspricht jährlichen Wachstumsraten von ca. 30 %).^{44, 45} Die Art der Datenübertragung ändert sich allerdings. Der Datenverkehr mit mobilen Geräten wächst dreimal so schnell (+50 %) wie der Datenverkehr von kabelgebundenen und reinen WLAN-Geräten wie Laptops und Desktop-Computern (+17 %) (IEA 2021).

Diese Verschiebung hin zu einer stärkeren Nutzung des Mobilfunknetzes kann auch erhebliche Auswirkungen auf den Energieverbrauch der Datenübertragungsnetze haben, da Mobilfunknetze bei der aktuellen Verkehrsdichte und Netzauslastung deutlich höhere Stromintensitäten (kWh/GB) aufweisen als Festnetze. Ein Bericht der ETH Zürich (2021) präsentiert eine eingehende Analyse von Schätzungen der Energieintensität und des Gesamtenergieverbrauchs des Internets. Hierfür wurden Wide Area Network (WAN), die Fixed Access Networks (FANs) und die Radio Access Networks (RANs) separat betrachtet (siehe Abbildung 18). Diese Studie kommt zu folgenden Ergebnisse der Energieintensität für das Jahr 2020 (EI2020): EI2020 (WAN) = 0,02 kWh/GB, EI2020 (FAN) = 0,07 kWh/GB und EI2020 (RAN) = 0,2 kWh/GB.

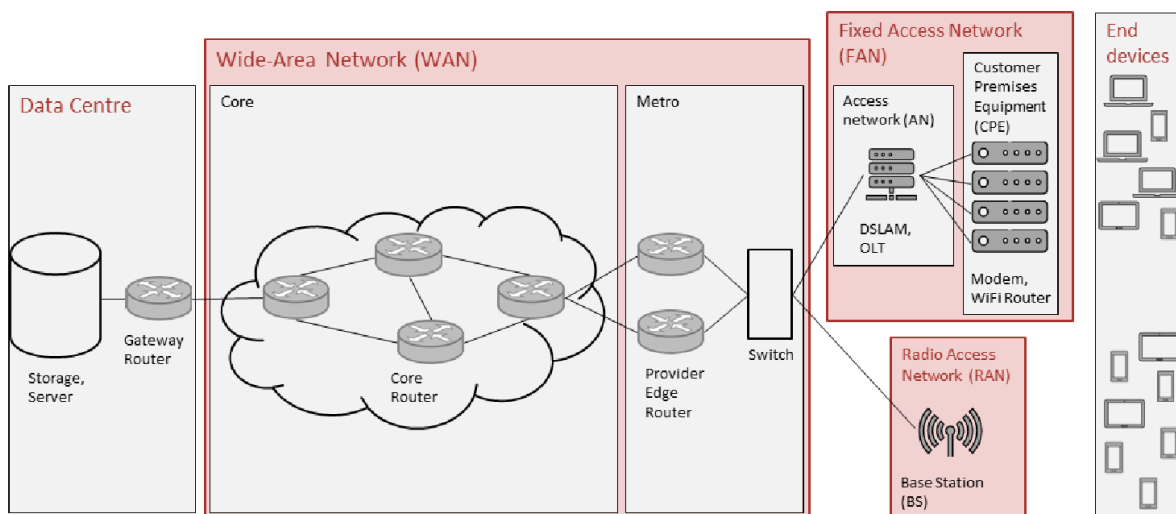


Abbildung 18: High-Level-Topologie des Internets; Quelle: (ETH Zürich 2021)

Die Mobilfunknetze wechseln weltweit schnell von älteren 2G- und 3G-Technologien zu effizienteren 4G- und 5G-Technologien. Bis 2022 sollen 4G- und 5G-Netze zusammen weltweit 83 % des Mobilfunkverkehrs übertragen. In Österreich ist nahezu die gesamte (nicht-alpine) Netzabdeckung bereits im Jahr 2021 mittels 4G- und 5G-

⁴⁴ Laut Cisco (2020) wird die weltweite Anzahl der über das Internet verbundenen Geräte bis 2023 auf 3,6 vernetzte Geräte pro Kopf steigen. Dies entspricht einer Wachstumsrate von 50 % in fünf Jahren (2018 waren es noch 2,4 vernetzte Geräten pro Kopf). Der Anteil der Machine-to-Machine-(M2M-)Verbindungen, zum Beispiel von Anwendungen in Smart Homes oder vernetzten Fahrzeugen, wird von 33 % im Jahr 2018 auf 50 % bis 2023 steigen.

⁴⁵ Die Datenmenge, welche bei autonomen Fahrzeugen anfallen, sind hoch und die Übertragung dieser Daten wird auch in den Telekommunikationsnetzen den Energieverbrauch erhöhen. Nach Einschätzungen von Experten und Expertinnen liegt die gesamte Datenmenge zumindest bei einem Testfahrzeugen für Automatisiertes und Vernetztes Fahren (AVF) zwischen 1,4 TB/h (Terabyte je Stunde) und 19 TB/h. Intel (2017) geht von ca. 5 TB/h an Datenvolumen aus (Agora 2020).

Netzen gewährleistet (Nperf 2021). 4G-Netze sind etwa fünfmal energieeffizienter als 3G und 50-mal effizienter als 2G. Die Gesamtenergie- und Emissionsauswirkungen von 5G sind jedoch noch ungewiss. Während eine 5G-Antenne derzeit etwa dreimal mehr Strom verbraucht als eine 4G-Antenne, könnten Energiesparfunktionen wie der Schlafmodus die Lücke bis 2022 auf 25 % verringern (IEA 2021). Laut ETH Zürich (2021) erscheinen für kurzfristige Extrapolationen in die Zukunft jährliche Reduktionsfaktoren für die Energieintensität von 0,8 für WAN und RAN und 0,85 für das FAN sinnvoll und eine eher konservative Wahl.

Eine genaue Analyse darüber, wie hoch der Energieverbrauch von Telekommunikationsnetzen in Österreich derzeit ist und wie sich dieser in Zukunft entwickeln kann, ist leider aufgrund mangelnder Daten nicht möglich. Aus diesem Grund werden hierfür in einem ersten Schritt Analysen der detaillierten Studie „Entwicklung des IKT-bedingten Strombedarfs in Deutschland“ von Fraunhofer IZM (2015) auf Österreich abgeleitet. Dies wird anschließend mit den globalen Trends verglichen. Abschließend wird eine Abschätzung der Entwicklung bis 2040 durchgeführt. Die Studie von Fraunhofer IZM (2015) beschreibt detaillierte Prognosen für den Strombedarf von Telekommunikationsinfrastruktur, und zwar für drei Kategorien und 12 Unterkategorien (siehe Tabelle 34). Die Kategorien: Mobilfunknetze und Festnetze decken jeweils WAN+RAN sowie WAN+FAN (siehe Studie von der ETH Zürich) ab. Zusätzlich werden Kabelnetze für Fernsehen in diesem Bericht als Teil der Telekommunikationsinfrastruktur betrachtet.

Tabelle 34: IKT in der Telekommunikationsinfrastruktur – Kategorien und Unterkategorien; Quelle: Fraunhofer IZM (2015)

		Kategorie		
		Mobilfunknetz	Festnetz	Kabelnetz
Unterkateg.	2G-Mobilfunkanlagen	PSTN/ISDN	TV-Kabelnetz	
	3G-Mobilfunkanlagen	ADSL	HFC-Kabelnetz (Breitband)	
	4G-Mobilfunkanlagen	VDSL		
	5G-Mobilfunkanlagen	FTTH		
	Mobilfunk-Kernnetz	Festnetz-Kernnetz		

Für jede Unterkategorie wurden in der Fraunhofer-Studie die Anzahl der Anlagen in Deutschland, die Leistung im Betrieb und während des Stand-by sowie die Betriebszeiten für die Jahre 2010, 2015, 2020 und 2025 abgeschätzt. Für die hier vorliegende Studie wurden die Leistungen und Betriebszeiten für diese Jahre übernommen und die Anzahl der Anlagen in Österreich mittels errechneter Faktoren abgeleitet. Die Methodik wurde in einem separaten Bericht für dieses Projekt (AEA 2021) im Detail für das Jahr 2020 beschrieben. Für die vorliegende Analyse wurde allerdings ein zusätzlicher Faktor für die Ableitung des Energieverbrauchs des Mobilfunknetzes berücksichtigt, da klare Unterschiede in den Mobilfunknetzen zwischen Österreich und Deutschland bestehen. Laut Handelsblatt (2019) gab es gemäß Daten der Bundesnetzagentur im Jahr 2018 etwa 75.000 Mobilfunkstandorte in Deutschland. Das entspricht etwa neun Standorten pro 10.000 Einwohner. In Österreich gibt es hingegen 18.000 Standorte, was etwa 21 Masten pro 10.000 Einwohner entspricht (Handelsblatt 2019). Es gibt somit dreimal mehr Masten je Einwohner in Österreich als in Deutschland. Um dies in der Ableitung zu reflektieren, wurde der Energieverbrauch der Mobilfunknetze aus der Fraunhofer-Studie (siehe (AEA 2021)) mit einem Faktor von 1,5 multipliziert.

Für den Zeitraum von 2025 bis 2040 wurde angenommen, dass weitere Entwicklungen des Energieverbrauchs für Mobilfunknetze und Festnetze entsprechend der zuvor berechneten Entwicklungen des Energieverbrauchs von 2015 bis 2025 in Zukunft demselben Trend folgen. Für Kabelnetze ist die Annahme, dass sich die Entwicklung

auf dem Niveau des Energieverbrauchs im Jahr 2025 stabilisiert. Der auf Grundlage dieser Methoden und Annahmen errechnete Energieverbrauch in Rechenzentren für die Jahre 2020, 2025, 2030, 2035 und 2040 ist in Abbildung 19 dargestellt und wurde im weiteren als Mid-Szenario (siehe Abbildung 20) verwendet.

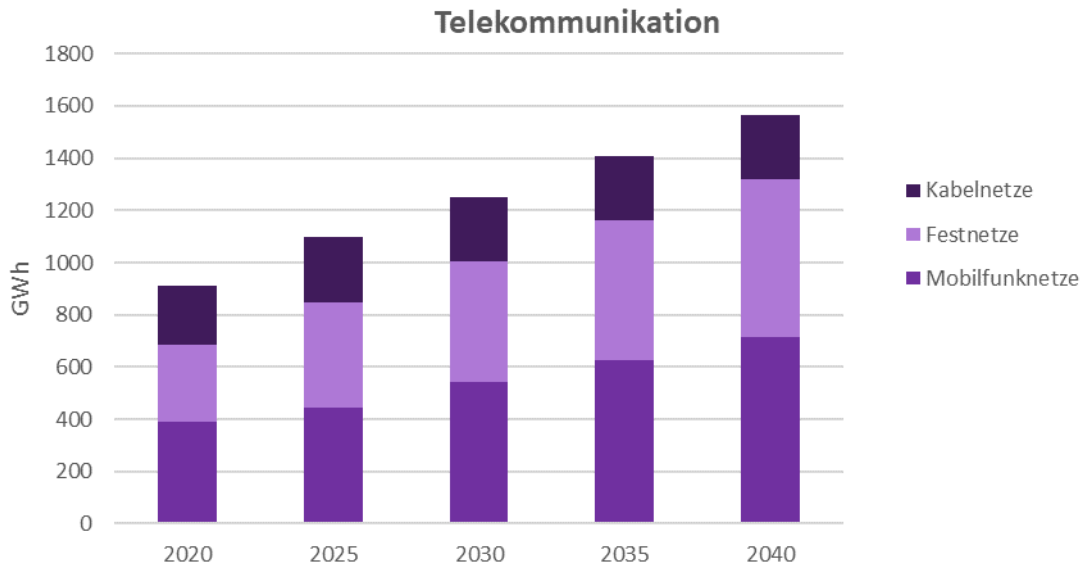


Abbildung 19: Energieverbrauch der Telekommunikationsinfrastruktur in Österreich⁴⁶; Quelle: AEA, Berechnungen auf Basis von (Fraunhofer-IZM 2015)

Die oben beschriebene Methodik wurde mit Daten für den Stromverbrauch der Sektoren Rundfunkveranstalter und Telekommunikation aus der Energiegesamtrechnung (EGR) (Statistik Austria 2020c) verglichen. Für diesen Vergleich wurde der gesamte Stromverbrauch dieser zwei Sektoren für die Jahre 2010 bis 2019 mit einem Faktor von 0,9 multipliziert.⁴⁷ Laut dieser Analyse kann der Stromverbrauch der Telekommunikationsinfrastruktur für das Jahr 2020 mit 0,92 TWh abgeschätzt werden. Dies entspricht relativ gut der 0,91 TWh an Energieverbrauch für Telekommunikationsinfrastruktur im Jahr 2020, welche aufgrund der Ableitung auf Basis der Fraunhofer-Studie berechnet wurde. Nachdem die Daten der Energiegesamtrechnung für die zwei Sektoren bis 2008 zurückreichen, kann anhand dieser Methodik auch ein historischer Trend berechnet werden (siehe „Hist“ in Abbildung 20). Aus dieser historischen Entwicklung kann ein Trend für die Zukunft abgeleitet werden (siehe Min-Szenario).

Ein wesentlicher Faktor für die Entwicklung des Stromverbrauchs der Telekommunikationsinfrastruktur ist die Entwicklung des Internetverkehrs. Hier kann mit einer Verdopplung alle drei Jahre gerechnet werden (30 % Wachstum pro Jahr). Wenn dieser Trend anhält, entspräche dies bis 2040 einer ca. 100-mal höheren Datenübertragung.⁴⁸ Dem stehen Verbesserungen der Energieintensität entgegen. Laut ETH Zürich (2021) erscheinen für kurzfristige Extrapolationen in die Zukunft jährliche Reduktionsfaktoren für die Energieintensität von 0,8 für WAN und RAN und 0,85 für das FAN sinnvoll und eine eher konservative Wahl. Aslan (2017) berechnet mittels Regressionsanalyse eine Halbierung der durchschnittlichen Stromintensität im Internetübertragungsnetz WAN, FAN und Rechenzentren (exkl. RAN) alle zwei Jahre. Im Weiteren wird für EI-Verbesserungen für WAN, RAN und FAN mit einem vereinfachten Faktor von 0,8 gerechnet. Der Netto-Effekt aus 30 % Wachstum des Internetverkehrs und 20 % Verbesserung der Energieintensität beträgt 4 % pro Jahr. Bei Anwendung dieses Faktors steigt der Energieverbrauch für die Telekommunikationsinfrastruktur alle fünf Jahre um 22 %. Ein Szenario anhand dieser Entwicklung wurde als Max-Szenario verwendet (siehe Abbildung 20).

⁴⁶ Streaming und Gaming in der Cloud ist implizit berücksichtigt.

⁴⁷ Der Faktor spiegelt die Annahme wider, dass ca. 90 % des Stromverbrauchs in diesen Sektoren der Telekommunikationsinfrastruktur zugeordnet werden.

⁴⁸ 20 Jahre, von 2021 bis 2040, würden in etwa 6,6 Verdopplungen entsprechen ($2^{6,6} = 97$).

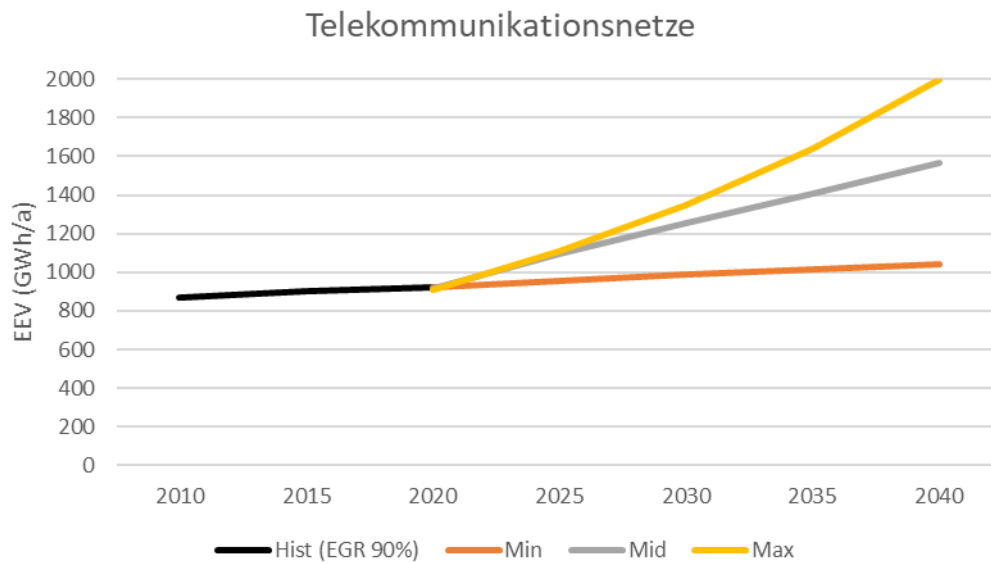


Abbildung 20: Stromverbrauch der Telekommunikationsinfrastruktur – Szenarien; Quelle: AEA, (Statistik Austria 2020c)

Tabelle 35: Annahmen für die Quantifizierung – Telekommunikationsinfrastruktur; Quelle: AEA

Telekommunikationsinfrastruktur					
Referenz-EV	Entwicklungs- potenzial	Basis	Entwicklung 2040		
			MIN	MID	MAX
Dienstleistung – Beleuchtung & EDV	Zus. Erhöhung	0,92 TWh	1,04 TWh	1,57 TWh	2,0 TWh
Wichtige Technologien					
<ul style="list-style-type: none"> Mobilfunknetze (2G, 3G, 4G, 5G, 6G und Kernnetz) Festnetze (PSTN, DSL, ADSL, VDSL, FTTH) 		<ul style="list-style-type: none"> Kabelnetze (für TV und HFC) 			
Wirkungskette					
Durch erhöhtes Datenvolumen wird mehr Energie in Telekommunikationsnetzen benötigt. Effizienzverbesserungen kompensieren dies größtenteils.					
Rebound-Effekt					
Es wird angenommen, dass etwaige Rebounds bereits inkludiert sind.					
Weitere Informationen					
Fraunhofer IZM (2015), abgeleitet von Deutschland auf Österreich und von 2010 auf 2025 – Trends 2030–2040 Detailanalyse für das Jahr 2020 in Deliverable 2.1 dieses Projektes (AEA 2021)					
Relevante Quellen					
(IEA 2021), (ETH Zürich 2021), (Fraunhofer-IZM 2015)					

3.5 Landwirtschaft

3.5.1 Überblick

„Was mit der Einführung von Dampfmaschinen und dem Umstieg von Zugtieren auf Traktoren begann (Landwirtschaft 1.0), hat über die Einführung von Dreipunkthydraulik und Zapfwelle (Landwirtschaft 2.0) und den Einsatz von Elektronik, Steuerungen und GPS-Lenksystemen (Landwirtschaft 3.0) dazu geführt, dass wir durch die Vernetzung von Maschinen und Daten seit ein paar Jahren im Zeitalter von Landwirtschaft 4.0 und Smart Farming angekommen sind.“ (BLW 2020)

Im Folgenden wird zuerst ein Überblick über die Struktur der österreichischen Landwirtschaft gegeben. Danach folgt in den Unterkapiteln eine detaillierte Untersuchung der Digitalisierungsanwendungen und ihrer möglichen Effekte auf Energieverbrauch und THG-Emissionen⁴⁹:

- Precision Plant Farming
- Precision Livestock Farming/Zuchtoptimierung
- Vertical Farming and Controlled Environment Agriculture
- Lab-grown Meat

Landwirtschaft in Österreich

Der Strukturwandel in der heimischen Landwirtschaft setzte sich in den vergangenen zehn Jahren weiter fort. Die Zahl der land- und forstwirtschaftlichen Betriebe ging im Vergleich zu 2010 um ca. 10 % zurück, während die Betriebsgröße zunahm. Im Jahr 2020 gab es in Österreich 155.900 land- und forstwirtschaftliche Betriebe. Im Jahr 2020 hielten 56 % der landwirtschaftlichen Betriebe auch Nutztiere (2010 waren es 63 %), rund 20 % der Betriebe bewirtschafteten ihre Betriebe biologisch (2010 lag der Anteil bei 14 %). 91 % der land- und forstwirtschaftliche Betriebe in Österreich werden noch in Form von Familienbetrieben geführt (Statistik Austria, 2021b).

Die österreichische Landwirtschaft ist vergleichsweise klein strukturiert, der Trend zu größeren Betrieben ist dennoch ungebrochen. Wurde im Jahr 2010 von einem Betrieb im Durchschnitt eine Gesamtfläche von 42,4 Hektar bewirtschaftet, so waren es im Jahr 2020 45,1 Hektar. Diese Tendenz lässt sich auch in der Tierhaltung beobachten. Hielt ein österreichischer Bauernhof vor zehn Jahren im Durchschnitt 28 Rinder, so nahm die Herdengröße seitdem kontinuierlich auf 34 Rinder pro Betrieb zu. Der durchschnittliche Schweinebestand stieg seit 2010 von 85 auf 111 Tiere an (Statistik Austria, 2021b).

Für das Jahr 2020 wurde eine Ackerlandfläche von 1,32 Mio. ha bewirtschaftet, was 16 % der österreichischen Staatsfläche entsprach. Den größten Anteil des Ackerlandes nahm mit 57,9 % der Getreideanbau ein. Feldfutterbau wurde auf 18,3 % der Fläche betrieben, auf Ölfrüchte entfielen 12,6 % der Fläche. Während Hackfrüchte auf 3,8 % der Fläche angebaut wurden, machten Körnerleguminosen 1,4 % des gesamten Ackerlandes aus. Schließlich lagen im Jahr 2020 3,8 % des Ackerlandes brach. Nur rund 2,2 % der Ackerlandfläche entfielen auf sonstige Flächen bzw. wurden für den Anbau von Spezialkulturen genutzt, wie z. B. Gemüse, Blumen, Erdbeeren sowie Heil-, Duft- und Gewürzpflanzen (Statistik Austria, 2021c).

Die Anzahl wichtiger land- und forstwirtschaftlicher Maschinen wurde zuletzt im Rahmen der Agrarstrukturerhebung 2013 erhoben. Insgesamt gab es in den österreichischen land- und forstwirtschaftlichen Betrieben

⁴⁹ Robotik und Drohnen werden als Teil von Precision Plant Farming bzw. Precision Livestock Farming untersucht.

310.018 betriebseigene Traktoren. Da die Anschaffung und Instandhaltung von Geräten für einzelne landwirtschaftliche Betriebe oft unerschwinglich bzw. unrentabel sind, wurde vermehrt auf Leistungen der Maschinenringe zurückgegriffen. Zusätzlich wurden verstärkt gemeinschaftlich erworbene Maschinen in den Betrieben eingesetzt (Statistik Austria 2021d).

In diesem Kapitel werden EV- und THG-Reduktionspotenziale in der Lebensmittelproduktion analysiert, allerdings nicht solche, die durch die Digitalisierung des Lebensmittelverkaufs und der Lebensmittellieferung (Stichwort reduzierte Lebensmittelabfälle) verursacht sind, und nicht jene, die durch strukturelle Änderungen des Landwirtschaftssektors (z. B. Änderungen der Landnutzung) auftreten, auch wenn diese konsumbasierten und strukturellen Änderungen höhere Potenziale für THG-Reduktionen haben (Bretscher 2018).

3.5.2 Precision Plant Farming/Smart Farming

Es gibt verschiedene Definitionen von Precision Plant Farming. Die meisten beziehen sich auf IKT-Anwendungen zur Steigerung der landwirtschaftlichen Produktivität und zu Einsparungen von Ressourcen. Der Kern dieser Konzepte ist die Möglichkeit, den Zustand von Pflanzen zu überwachen (z. B. mithilfe von Feuchtigkeitssensoren in Böden), gesammelte Daten zu analysieren und landwirtschaftliche Betriebsmittel nach den Bedürfnissen von Pflanzen mit höherer Präzision als bisher anzupassen (z. B. Dünger) (Bieser 2020).

Im Jahr 2016 nutzten insgesamt 6 % der österreichischen Landwirte Precision-Farming-Systeme. Größere Betriebe nutzen diese in einem höheren Ausmaß als kleinere Betriebe. 21 % aller österreichischen Betriebe mit mehr als 50 ha verwenden Precision Farming, während es bei den Betrieben mit einer Größe von weniger als 50 ha nur 3 % sind. Flächenmäßig bedeutet das einen Einsatz von Precision-Farming-Technologien auf 13 % aller Ackerflächen in Österreich, wovon ca. 41 % Saatkarten, Dünge- oder Pflanzenschutzkarten nutzen und 23 % Parallelfahreinrichtungen ((KeyQuest 2016), (Reindl 2019)).

Eine Studie des Wissenschaftlichen Dienstes des Europäischen Parlaments (EPRS 2016) gibt die voraussichtlichen ökologischen Vorteile durch wichtige Verfahren und Methoden der Präzisionslandwirtschaft an. Im Folgenden werden aus dieser Studie die Anwendungen/Techniken exzerpiert, die durch Digitalisierung unterstützt werden und auf Energieverbrauch und THG-Emissionen wirken (siehe Tabelle 36).

Tabelle 36: Voraussichtliche ökologische Vorteile durch wichtige Verfahren und Methoden der Präzisionslandwirtschaft mit Bezug zu Digitalisierung, Energieverbrauch und THG-Emissionen; Quelle: (EPRS 2016)

Verfahren	Technik	Voraussichtliche ökologische Vorteile
Zeitgenaues Arbeiten bei günstigen Wetterbedingungen	Automatische Maschinensteuerung über GPS	Reduzierung der Bodenverdichtung Reduzierung des CO ₂ -Fußabdrucks (um 10 % reduzierter Kraftstoffverbrauch bei der Feldarbeit)
Dauerpflanzenbewuchs an Schlüsselstellen und an Feldrändern	Automatische Führung und Konturanbau auf unebenem Gelände	Verringerung der Erosion Verringerung des Abschlusses von Oberflächengewässern und Düngemitteln Verringertes Hochwasserrisiko
Einhaltung des empfohlenen Abstands zu Wasserläufen beim Einsatz von Düngemitteln und Pestiziden	Automatische Steuerung gestützt auf geografische Information Abschnittskontrolle bei der Verteilung von Sprüh- und Düngemitteln	Verringerung/Vermeidung des übermäßigen Einsatzes von Chemikalien in Böden sowie des Risikos einer Wasserverunreinigung
Variable Ausbringung von Düngern	Mobile Messung der Düngzusammensetzung Anpassung der Spritztiefe	Verringerte Grundwasserverunreinigung Verringerte Ammoniakemissionen in die Luft
Gezielte Herbizidbesprühung von Ackerbereichen	Unkrauterkennung (online/Unkrautkarten)	Verringerung des Herbizideinsatzes durch kartenbasierten Ansatz (bei Wintergetreiden 6 % bis 81 % weniger Herbizide gegen breitblättriges Unkraut und 20 % bis 79 % weniger Herbizide gegen Grasunkraut) Verringerung um 15,2 % bis 17,5 % der aufgewendeten Menge durch kartenbasierte automatische Teilbreitenschaltung gegenüber keiner Teilbreitenschaltung

Verfahren	Technik	Voraussichtliche ökologische Vorteile
Frühzeitige Erkennung und gezielte Bekämpfung von Schädlingen oder Krankheiten	Erkennung von Krankheiten: Multisensorische optische Erkennung Erkennung von Sporenflug Volatile Sensoren	Verringerung des Pestizideinsatzes durch korrekte Erkennung und gutes Entscheidungsmodell (84,5 % Einsparung bei Pestiziden möglich)
Präzisionsbesprühung von Obst- und Weingärten	Erfassung von Baumgröße und -architektur	Verringerung des Pestizideinsatzes um 20 % bis 30 % Verringerung der besprühten Fläche um 50 % bis 80 %
Variabler Einsatz von Stickstoffdünger in Abhängigkeit von Pflanzenanforderungen und Witterungsverhältnissen	Pflanzenvegetationsindex auf Basis optischer Sensoren Kartierung des Nährstoffgehalts im Boden	Wirksamer Einsatz von Stickstoffdünger Verringerung der Stickstoffrückstände im Boden um 30 % bis 50 %
Variabler Einsatz von Phosphordünger in Abhängigkeit von Pflanzenanforderungen und Witterungsverhältnissen	Pflanzenvegetationsindex Kartierung des Nährstoffgehalts im Boden	Steigerung der Phosphorrückgewinnung um 25 %
Prognose des Biomassegehalts von Pflanzen	Pflanzenvegetationsindex	Anpassung der Fungiziddosis an den Biomassegehalt von Pflanzen
Mykotozinreduktion	Pflanzenvegetationsindex und Pilzkrankheitsrisiko	Optimierung der Düngemitteldosis und des Fungizideinsatzes in Abhängigkeit des Krankheitsrisikos

Eine Literaturübersicht über die Potenziale zur Reduzierung von Treibhausgasemissionen durch Precision Farming in der Pflanzenproduktion vom Joint Research Center (JRC 2019) liefert sieben Hauptanwendungen:

- Variable Rate Nitrogen Application
- Variable Rate Irrigation
- Controlled Traffic Farming
- Machine Guidance
- Variable Rate Pesticide Application
- Variable Rate Planting/Seeding
- Precision Physical Weeding⁵⁰


Laut dieser Studie (JRC 2019) haben die Stickstoffapplikation mit variabler Rate und die Bewässerung mit variabler Rate die höchsten Potenziale zur Reduzierung von THG-Emissionen, gefolgt von Controlled Traffic Farming, Maschinenführung und Pestizidanwendung mit variabler Rate. Der Einsatz von stickstoffhaltigen Düngemitteln durch variable Dosierung kann N₂O-Emissionen aus landwirtschaftlichen Böden und verursachte THG-Emissionen bei der Herstellung von Düngemitteln reduzieren. Eine Bewässerung mit variabler Rate kann die Menge an Wasserbedarf und die Energie reduzieren, die zum Pumpen und Transportieren von Wasser benötigt wird. Controlled Traffic Farming und Maschinenführung können die Routen von Traktoren über Felder optimieren, was den Einsatz von landwirtschaftlichen Betriebsmitteln reduziert (z. B. Saatgut, Kraftstoff) und Bodenverdichtung vermeidet (Bieser 2020).

⁵⁰ Durch entsprechende Sensorik sollen im Jungbestand durch Agrobots Einzelpflanzen identifiziert und im Falle von Beikraut gezielt mechanisch entfernt werden. Dadurch reduziert sich der Einsatz von Pflanzenschutzmitteln.

Laut Bieser et al. (2020) kann das bis 2030 mögliche THG-Reduktionspotenzial durch die Reduktion von Düngemittel und durch variable Stickstoffapplikation mit 2,5 % (pessimistisches Szenario), 5 % (erwartetes Szenario) oder 10 % (optimistischen Szenario) abgeschätzt werden. Die Anwendung (Marktdurchdringung) wird auf 0 % im pessimistischen, 10 % im erwarteten und 20 % im optimistischen Szenario eingeschätzt. Der mögliche Rebound wird allerdings auf 100 % eingeschätzt, da Landwirte durch die maximal erlaubte Ausbringung von Düngemitteln den Output erhöhen können.

Laut der Landwirtschaftskammer Österreich (LK 2017) können durch Precision Farming im Ackerbau bis zu 20 % des Düngers und bis zu 25 % der Treibstoffe eingespart werden. Durch die Wahl des optimalen Reifendrucks kann der Dieselverbrauch bei der Feldarbeit um mehr als 10 % und bei Straßenfahrten um bis zu 15 % reduziert werden.

Tabelle 37: Annahmen für die Quantifizierung – Precision Plant Farming; Quelle: AEA

Precision Plant Farming					
 Referenz-EV/THG	↓ Reduktions- potenzial	Aktuelle Marktdurch- dringung	Marktdurchdringung 2040		
			MIN	MID	MAX
THG-Reduktion Dünger	-15 % THG	0 %	20 %	40 %	60 %
EEV-LW Maschinen	-10 % EEV	5 %	20 %	40 %	60 %
Wichtige Technologien					
<ul style="list-style-type: none"> • Sensoren • KI/Advanced Analytics • Satellitendaten • Drohnen • Roboter (zum Düngen und Ernten, für Pflanzenschutz und Bodenanalyse) 		<ul style="list-style-type: none"> • Semi-autonomie und autonome Fahrzeuge • Hyperspektrale Bildgebung • Digitale Anwendungen und Plattformen • Controlled Traffic Farming • Automatische Reifendruckanpassung • Farmmanagement und Informationssystem 			
Wirkungskette					
Durch Precision Farming kann Düngemittel eingespart werden, dies reduziert die THG-Emissionen durch die Ausbringung von Dünger. Durch digitalisierte optimierte Reifendruckregelung kann der Treibstoffbedarf reduziert werden.					
Rebound-Effekt					
Es werden für die THG-Reduktion durch Dünger 80 % an direkten Rebounds angenommen (100 % aus (Bieser 2020) leicht reduziert). Es werden keine Rebounds für den Energieverbrauch von landwirtschaftlichen Maschinen angenommen.					
Weitere Informationen					
Relevante Quellen					
(Bieser 2020), (JRC 2019), (LK 2017), (LK 2019), (Accenture 2021)					

Laut der Landwirtschaftskammer Österreich (LK 2019) können durch Controlled Traffic Farming/satellitengesteuerte Lenksysteme die Aussaat und sämtliche Kulturarbeiten optimiert werden. Durch präzise Fahrspuren und Arbeitsbreiten kommt es zu einer Einsparung von Betriebsmitteln. Durch Einzeldüsenabschaltung der Pflanzenschutzspritze mit Section Control kann der Spritzmitteleinsatz um 10 % reduziert werden. Auch durch teilflächenspezifische Bewirtschaftung nach Ertragspotenzialkarten auf Basis von Satellitendaten kann die Düngegabe weiter reduziert werden.

Fortschrittliche Analysen von Wetterdaten und Echtzeit-Informationenplattformen werden unverzichtbar sein, um Landwirte über potenzielle Wetteränderungen oder Bedrohungen zu informieren, und können frühzeitig Alarm-signale für Umweltschocks geben. Echtzeit-Informationen, die ihnen über Dashboards auf ihrem Smart-Gerät mitgeteilt werden, können Landwirten helfen, zu reagieren und die Widerstandsfähigkeit von Pflanzen aufzubauen (GeSI 2015). Laut IBM (2012) können durch genauere Wettervorhersagen 25 % der wetterbedingten Ernteausfälle vermieden werden, welche 90 % der gesamten Ausfälle ausmachen.

Laut Accenture (2021) können bis zum Jahr 2030 durch variable Dosiermengen mittels Düngemittel-Applikatoren gekoppelt mit smarter Bodenüberwachung 9 % bis 16 % der CO₂-Emissionen eingespart werden, welche durch Düngung und Kalkung von Böden verursacht werden. Dies ergibt sich aus einem angenommenen Reduktionspotenzial von 30 % und einer Marktdurchdringung in Deutschland heute von 29 % und aus möglichen Marktdurchdringungen von 60 % bis 93 % im Jahr 2030.

3.5.3 Precision Livestock Farming und Zuchtoptimierung

Precision Livestock Farming (Präzisionstierhaltung) zielt darauf ab, die Tierhaltung automatisch zu überwachen, zu modellieren und zu steuern (Tullo 2019). Tullo et al. (2019) bieten einen Überblick über Anwendungen in der Präzisionstierhaltung wie Präzisionsfütterung, Lahmheitserkennung, Echtzeit-Milchanalyse und Fruchtbarkeitsmanagement. Beispielsweise können Daten zu Körpertemperatur und Bewegung von Milchkühen verwendet werden, um den Gesundheitszustand einzelner Kühe zu analysieren und die Fütterung anzupassen (Präzisionsfütterung). Dadurch kann die Emission von Methan (CH₄) aus der enterischen Fermentation reduziert werden. Solche Daten können auch verwendet werden, um Tierkrankheiten (z. B. Lahmheit, Mastitis) zu erkennen oder das Fruchtbarkeitsmanagement zu optimieren (Bieser 2020).⁵¹

Ein weiterer Aspekt, der in Bieser et al. (2020) beschrieben wird, ist, dass Hochleistungsherden (die mit Kraftfutter gefüttert werden) weniger THG-Emissionen pro Produktionseinheit (kg Fleisch, l Milch) verursachen. Um die Produktivität dieser Tiere auf einem hohen Niveau zu halten, sind genaue Informationen über ihren Gesundheitszustand erforderlich. Diese Datenerhebung und -analyse kann sehr arbeitsintensiv sein. Durch die Erfassung dieser Daten mit Sensoren können die Kosten für die Bereitstellung solcher Informationen gesenkt, Probleme früher erkannt und somit mehr Landwirte in die Lage versetzt werden, solche Herden zu verwalten. Die Annahmen, welche Bieser et al. (2020) für die möglichen THG-Effekte von Precision Livestock Farming bis 2030 angeben, sind in Tabelle 38 dargestellt.

Tabelle 38: Annahmen zum THG-Reduktionspotenzial durch Precision Farming in der Tierhaltung für das Jahr 2030 in der Schweiz; Quelle: (Bieser 2020)

	THG-Reduktionspotenzial			Anwendung				Re-bound
	Pessimistic	Expected	Optimistic	Business as Usual	Pes.	Exp.	Opt.	
Precision Feeding	2,5 %	5 %	10 %	9 %	17 %	29 %	49 %	2 %
Mastitis Erkennung von Lahmheit Erkennung und Verwaltung von Fruchtbarkeit	2,5 %	11 %	20 %	9 %	17 %	29 %	49 %	2 %

Laut Accenture (2021) können 5 % bis 9 % der THG-Emissionen in der Tierhaltung durch den Einsatz von Präzisionsfütterungs- und Tierüberwachungssystemen bis 2030 reduziert werden. Dies ergibt sich aus einem Reduktionspotenzial von insgesamt 41 % unter Berücksichtigung der aktuellen Marktdurchdringung von 5 % für Precision Farming in der Tierhaltung in Deutschland und einer möglichen Marktdurchdringung von 17 % bis 27 % bis 2030.

Eine Studie aus Lettland (Trupa 2015) beschreibt, dass optimierte Fütterung von Milchkühen die CH₄-Emissionen pro 1 kg Energy-corrected Milk (ECM)⁵² von 2,5 % bis 15 % reduziert, ohne die Milchproduktion zu beeinträchtigen. Die Methanbildung im Pansen kann durch die Zugabe von hochwertigem Futter minimiert werden. Auch die Futterqualität hat einen wesentlichen Einfluss auf die CH₄-Produktion, da bei schlechter Qualität die Methanproduktion steigt.



Laut Deloitte (2017) können durch Precision Feeding 13 % der THG-Emissionen und durch Smart Animal Health and Welfare 2,5 % der THG-Emissionen in der Fleischproduktion bis 2050 eingespart werden.

⁵¹ Zusätzlich können Melkroboter das Tierwohl erhöhen, da diese individuell mehrmals am Tag in den Melkstand gehen können.

⁵² Energy-corrected Milk (ECM) bestimmt die Energiemenge in der Milch auf Basis des enthaltenen Fetts und Proteins und wird auf 3,5 % Fett und 3,2 % Protein eingestellt.

Tierzucht, welche die natürliche Variation der Methanemissionen ausnutzt, kann zusätzliche Potenziale für THG-Reduktionen in der Viehhaltung kostengünstig und dauerhaft heben. Laut einer Studie der Wageningen University in den Niederlanden (de Haas 2021) kann mit den aktuellen Zuchtzielen bis 2050 mit einer Steigerung der Methanproduktion um 13 % gerechnet werden. Durch selektive Züchtung, mit dem Ziel einer Senkung der Methanintensität, wäre bis 2050 eine Reduktion der Methanproduktion in der Rinderhaltung um 24 % möglich. In der hier vorliegenden Studie werden die Reduktionspotenziale um 50 % verringert, da der Zielhorizont das Jahr 2040 (und nicht 2050) ist.

Tabelle 39: Annahmen für die Quantifizierung – Precision Livestock Farming und Zuchtoptimierung; Quelle: AEA

Precision Livestock Farming und Zuchtoptimierung					
 Referenz-EV/THG	 Reduktionspotenzial	Aktuelle Marktdurchdringung	Marktdurchdringung 2040		
			MIN	MID	MAX
Precision Feeding & Krankheitsfrüherkennung: CH ₄ Großvieh	-5 % bis -30 %	10 %	20 % bei -5 %	35 % bei -16 %	50 % bei -30 %
Zucht: CH ₄ GVE	+6 % bis -12 %	0 %	100 % bei +6 %	0 %	25 % bei -12 %*
Wichtige Technologien					
<ul style="list-style-type: none"> • IoT • Sensoren • Satelliten • KI und maschinelles Lernen • Datenbanken und Datenanalyse • Predictive Analytics • Bilderkennung und bildgebende Diagnostik • Automatisierungs- und Kontrollsysteme • Drohnen und Robotik • Farmmanagement und Informationssystem 			<ul style="list-style-type: none"> • Markerunterstützte Selektion (MAS) • Genetische Vorhersage, Gentransfer • Sexkontrolle • Systematische Kreuzungen • Tieridentifikation (DNA und biometrisch) • In-vitro-Fertilisation und Embryotransfer • Markerunterstützte Paarung • Ultraschall • Multibreed-Bewertung • Auswahlindizes 		
Wirkungskette					
Durch optimierte Fütterung, Krankheitserkennung und Fruchtbarkeitsverwaltung werden Methanemissionen eingespart. Durch das Setzen der Zuchtziele können Methanemissionen gesteigert bzw. gesenkt werden.					
Rebound-Effekt					
Es werden 2 % an direkten Rebounds für Precision Feeding und Krankheitsfrüherkennung angenommen.					
Weitere Informationen					
* Im Max-Szenario wird die Methanproduktion von Nutztieren in Zuchtparametern stark berücksichtigt.					
Relevante Quellen					
(Bieser 2020), (Tullo 2019), (Accenture 2021), (de Haas 2021)					

3.5.4 Vertical Farming und Controlled Environment Agriculture

Vertical Farming erlebt in den letzten Jahren einen großen Hype, allerdings vor kurzem auch Ernüchterung bei manchen Investoren durch hinter der Erwartung zurückbleibende wirtschaftliche Ergebnisse (Gordon-Smith H. 2021). Vereinfacht beschrieben findet Vertical Farming in einem vollständig geschlossenen Gebäude oder Container statt und verwendet künstliches Licht für den ganzjährigen Anbau von Gemüse und anderen hochwertigen Nutzpflanzen. Der bestehende Markt für diese Betriebe ist klein, aber er wächst (Kopf A. 2017) um mehr als 20 % pro Jahr (Azhar A. 2021). Für Vertical Farming können Automatisierungstechnologien und KI-Systeme genutzt werden, um Licht, Wasser und Wärme mit höchstmöglicher Effizienz zuzuführen. Vertical Farming ist allerdings nur ein kleiner Teil des Controlled-Environment-Agriculture-Marktes, Gewächshäuser spielen hier mit einem weltweiten Marktvolumen von über 300 Mrd. USD eine um vieles größere Rolle (Kopf A. 2017). Für die Anwendung von Vertical Farming bzw. der digital unterstützten Produktion in Gewächshäusern kann erwartet werden, dass der Energieverbrauch und die THG-Emissionen steigen. Zusätzlich kann aufgrund mangelnder konkreter, auf Österreich umlegbarer Daten keine quantitative Abschätzung der Effekte auf Energieverbrauch und THG-Emissionen durchgeführt werden. Aus diesen Gründen wird diese Anwendung nicht im Detail bewertet.

In der wissenschaftlichen Fachzeitschrift „Nature“ wurde im Dezember (2021) ein Review-Artikel zum derzeitigen Status von Vertical Farming veröffentlicht: „Current status and future challenges in implementing and upscaling vertical farming systems“ (Delden van S.H. 2021). Aus diesem Artikel werden im Folgenden relevante Passagen zu Umwelt Nachhaltigkeit übersetzt, um einen Überblick über den derzeitigen Stand des Wissens in diesem Bereich wiederzugeben. Der Artikel veranschaulicht die Prinzipien, die für eine Bewertung der Effekte von Vertical Farming auf Energieverbrauch und THG-Emissionen eine Rolle spielen, und zeigt gleichzeitig, dass es hierfür im Moment unzureichende quantitative Untersuchungen bzw. Einschätzungen gibt. Eventuell ist dies dem Umstand geschuldet, dass aus qualitativen Untersuchungen bereits ersichtlich ist, dass es vor allem auf den Energiemix von Strom, Wärme und Transport ankommt und ein Import von Lebensmitteln tendenziell weniger Energieverbrauch verursacht als das Wachstum von Lebensmitteln in Vertical Farms.

Die globalen und regionalen Umweltauswirkungen der Landwirtschaft berücksichtigen Faktoren wie Luft-, Wasser- und Bodenverschmutzung; Bodenerosion; Abholzung; Verlust der biologischen Vielfalt und die Nutzung von Ressourcen wie Land, Wasser, Mineralien und Energie. Eine solche wissenschaftliche Analyse fehlt derzeit für Vertical Farming. Der geschlossene Charakter von Vertical-Farming-Systemen (VFS) scheint ihre direkten Auswirkungen auf die Umwelt zu begrenzen, aber die Pflanzenproduktion in VFS erfordert mehr Energieeinsatz als die Freilandwirtschaft. Zudem sind VFS derzeit in praktisch allen Märkten für die Produktion von Grundnahrungsmitteln wirtschaftlich nicht geeignet. Sie bedienen hauptsächlich Märkte, die qualitativ hochwertige Nutzpflanzen verlangen, die sonst in Gewächshäusern angebaut werden, wie frisches Blattgemüse, Kräuter, Tomaten, Paprika und Zierpflanzen.

Die geschlossene Umgebung von VFS ermöglicht einen mehrschichtigen erdlosen Anbau, eine hohe Produktionsdichte und eine umfassende Kontrolle. Dies erleichtert die lokale Produktion, verhindert Umweltverschmutzung und reduziert den Land-Fußabdruck, was das Potenzial zur Revitalisierung von Böden und zur Erhöhung der Biodiversität eröffnet. Darüber hinaus verhindert die geschlossene Konstruktion von VFS, dass künstliches Licht die Umwelt verschmutzt – ein Problem für die Biodiversität in dichten Gewächshausgebieten. Die geschlossene Konstruktion und die fortschrittlichen HVAC-Systeme von VFS minimieren den Wasserverbrauch und ermöglichen die Wiederverwendung von verdunstetem Wasser. Schließlich kann Wasser die VFS nur als Teil des geernteten Produkts verlassen, was den Wasserverbrauch um ca. 90 % im Vergleich zu Gewächshäusern und um ca. 99 % im Vergleich zum Freiland reduzieren kann. VFS sind jedoch hinsichtlich ihres Potenzials für das Wasserrecycling nicht

einzigartig, da geschlossene Gewächshäuser mit aktiver Kühlung ähnliche Effizienzen erzielen können. Eine hochgradige Wasseraufbereitung sollte theoretisch eine nahezu unbegrenzte Wiederverwendung von Nährlösungen ermöglichen. In diesem Fall würden sich alle Düngemittel, die das System verlassen, in der Kultur selbst befinden und die Düngemittel-Nutzungseffizienz würde sich 100 % nähern. (...)

Es ist nicht bekannt, wie empfindlich die geschlossene Konstruktion von VFS im täglichen Betrieb gegenüber Pflanzenschädlingen und -krankheiten ist. Der Einsatz von Bioziden könnte durch Nützlinge, kontinuierliche Überwachung und sehr strenge Hygienemaßnahmen eliminiert werden, einschließlich durch Schutzkleidung und nicht-chemische Desinfektion von einströmender Luft, Wasser, Saatgut und anderen Materialien. Obwohl diese Maßnahmen bis zu einem gewissen Grad von Vorteil sind, ist das Streben nach einer vollständig sterilen Umgebung weder wünschenswert noch realistisch, da eine durch Krankheitserreger anfällige Umgebung entstehen könnte. Im Gegensatz zur landläufigen Meinung liefert der erdlose Anbau keine sterile Rhizosphäre. Es ist darauf zu achten, dass pathogene Infektionen und die Bildung von toxischen Wurzelexsudaten (Autotoxizität) und Salinität (d. h. NaCl-Ansammlung aus verschmutztem Wasser oder Düngemitteln) vermieden werden. Biologische Kontrolle und Biostimulanzien stecken in der vertikalen Landwirtschaft noch in den Kinderschuhen, könnten aber in dieser Hinsicht helfen. Es gibt viele Beispiele für Biostimulanzien, darunter wachstumsfördernde Substanzen wie Huminsäure oder Silizium und nützliche Mikroorganismen wie Biodünger, die die Widerstandsfähigkeit der Pflanzen erhöhen und ungünstige Bedingungen lindern. Es gibt jedoch wenig Beweise dafür, dass Biostimulanzien unter optimalen Wachstumsbedingungen von Vorteil sind. Die Manipulation des Lichtspektrums könnte eine weitere Methode zur Modulation der Pflanzenimmunität sein, da dies auch die Resistenz gegen Krankheitserreger und Insekten erhöhen kann. Zum Beispiel tötet UVB-Strahlung Krankheitserreger teilweise ab, und ein hohes Rot:Dunkelrot-Verhältnis kann Abwehrsignale aktivieren (zum Beispiel die Jasmon- und Salicylsäurewege), wodurch die Widerstandsfähigkeit der Pflanzen verbessert wird. Insgesamt gibt es für den Pflanzenschutz innerhalb von VFS viele Überlegungen zur Systemoptimierung und Bereiche für zukünftige Forschung.

Die lokale Produktion kann die Lieferketten und den Zeitraum zwischen Ernte und Einkauf verkürzen. Dies könnte Lebensmittelverschwendung reduzieren, indem Transportverderb aufgrund inkonsistenter Kühlpraktiken und Störungsschäden minimiert wird. Kurze Transportwege führen zu einer längeren und besser reproduzierbaren Haltbarkeit und helfen, den Hausmüll einzudämmen. Während Null-km oft als großer Vorteil bei der Reduzierung von Emissionen angesehen werden, deuten aktuelle Daten darauf hin, dass dies eine Überschätzung ist. Der Transport hat einen relativ geringen Beitrag zum gesamten CO₂-Fußabdruck der meisten Produkte (< 10 %) und der gesamten Ernährung (ca. 6 %). Der Bau neuer Gebäude für VFS kann erhebliche Umweltauswirkungen haben, die jedoch unseres Wissens nicht quantifiziert wurden. Darüber hinaus kann der vorübergehende Charakter von VFS-Startups diese Auswirkungen durch häufige Insolvenzen, die investierte Ressourcen verschwenden, noch verstärken.

Die Vorteile von VFS gehen in erster Linie zulasten der Energie, die hauptsächlich durch die Notwendigkeit bestimmt wird, Lichtenergie an die Pflanzen zu liefern und diese Energie später mithilfe von HLK als sensible und latente Wärme zu extrahieren. An der Physik dieses Problems führt kein Weg vorbei, aber geplante Verbesserungen bei Beleuchtungseffizienz, Umgebungskontrollstrategien, Produktionssystemdesigns und Verbesserungen bei Pflanzen können den Energieverbrauch senken und die Rentabilität von VFS erhöhen. Die Umweltauswirkungen des Energieverbrauchs von VFS hängen von der Methode der Stromerzeugung „[und den Emissionen der genutzten Stromquellen; Anm. AEA] ab. (...) Der Anteil erneuerbarer Energien an der Stromerzeugung nimmt langsam aber stetig zu und wird den zukünftigen Energiemix prägen. Die Verwendung von Solarmodulen zur Stromversorgung von VFS erfordert jedoch eine beträchtliche Menge an Landfläche.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass der geschlossene Charakter von VFS einen Kreislaufsystemansatz ermöglicht, der die Auswirkungen des Einsatzes von Pestiziden, Wasser und Düngemitteln im Vergleich zu Freiland- und

normalen Gewächshäusern verringert. Die Einhaltung hoher Hygienestandards erhöht jedoch typischerweise die Umschlagsrate von Einwegartikeln mit negativen Auswirkungen auf die Umwelt. Die tatsächliche ökologische Nachhaltigkeit der vertikalen Landwirtschaft hängt stark von den lokalen Methoden der Energieerzeugung und der Ressourcenverfügbarkeit ab. VFS haben großes Potenzial an Standorten, an denen die Energieerzeugung nachhaltig ist, Ökosysteme empfindlich sind, Wasser und Land knapp sind und die Verbraucheranforderungen an eine gleichbleibende Produktqualität hoch sind. (Delden van S.H. 2021), Übersetzung durch AEA)

3.5.6 Lab-grown Meat / In-vitro-Fleisch

In der medialen Berichterstattung wird über „In-vitro-Fleisch“ zunehmend berichtet. Auch die erheblichen und steigenden Investitionen in entsprechende Unternehmen sind ein Indikator für die möglichen weitreichenden Folgen dieser technischen Innovation. Allerdings steckt die In-vitro-Fleischherstellung durch die Kultivierung von Zellen noch in den Anfängen (UBA DE 2019). Das erste kommerziell verfügbare und im Jahr 2020 regulatorisch genehmigte In-vitro-Hühnerfleisch wird in Singapur angeboten (BBC 2020).

Die mögliche weitere Marktdurchdringung wird von Expertinnen und Experten von extrem kritisch (Humbird 2021)⁵³, (Fassler 2021)) bis sehr optimistisch bewertet (Kearney 2020). Die Einschätzungen der möglichen Marktdurchdringung reichen von 0 % bis 35 % im Jahr 2040. Auf Basis der Literaturrecherche erscheint die Produktion von Lab-grown Meat nur für ein Hochpreissegment für das Jahr 2040 als realistisch. Aus diesem Grund wird die Marktdurchdringung in der vorliegenden Analyse konservativ gewählt.

Das Umweltbundesamt in Deutschland (UBA DE 2019) hat den derzeitigen Stand des Wissens bezüglich der Effekte von Lab-grown Meat auf THG-Emissionen und den Energieverbrauch wie folgt zusammengefasst:

„Treibhausgas-Emissionen ergeben sich bei der Herstellung von In-vitro-Fleisch unter anderem aus dem Betrieb von Bioreaktoren sowie der Produktion der Nährmedien. Die Studien legen verschiedene Parameter über die Größe, die Funktionsweise der Bioreaktoren sowie die Art des verwendeten Nährmediums zugrunde (vgl. Kapitel 6.4.2), da bis jetzt keine Bioreaktoren für die großskalige Produktion existieren. Die ersten Studien zu den Umweltauswirkungen von In-vitro-Fleisch kamen noch zu äußerst positiven Ergebnissen hinsichtlich der THG-Emissionen. So kalkulieren Tuomisto und Teixeira de Mattos (2011) Einsparungen zwischen 78 und 96 % bei den THG-Emissionen im Vergleich zur konventionellen Fleischproduktion, je nachdem, ob Best-Case- oder Worst-Case-Szenarien bezüglich der Effizienz der Bioreaktoren und des Wachstumsfaktors berücksichtigt werden. Sie schätzen einen durchschnittlichen THG-Fußabdruck von 2,2 kg CO₂-Äquivalente pro kg In-vitro-Fleisch. Mit den gleichen Parametern wurde die Abschätzung für 27 Länder der Europäischen Union durchgeführt (Tuomisto & Roy, 2012); es ergab sich ebenfalls eine Einsparung von bis zu 43 % bei den THG-Emissionen im Vergleich zu konventionellen Tierprodukten. Neuere Studien gehen von wesentlich höheren THG-Emissionen aus; zuvor getroffene optimistische Annahmen bezüglich des Nährmediums und der Modellierung der Bioreaktoren wurden nun modifiziert. So ergibt sich ein Fußabdruck von 0,75 kg CO₂-Äquivalenten pro 100 g In-vitro-Fleisch (Mattick et al., 2015a). Dieser Wert ist höher als beim Schwein (0,41 kg CO₂-Äquivalente pro 100 g) und Huhn (0,23 kg), aber deutlich geringer als beim Rindfleisch mit 3,5 kg CO₂-Äquivalenten pro 100 g. In einer Sensitivitätsanalyse zeigt sich außerdem, dass die Werte je nach Ausgangsparametern stärker variieren und auch noch steigen können.



Teils ergeben sich sogar noch höhere THG-Emissionen. In einem Szenario, dass das obere Ende der Sensitivitätsanalyse in Mattick et al. (2015a) modelliert, ergibt sich ein Fußabdruck von 25 kg CO₂-Äquivalenten pro 100 g In-vitro-Fleisch (Lynch & Pierrehumbert, 2019). Zu den Annahmen zählen, dass am Ende der Proliferationsphase niedrigere Zelldichten als während der Proliferationsphase erreicht werden; dass in der Differenzierungsphase kein weiteres Wachstum von Biomasse erreicht wird; dass die Gebäudegröße und der Energiefußabdruck der Bioproduktionsanlage eher mit einer pharmazeutischen Anlage als mit einer Brauerei vergleichbar sind. Diese Annahmen decken sich auch mit Zahlen aus weiteren antizipatorischen Ökobilanzierungen, welche kalkulieren, dass sich aus 100 g In-vitro-Fleisch ca. 2,3 kg CO₂-Äquivalente ergeben, was deutlich höher ist als bei Hühnerfleisch, wo der Wert zwischen 0,38 und 0,43 kg CO₂-Äquivalenten liegt (Smetana et al., 2015a)⁴⁶.

⁵³ Die Studie von Humbird (2021) ist eine sehr gute und empfehlenswerte technische und wirtschaftliche Analyse über Lab-grown Meat.

Bisher basieren diese Vergleiche auf Kohlendioxid-Äquivalenten (CO₂e), welche die Emissionen verschiedener Treibhausgase in Bezug zu Kohlendioxid bringen. Darüber hinaus wurden auch die potenziellen Klimaauswirkungen von In-vitro-Fleisch und Rindfleisch unter Verwendung eines atmosphärischen Modellansatzes kalkuliert – ein einfaches Klimamodell, das das unterschiedliche Verhalten von Kohlendioxid (CO₂), Methan (CH₄) und Distickstoffoxid (N₂O) simuliert (Lynch und Pierrehumbert (2019). Die Autoren gehen davon aus, dass CO₂-Äquivalente als Vergleichsgrundlage unzureichend seien: Einzelne Gase würden sich sowohl in der Menge unterscheiden, in der sie die atmosphärische Energiebilanz verändern (Strahlungsantrieb), als auch in der Zeitspanne, wie lange sie in der Atmosphäre bestehen bleiben. In ihrem Modell werden verschiedene Fußabdrücke der Züchtung von Fleisch- und Rindfleischsystemen unter drei alternativen Verbrauchspfaden getestet und die Temperatureinflüsse unter verschiedenen Produktions- und Verbrauchsszenarien in allen Zeiträumen mit 1.000 Jahren verglichen (Lynch & Pierrehumbert, 2019). Insgesamt zeigt sich, dass die Wirkung der Produktion von In-vitro-Fleisch nicht per se immer effizienter als die Produktion von Rindfleisch ist: Während der Beitrag von In-vitro-Fleisch für die Erderwärmung ausschließlich von der Produktion von CO₂ abhängt, das in der Atmosphäre akkumuliert, hängt der Beitrag des Rindfleisches auch stark von der Produktion von CH₄ ab, das nicht akkumuliert: In vielen Szenarien überholt das THG-Potenzial von In-vitro-Fleisch das des Rindfleisches.

Fast die gesamte Energie bei der Herstellung von In-vitro-Fleisch wird für industrielle Prozesse benötigt, d. h. für Belüftung, Mischung und Temperaturregulierung während der Kulturphase (Mattick, Landis & Allenby, 2015; Tuomisto et al., 2014). Anfangs wurden noch Energieeinsparungen zwischen 7 und 45 % bei der Herstellung von In-vitro-Fleisch im Vergleich mit konventionellem Fleisch berechnet (Tuomisto & Teixeira de Mattos, 2011). Aktuelle Studien sehen dies wesentlich anders. Hier liegt der Verbrauch nicht erneuerbarer Energien bei der Herstellung von 100 g In-vitro-Fleisch (FE) zwischen 29,07 und 37,3 MJ, höher als bei der Produktion von Hühnerfleisch (zwischen 5,164 und 6,34 MJ) (Smetana et al., 2015a, 2015b). Auch weitere Studien kalkulieren, dass der Energieverbrauch bei der Herstellung von In-vitro-Fleisch 35 % höher ist als bei der Produktion von Rindfleisch und fast viermal so hoch wie bei der Produktion von Geflügelfleisch (Mattick et al., 2015a). Diese Berechnungen basieren auf der Annahme, dass Produktionsanlagen eine ähnliche Mischung von Brennstoffen verwenden würden wie diejenigen, die in der Malzgetränkeindustrie verwendet werden. Diese Kraftstoffmischung besteht hauptsächlich aus Erdgas (43 %), Kohle (33 %) und Strom aus dem US-Stromnetz (16 %) (Galitsky, Martin, Worrell & Lehmann, 2003). Würden erneuerbare oder niedrigere Kohlenstoffe eingesetzt, würde die Herstellung von In-vitro-Fleisch in geringerem Maße zur globalen Erwärmung beitragen.“ (UBA DE 2019)

Tabelle 40: Annahmen für die Quantifizierung – Lab-grown Meat; Quelle: AEA

Lab-grown Meat/In-vitro-Fleisch					
 Referenz-EV/THG	 Reduktions- potenzial	Aktuelle Marktdurch- dringung	Marktdurchdringung 2040		
			MIN	MID	MAX
THG Viehzucht-Fleisch	-34 % bis -80 %	0 %	0% bei -34 %	2,5% bei -57 %	5% bei -80 %
Wichtige Technologien					
<ul style="list-style-type: none"> • Sensoren • Automatisierte Steuerung 		<ul style="list-style-type: none"> • Künstliche Intelligenz • Big Data & Cloud Computing 			
Wirkungskette					
Durch Lab-grown Meat kann es zu einer Reduktion der Anzahl von Rindern für die Fleischzucht kommen.					
Rebound-Effekt					
Es werden keine Rebound-Effekte angenommen.					
Weitere Informationen					
Das Reduktionspotenzial von -34 % wird auf Grundlage der Angaben bzgl. der THG-Emissionen für Rindfleisch bzw. Lab-grown-Rindfleisch (2,3 kg/3,5 kg CO ₂ -Äquivalent) berechnet (UBA DE 2019). -80 % scheint für die fast ausschließliche Bereitstellung von erneuerbaren Energien für die Produktion als angemessen. Effekte auf den Energieverbrauch der Lebensmittelindustrie werden vernachlässigt.					
Relevante Quellen					
(Humbird 2021), (UBA DE 2019)					

4 Zusammenfassung

Die vereinfachten Ergebnisse für die Szenarien Min, Mid und Max sowie die Rebounds für die einzelnen Anwendungen werden je Sektor in den folgenden Tabellen zusammengefasst. Die dargestellten Brutto-Effekte sind für eine additive Betrachtung hergeleitet. Im nächsten Bericht werden diese Ergebnisse separat für Energieverbrauch und THG-Emissionen auf das Referenzszenario 2040 bezogen.

Tabelle 41: Übersicht der Brutto-Effekte 2040 für die Digitalisierungsanwendungen im Industriesektor; Quelle: AEA

Anwendung	Referenz	Brutto-Effekt 2040			Direkte Rebounds
		MIN	MID	MAX	
Prozessautomatisierung	EV Standmotoren & Prozessenergie	-3,8 %	-5,3 %	-6,8 %	20 %
Simulation & Digitaler Zwilling	EV Standmotoren & Prozessenergie	-2,5 %	-4,0 %	-5,5 %	20 %
Additive Fertigung	EV Flugverkehr	-1,5 %	-2,5 %	-3,5 %	0 %
	EV Lkw	-0,5 %	-1,0 %	-1,5 %	0 %
	EV Standmotoren	-0,1 %	-0,2 %	-0,3 %	0 %
Gebäudeautomatisierung	EV Raumwärme & Warmwasser	-6,0 %	-8,0 %	-11,0 %	10 %
	EV Kleingeräte, Beleuchtung & EDV	-3,0 %	-4,0 %	-5,5 %	10 %

Tabelle 42: Übersicht der Brutto-Effekte 2040 für die Digitalisierungsanwendungen im Verkehrssektor; Quelle: AEA

Anwendung	Referenz	Brutto-Effekt 2040			Direkte Rebounds
		MIN	MID	MAX	
Autonomes Fahren	EV Pkw	0,0 %	-0,8 %	-1,6 %	+2 % km
	EV Lkw	0,0 %	-6,0 %	-11,9 %	+2 % km
	EV Busse	0,0 %	-3,2 %	-6,3 %	0 %
Mobility-as-a-Service	Motorisierter Individualverkehr [Personenkilometer - Mrd. Pkm]	-1,0	-2,0	-4,0	0 %
	Öffentlicher Personennahverkehr [Personenkilometer - Mrd. Pkm]	+1,0	+2,0	+4,0	0 %
Ride-Sharing	EV Pkw	-0,2 %	-0,7 %	-1,7 %	0 %
Smart Logistics	EV Lkw	-3,2 %	-7,2 %	-11,2 %	0 %
Automatisierter Schienengüterverkehr	EV Bahn (Verlagerungseffekt)	0,0 %	+1,4 %	+2,7 %	0 %
	EV Lkw (Verlagerungseffekt)	- Aliquot dem Effekt bei EV Bahn			0 %
	EV Bahn (Energieeffizienz-Effekt)	-4,0 %	-8,0 %	-12,0 %	0 %

Tabelle 43: Übersicht der Brutto-Effekte 2040 für die Digitalisierungsanwendungen im Haushaltssektor; Quelle: AEA

 Anwendung	 Referenz	Brutto-Effekt 2040			Direkte Rebounds
		MIN	MID	MAX	
Smart Home	EV Raumwärme & Warmwasser	-5,0 %	-7,0 %	-9,0 %	30 %
	EV Kleingeräte, Beleuchtung & EDV	-1,3 %	-1,8 %	-2,3 %	30 %
IKT-Nutzung	EV Beleuchtung & EDV	0,0 %	-14,0 %	-28,0 %	Inkl.

Tabelle 44: Übersicht der Brutto-Effekte 2040 für die Digitalisierungsanwendungen im Dienstleistungssektor; Quelle: AEA





 Anwendung	 Referenz	Brutto-Effekt 2040			Direkte Rebounds
		MIN	MID	MAX	
Gebäudeautomatisierung	EV Raumwärme & Warmwasser	-9,0 %	-12,0 %	-16,5 %	10 %
	EV Kleingeräte, Beleuchtung & EDV	-3,0 %	-4,0 %	-5,5 %	10 %
Homeoffice	Pkw km	-1,0 %	-2,1 %	-3,2 %	0 %
	DL-EV Raumwärme (Bürofläche)	-1,0 %	-2,5 %	-4,0 %	0 %
	EV Beleuchtung & EDV	+6,0 %	+13,0 %	+20,0 %	0 %
Tele-Conferencing	EV Pkw	-0,3 %	-0,7 %	-1,0 %	Inkl.
	EV Inlandsflüge	-2,4 %	-5,2 %	-8,0 %	0 %
	EV Auslandsflüge	-0,6 %	-1,3 %	-2,0 %	0 %
E-Commerce	Pkw [Fahrzeugkilometer – Mrd. Fzgmt]	-0,53	-1,05	-1,58	Inkl.
	Leichte Nutzfahrzeuge [Fahrzeugkilometer – Mio. Fzgmt]	+88	+175	+263	Inkl.
E-Learning, E-Banking, E-Health, E-Governance	Pkw [Fahrzeugkilometer - %]	-0,5 %	-1,4 %	-2,4 %	0 %
IKT am Arbeitsplatz	EV Beleuchtung & EDV	0,0 %	-3,5 %	-7,0 %	Inkl.
Rechenzentren	EV Beleuchtung & EDV [TWh]	+0,05	+0,5	+1,0	Inkl.
	EV Raumwärme [TWh]	-0,1	+0,07	+0,25	Inkl.
Telekommunikations-Infrastruktur	EV Beleuchtung & EDV [TWh]	+0,12	+0,65	+1,08	Inkl.

Tabelle 45: Übersicht der Brutto-Effekte 2040 für die Digitalisierungsanwendungen im Landwirtschaftssektor; Quelle: AEA

 Anwendung	 Referenz	Brutto-Effekt 2040			Direkte Rebounds
		MIN	MID	MAX	
Precision Plant Farming	THG-Dünger	-3,0 %	-6,0 %	-9,0 %	80 %
	LW EV – Verkehr	-1,5 %	-3,5 %	-5,5 %	0 %
Precision Livestock Farming	THG-Viehhaltung	-0,5 %	-4,0 %	-12 %	2 %
Zuchtoptimierung	THG-Viehhaltung	+6,0 %	0,0 %	-3,0 %	0 %
Vertical Farming	EV / THG	Negativer Gesamteffekt – nicht genau bewertet			
Lab-grown Meat	THG-Rinderhaltung – Fleisch	0,0 %	-1,4 %	-4,0 %	0 %

Digitalisierungsanwendungen benötigen eine Vielzahl an einzelnen Technologien. Die möglichen Effekte der einzelnen Technologien kann auf der hier angewendeten Betrachtungsebene nicht analysiert werden. Die Bedeutung der Technologien wurde stattdessen in einem Netzwerkdiagramm, in Abbildung 21, illustriert. Diese Abbildung zeigt Digitalisierungsanwendungen (grün) und damit verbundene ausgewählte Digitalisierungstechnologien (rosa). Die Größe der Technologie-Knoten (rosa) spiegelt die Anzahl der Verbindungen zu Anwendungen wieder.⁵⁴ Die Zuordnung der Technologien zu den Anwendungen erfolgt auf Basis der durchgeführten Recherchen und Experteninterviews. Durch diese Abbildung lässt sich intuitiv erfassen, dass die Technologien „KI“, „Sensoren/Aktuatoren“ und „Big Data“ eine wichtige Grundlage für viele Anwendungen darstellen und dass in Summe viele digitale Technologien für die untersuchten Digitalisierungsanwendungen notwendig sind.

⁵⁴ Die Anordnung der Knoten erfolgt über einen kräftebasierten Layout-Algorithmus, wodurch Knoten mit einer stärkeren Vernetzung auch räumlich näher beisammen liegend abgebildet werden. Häufig vernetzte Knoten finden sich tendenziell in der Mitte der Abbildung wieder, wohingegen weniger gut vernetzte Knoten beziehungsweise hauptsächlich untereinander vernetzte Knotengruppen eher an den Rand rücken (z.B. der Cluster „Autonomes Fahren“ unten rechts).

5 Anhang Methodik

Das Ziel dieser Studie ist es, einen Überblick über die mögliche Größenordnung des Einflusses sehr unterschiedlicher IKT- und Digitalisierungstechnologien und Anwendungen auf den Energieverbrauch und die Treibhausgasemissionen der Sektoren Industrie, Verkehr, Haushalte, Dienstleistungen und Landwirtschaft⁵⁵ zu geben. In Arbeitspaket 3 werden dazu qualitative Szenarien entwickelt und diese für eine erste Einschätzung über mögliche zukünftige Entwicklungen der Digitalisierung in Österreich quantifiziert. Der Fokus liegt hierbei auf den Auswirkungen der Digitalisierung auf Energieverbrauch und THG-Emissionen. Mögliche wirtschaftliche und soziale Auswirkungen der Digitalisierung werden in diesem Projekt nicht untersucht.

Die Digitalisierung beeinflusst den Energieverbrauch sowohl direkt und effektiv (Spill-over-Effekte) als auch über die Nutzung der notwendigen Infrastruktur.⁵⁶ Zusätzlich werden die zu erwartenden Rebound-Effekte berücksichtigt.⁵⁷ Die direkte Wirkung umfasst den Energieverbrauch, den die Technologie selbst verursacht. Hierfür ist auch die Nutzung der erforderlichen Infrastruktur z. B. Rechenzentren und Datennetze relevant. Effektive Wirkungen sind u. a. indirekte Effekte durch die Nutzung der Technologie/Anwendung. Rebound-Effekte sind unterschiedliche Effekte, die dazu führen, dass das Einsparpotenzial von Effizienzsteigerungen nicht oder nur teilweise verwirklicht werden kann. Die verstärkte Nutzung von Homeoffice beeinflusst zum Beispiel sowohl direkt den Energieverbrauch im Haushalt (erhöhte Betriebsdauer der Computer) und im Büro (reduzierter Betrieb der Computer) als auch den Energieverbrauch im Transportbereich durch eine Reduktion des Berufsverkehrs. Mögliche Rebounds wären zusätzliche Fahrten für Einkäufe (nachdem diese nicht mehr am Pendelweg erfolgen) oder eine Veränderung der zukünftigen durchschnittlichen Wohnfläche pro Person in privaten Haushalten (da ein zusätzlicher Wohnraum für das Homeoffice bei zukünftigen Wohnbauten in bestimmten Segmenten eingeplant wird). Ein anderes Beispiel ist der Einsatz von Smart Meter. Der Energieverbrauch der Smart Meter ist der direkte Effekt. Mögliche Verhaltensänderungen aufgrund aktueller Information über den Energieverbrauch wären ein indirekter/effektiver Effekt. Rebounds wären die Anschaffung zusätzlicher elektrischer Geräte, nachdem die Stromausgaben gesunken sind.

Im Weiteren wird zuerst die Szenarien-Logik beschrieben und ein Ausblick auf den nächsten Arbeitsschritt, die tatsächliche Quantifizierung in Szenarien, gegeben. Danach wird ausgeführt, wie die quantitativen Einschätzungen gebildet und validiert wurden. Grundsätzlich werden die Szenarien basierend auf den heute bekannten verfügbaren und auch in Entwicklung befindlichen Technologien in einem Austausch mit Stakeholdern und Expertinnen und Experten aus unterschiedlichen Bereichen entwickelt. Dabei werden erwartbare Auswirkungen, die der großflächige Einsatz dieser Technologien auf das Leben haben kann, in qualitativer Weise berücksichtigt.

⁵⁵ Der Sektor Energie mit den Bereichen Energieerzeugung, -verteilung und -speicherung wird in diesem Projekt nicht betrachtet.

⁵⁶ Horner et al. (2016) fassen fünf Studien für Taxonomien von IKT-Effekten zusammen. Die vorliegende Studie untersucht nur die Energie und die THG-Emissionen des Betriebs, die Einsparungen durch Effizienz und Substitution sowie direkte Rebounds. Graue Energie bzw. THG (Embodied Energy) und Energie für Entsorgung liegen außerhalb der Systemgrenzen dieser Analyse. Ebenso werden indirekte und strukturelle Rebounds sowie systemweite Transformationen in der vorliegenden Untersuchung nicht betrachtet.

⁵⁷ Nicht berücksichtigt werden die Herstellung und der Transport von Technologien und der dafür erforderlichen Materialien.

5.1 Szenarien

5.1.1 Allgemeiner Ansatz

Es gibt unterschiedliche methodische Ansätze, um Umweltauswirkungen von IKT und Digitalisierung abzuschätzen (Coroama V. 2020). Da in dem vorliegenden Projekt mehr als 20 Technologien und Anwendungen untersucht werden, beruht die Analyse teilweise auf vereinfachten Annahmen und groben Methoden.

Die Untersuchung umfasst sowohl die Optimierung bestehender Technologien und Anwendungen als auch deren Substitution durch neue Technologien und Anwendungen. Zeitlich werden vergangene Effekte von IKT und Digitalisierung nicht betrachtet. Stattdessen wird im Rahmen einer Modellierung für Energieverbrauch und THG-Emissionen ein Trendszenario (WOM – without measures), eine hypothetische Baseline (Referenzszenario) und mögliche Digitalisierungsszenarien (Min, Mid, Max) bis zum Jahr 2040, auf Basis des Jahres 2019, gebildet (siehe Abbildung 22).

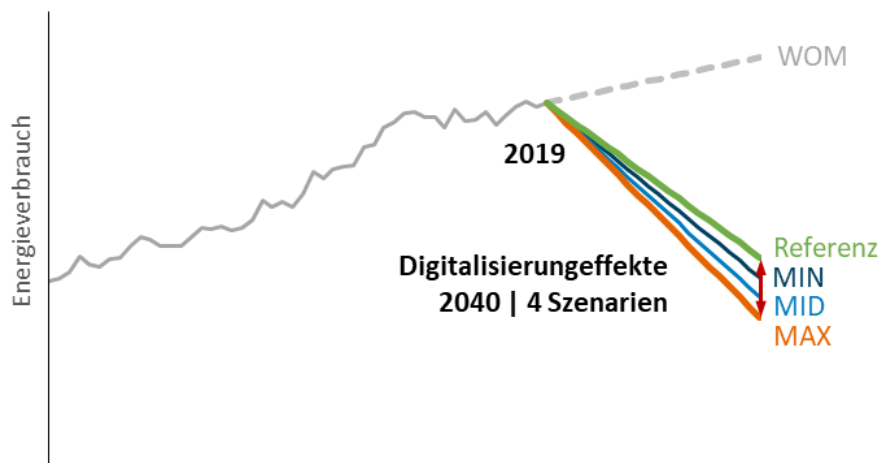


Abbildung 22: Schematische Darstellung der verwendeten Szenarien; Quelle: AEA

5.1.2 Digitalisierungsszenarien

Die zukünftige Entwicklung und Ausprägung der Digitalisierung ist naturgemäß von großen Unsicherheiten behaftet, da sowohl die Verfügbarkeit und die Eigenschaften von Digitalisierungstechnologien als auch deren Akzeptanz und Anwendung durch Gesellschaft und Wirtschaft im Moment nur abgeschätzt werden können. Diese Unsicherheiten betreffen hauptsächlich die derzeit in unterschiedlichen Stadien der Entwicklung befindlichen Technologien, deren konkrete Eigenschaften nur grob abgeschätzt werden können. Aber auch bereits verfügbare Technologien sind von Unsicherheiten betroffen, da deren Auswirkungen auf das Energiesystem zu einem wesentlichen Teil von Verhaltensänderungen abhängen, die vorab nicht quantifiziert werden können. Die Unsicherheiten bei verfügbaren Technologien werden durch die Entwicklung einer Bandbreite von Szenarien berücksichtigt. Noch in Entwicklung befindliche Technologien werden nur in sehr begrenztem Maß berücksichtigt, da signifikante Marktdurchdringungen bis 2040 hauptsächlich bei bereits kommerziell verfügbaren Technologien und Anwendungen erwartet werden.⁵⁸ Es werden Szenarien für niedrige, mittlere und hohe Ausprägung gebildet – Min-, Mid-, Max-Szenarien. Diese Szenarien erlauben einen Austausch mit Stakeholdern und Expertinnen und

⁵⁸ Aus diesem Grund wurden in den Szenarien keine Variationen der Technologiereifegrade (TRL) durchgeführt.

Experten, um eine aussagekräftige Bandbreite an Ergebnissen hinsichtlich der Änderungen des Energieverbrauchs und der THG-Emissionen zu ermitteln. Für diese Szenarien werden bereits Barrieren für den Markteintritt und die Marktdurchdringung berücksichtigt. Dafür wird, soweit möglich, auf einschlägige Literatur zurückgegriffen. Bei Anwendungsfällen, für welche keine entsprechende Literatur verfügbar ist, wird dies durch Schätzungen von Experten und Expertinnen sowie Fermi-Ableitungen ergänzt. Das Referenzszenario wird im nächsten Bericht D4.1 beschrieben.

Tabelle 46: Charakteristika der im Projekt entwickelten Szenarien; Quelle: AEA

Szenario	Charakteristik
DigAT-Min	Hohe Barrieren, niedrige Marktdurchdringung
DigAT-Mid	Mittlere Barrieren, mittlere Marktdurchdringung
DigAT-Max	Niedrige Barrieren, hohe Marktdurchdringung

5.1.3 Struktur der Berechnungen

Zur Berechnung wird eine Struktur gewählt, die wesentliche Auswirkungen verschiedener Digitalisierungstechnologien in möglichst einfacher Weise systematisch erfasst. Grundsätzliche Orientierung geben dabei die sektoralen Strukturen der Energiebilanz und der Nutzenergieanalyse der Statistik Austria sowie des Klimaschutzgesetzes (Tabelle 47). Damit wird es möglich sein, die erhaltenen Ergebnisse mit den Werten bestehender Energieszenarien in Relation zu setzen bzw. zu vergleichen. Die Szenarien werden separat für diese strukturelle Unterteilung entwickelt.

Tabelle 47: Strukturen von Energiebilanz (Statistik Austria 2020b), Nutzenergieanalyse (Statistik Austria 2020c) und Klimaschutzgesetz (BGBl. I Nr. 106/2011 2011); Quelle: AEA

Energiebilanz	Nutzenergieanalyse	Klimaschutzgesetz
Öffentliche und private Dienstleistungen	Raumheizung und Klimaanlage	Energie und Industrie (Nicht-Emissionshandel)
Private Haushalte	Dampferzeugung	Verkehr
Landwirtschaft	Industrieöfen	Gebäude
Produzierender Bereich (13 Branchen)	Standmotoren	Landwirtschaft
Verkehr (5 Subsektoren)	Traktion	Abfallwirtschaft
	Beleuchtung und EDV	Fluorierte Gase
	Elektrochemische Zwecke	

5.2 Fermi-Abschätzungen

Die Trennung in unterschiedliche Untersektoren bzw. Nutzenergiekategorien erlaubt es, vereinfachte Fermi-Abschätzungen für die einzelnen Technologien und Anwendungen durchzuführen. Fermi-Probleme sind Probleme, für die es noch keine quantitative Abschätzung und gleichzeitig keine verfügbaren Daten gibt. Für die Lösung des Problems wird die Fragestellung in überprüfbar bzw. abschätzbar Teilfragen bzw. Informationen zerlegt. Ein Beispiel für diesen Lösungsansatz wird hier für den Stromverbrauch der Smart Meter in Österreich dargestellt:

- Laut E-Control sollen in Österreich 5 Millionen Smart Meter zum Einsatz kommen (manche Kunden haben mehr als einen Zähler).
- Laut EU-Richtlinie sollen bis 2022 mindestens 40 % (bzw. bis 2024 95 %) der privaten Haushalte in Österreich mit Smart Meter ausgestattet sein. Es wird angenommen, dass dies im gleichen Ausmaß bei öffentlichen und privaten Dienstleistungen und Industriebetrieben zur Anwendung kommt.
- Im Monitoring-Bericht der E-Control (E-Control 2021) wird der Ausrollungsgrad Ende 2020 mit 29,9 % angegeben.
- Eine französische Studie hat den Strombedarf von einem typischen Smart Meter mit 15–17 kWh pro Anschluss pro Jahr angegeben (Mittelwert 16 kWh/Jahr). Dies entspricht einem Verbrauch von 1,75–2 Wh jede Stunde und damit einer durchschnittlichen und realistischen Dauerleistung von 1,75–2 W (Bertholon, 2015).
- Mit all diesen Angaben kann der Strombedarf für Smart Meter im Jahr 2020 mit 24 GWh (2022 mit 32 GWh und 2024 mit 76 GWh) abgeschätzt werden.

Daten, die für die Berechnung der Szenarien erforderlich sind, jedoch nicht in der erforderlichen Struktur oder Detailtiefe verfügbar sind, werden sowohl für das Referenzszenario als auch die unterschiedlichen Digitalisierungsszenarien durch Fermi-Abschätzungen ermittelt. Sowohl der direkte Energieverbrauch der Endnutzer:innen als auch der Infrastrukturverbrauch werden dabei anhand der Anzahl der Komponenten und ihrer jeweiligen Betriebsstunden und spezifischen Verbräuche berechnet. Die Berechnung der effektiven Wirkung von Energieverbrauch und Treibhausgasemissionen folgt einem kaskadischen Schema, welches in Tabelle 48 beschrieben ist.

Tabelle 48: Stufen der kaskadischen Berechnungsmethodik der effektiven Auswirkungen; Quelle: AEA

Arbeitspaket	Beschreibung	Beispiele
Nachfragetreiber und Rebound	<ul style="list-style-type: none"> • Was treibt den Energieverbrauch? • Welche Energiedienstleistung wird aufgrund des Treibers nachgefragt? • Wie hoch ist der zu erwartende Rebound in der Nachfrage? 	<ul style="list-style-type: none"> • Bevölkerungsentwicklung, Wirtschaftsaktivität/Wertschöpfung • Mobilitätsnachfrage je Person pro Jahr, Frachtverkehrsnachfrage je Wirtschaftsleistung pro Jahr, Wohnfläche pro Person, Energieintensität in den Sektoren je Wirtschaftsaktivität oder Wertschöpfung
Spezifischer Energieverbrauch, Energieeffizienz, und Rebound	<ul style="list-style-type: none"> • Wie viel Energie verbraucht die bereitstellende Technologie je Energiedienstleistung? • Welche Effekte auf den indirekten Energieverbrauch können erwartet werden? • Wie hoch ist der zu erwartende Rebound des spez. Energieverbrauchs? 	<ul style="list-style-type: none"> • HWB (kWh/m².a), • Fahrzeugverbrauch (kWh/km) • Energieverbrauchsreduktion in %
Energieträgermix der bereitstellenden Technologie	<ul style="list-style-type: none"> • Welcher Energieträgermix wird verwendet? 	<ul style="list-style-type: none"> • Prozentveränderung zwischen Energieträgern
Emissionsfaktoren der verwendeten Energieträger	<ul style="list-style-type: none"> • Welche Emissionen verursachen die verwendeten Energieträger? 	<ul style="list-style-type: none"> • g/kWh CO₂-Äquivalent je Energieträger
Nicht-energetische Emissionen	<ul style="list-style-type: none"> • Welche Effekte auf nicht-energetische THG-Emissionen (Prozessemissionen) können in dem Industriesektor erwartet werden? • Welche Effekte auf nicht-energetische THG-Emissionen (durch Düngung und Viehhaltung) kann in der Landwirtschaft erwartet werden? 	<ul style="list-style-type: none"> • kt CO₂-Äquivalent

5.2.1 Nachfragetreiber und spezifische Energiedienstleistungsnachfrage

Die verwendeten Nachfragetreiber und die spezifische Energiedienstleistungsnachfrage unterscheiden sich je Sektor (siehe

Tabelle 49). Sie werden im Referenzszenario in der Modellierung für die Quantifizierung der Auswirkungen der Digitalisierung auf Energieverbrauch und THG-Emissionen hinterlegt. In den Digitalisierungsszenarien werden diese Nachfragetreiber in manchen Fällen (vor allem im Verkehrssektor) angepasst.

Tabelle 49: Nachfragetreiber und spezifische Energiedienstleistungsnachfrage; Quelle: AEA

Nachfragetreiber	
Industrie	Reale Entwicklung des Bruttoregionalproduktes (BRP) je Sektor
Verkehr	Gefahrene Kilometer (Pkw, LNF, Busse), gefahrene Tonnenkilometer (Lkw, Züge)
Haushalte	Entwicklung der konditionierten Wohnfläche in Mio. m ² (inkl. Bevölkerungswachstum und Komfortzunahme)
Dienstleistungen	Reale Entwicklung des Bruttoregionalproduktes (Aggregat aller Dienstleistungssektoren)
Landwirtschaft	Reale Entwicklung des Bruttoregionalproduktes der Sektoren Landwirtschaft und Forstwirtschaft

5.2.2 Spezifischer Energieverbrauch

Der für diese Studie verwendete spezifische Energieverbrauch je Sektor ist auf die jeweiligen Nachfragetreiber im Sektor seinen Untersektoren bezogen (siehe Tabelle 50). Im Referenzszenario wird der spezifische Energieverbrauch zuerst mittels Trends in die Zukunft fortgeschrieben (WOM) und anschließend durch eine Abschätzung der Wirkung von existierenden relevanten Maßnahmen entsprechend reduziert (WEM). Relevante Maßnahmen sind jene, die den Energieverbrauch und die THG-Emissionen signifikant verändern.

Tabelle 50: Spezifischer Energieverbrauch; Quelle: AEA

Spezifische Energieverbrauch	
Industrie	Entwicklung der Energieintensität je Bruttoregionalprodukt (BRP)
Verkehr	Spezifischer Energieverbrauch je km bzw. tkm
Haushalte	Spezifischer Energieverbrauch je m ²
Dienstleistungen	Entwicklung der Energieintensität des BRP für den Dienstleistungssektor
Landwirtschaft	Entwicklung der Energieintensität des BRP für den Sektor Landwirtschaft (plus Forstwirtschaft)

Für die Digitalisierungsszenarien wird der spezifische Energieverbrauch je Digitalisierungsanwendung in dem relevanten Sektor verändert. Dies erfolgt auf Grundlage der in Kapitel 3 beschriebenen Analyseergebnisse. Diese Zwischenergebnisse zeigen das Reduktionspotenzial für Energieverbrauch (EV) und Treibhausgasemissionen (THG-Emissionen) sowie die aktuelle und zukünftig abgeschätzte Marktdurchdringung. Konkret wird je Anwendung das Potenzial zur Reduktion der THG-Emissionen und des Energieverbrauchs mit der Differenz aus aktueller und zukünftiger Marktdurchdringung multipliziert. Somit werden bereits in der Gegenwart genutzte Potenziale

herausgerechnet. Der resultierende Faktor wird auf das Referenzszenario bezogen. Die dafür erforderliche Quantifizierung der Effekte wird in Kapitel 3 dargestellt.

5.2.3 Nicht-energetische Emissionen

Landwirtschaftliche Emissionen und Prozessemissionen im Industriesektor werden im Modell separat auf Basis von Daten des Klimaschutzberichtes (UBA 2021) betrachtet. Dies erlaubt, die Effekte der untersuchten Digitalisierungsanwendungen auf nicht-energetische Emissionen darzustellen.

5.3 Rebound-Effekte

Laut (Bieser und Hilty 2018) spielen bei IKT-Anwendungen Rebound-Effekte eine wichtige Rolle (energie-, zeit-, wissensbezogen). Schätzungen des Potenzials für Rebound-Effekte aufgrund digitaler Technologien variieren zwischen den Sektoren und reichen von weniger als 10 % bis fast 30 % mehr Energieverbrauch für einige Technologien und Endanwendungen ((GeSI 2015) und (2019b)).

In die Analysen der vorliegenden Studie werden direkte Rebounds in die Berechnungen einbezogen. Allerdings ist auch die Abschätzung dieser Rebound-Effekte mit hohen Unsicherheit verbunden. Indirekte und strukturelle Rebounds sowie systemweite Transformationen werden in der vorliegenden Analyse nicht betrachtet.

Als Beispiel für den Unterschied zwischen diesen Rebound-Arten kann die GPS-Technologie betrachtet werden. Durch GPS-Nutzung steigt das Verkehrsaufkommen aufgrund geringerer Staus (direkter Rebound). Durch weniger Staus verkürzen sich die Fahrzeiten und es wird Zeit für andere Tätigkeiten verfügbar, die zu einem zusätzlichen Energieverbrauch führen (indirekter Rebound). GPS wird autonomes Fahren ermöglichen und erhöht das Produktionswachstum dieser Verkehrssysteme (strukturelle Rebounds). Der Einsatz von autonomen Fahrzeugen wird die Orte verändern, an denen Menschen leben und arbeiten (systemweite Transformation) (Horner et al 2016).

5.4 Literaturrecherche

Für die Literaturrecherche wurde ein semi-strukturierter Ansatz angewandt. Hierfür wurden zuerst relevante Suchbegriffe definiert und diese in Internetsuchanfragen sinnvoll kombiniert. Es wurden sowohl die englischen als auch deutschen Begriffe verwendet. Mögliche Suchbegriffe wurden einerseits auf Basis der durchgeführten Interviews und Screeninggespräche bestimmt und andererseits mit folgenden Begriffen kombiniert:

- Energie/Strom/elektrisch
- Treibhausgasemissionen/CO₂/Methan/Lachgas
- Marktdurchdringung/Anteil
- Entwicklung/2020/2030/2040
- Modell/IAM (Intergrated Assessment Model)/Wirkungskette

Im Weiteren wurden in den so identifizierten hoch-relevanten Dokumenten Primärquellen eruiert. Zusätzlich wurde über Google-Scholar nach diesen Dokumenten nochmals gesucht und, wenn vorhanden, deren Zitierungen in anderen Dokumenten auf deren Relevanz überprüft.⁵⁹

⁵⁹ Insgesamt scheint relativ wenig konkrete Literatur im Konnex Digitalisierung, Energie und Treibhausgasemissionen vorhanden zu sein.

5.5 Stakeholdereinbindung

In AP2 wurden Interviews und Screeninggespräche mit Stakeholdern aus Wirtschaft und Forschung durchgeführt. In diesen Gesprächen wurden relevante Digitalisierungstechnologien und -anwendungen besprochen und, soweit möglich, erste qualitative Einschätzungen bzgl. deren Potenziale und Effekte für Energieverbrauch und Treibhausgasemissionen erhoben (siehe FEEI (2021)). Auf dieser Basis wurden u. a. die möglichen Suchbegriffe für die Literaturrecherche in diesem Arbeitspaket definiert.

In weiterer Folge wurde von Experten der AEA auf Grundlage der Literaturrecherche und der Stakeholderinputs Digitalisierungsanwendungsfelder für die weitere Analyse bestimmt. Für diese Anwendungsfelder wurden (soweit möglich) Einschätzungen zu den Potenzialen zur Reduzierung des Energieverbrauchs und der Treibhausgasemissionen bis 2040 direkt aus der Literatur abgeleitet. Dies wurde ebenfalls für mögliche Marktdurchdringungen für die drei Szenarien (Min, Mid, Max) bis 2040 durchgeführt. In manchen Fällen mussten Annahmen getroffen werden, da es nicht möglich war, eine Einschätzung direkt aus der Literatur abzuleiten.

In einem Workshop wurde diese Ausarbeitung in Form einer Präsentation einer ausgewählten Gruppe an österreichischen Stakeholdern präsentiert. Ein Ziel dieses Workshops war die Validierung der Zwischenergebnisse durch österreichische Expertinnen und Experten. Die aktive und produktive Teilnahme der Expertinnen und Experten hat die verwendeten Annahmen für viele Anwendungsfälle verbessert. Die Teilnehmerinnen und Teilnehmer konnten auch mögliche zusätzliche Anwendungsfälle identifizieren und teilweise weitere Verbesserungsansätze anregen. Diese möglichen zusätzlichen Anwendungsfälle wurden in weiterer Folge in der Analyse ergänzt und bei einzelnen Anwendungsfällen wurden Verbesserungen der Analyseansätze durchgeführt.

6 Literaturverzeichnis

- Acatech. *Abschlussbericht des Arbeitskreises Industrie 4.0 - Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0*. Acatech, Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e.V., Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz GmbH, Deutsche Post AG, 2013.
- Accenture. *Klimaeffekte der Digitalisierung*. Bitkom, 2021.
- Acemoglu D., Lelarge C., Restrepo P. *Competing with Robots: Firm-Level Evidence from France*. Empirical research on automation and "smart" technologies, 2020.
- AEA, Baumann M., Pauritsch G., Rohrer M. *IKT-Stromverbrauch in Österreich im Jahr 2019/2020*. Deliverable, Wien: Österreichische Energieagentur (AEA), 2021.
- AGEB. *Anwendungsbilanzen zur Energiebilanz Deutschland - Endenergieverbrauch nach Energieträgern und Anwendungszwecken*. AG Energiebilanzen e.V., 2021.
- Agora. *Auto tankt Internet - Auswirkungen des automatisierten und vernetzten Fahrens auf den Energieverbrauch von Fahrzeugen, Datenübertragung und Infrastruktur*. Berlin: Agora Verkehrswende, 2020.
- AIT. *Trends und Entwicklungen in der Österreichischen Produktion - Highlights aus dem European Manufacturing Survey 2018*. Wien: Austrian Institut for Technology GmbH (AIT), 2018.
- Aslan J., Mayers K., Koomey J.G., France C. *Electricity Intensity of Internet Data Transmission: Untangling the Estimates*. Journal of Industrial Ecology, 2017.
- Azhar A. *Exponential - How Accelerating Technology Is Leaving Us Behind and What to Do About It*. Penguin Random House (UK), 2021.
- Bayer. „Ungeahnte Höhen.“ 2021. <https://www.cropscience.bayer.com/de/menschen-und-unsere-erde/globale-wirkung/a/ungeahnte-hoehen> (Zugriff am 21. 12 2021).
- BBC. „Singapore approves lab-grown 'chicken' meat.“ 02. 12 2020. <https://www.bbc.com/news/business-55155741> (Zugriff am 05. 01 2022).
- Bermark P., Sepsens A., Coroama V., Kamiya G. *Assessing the net climate impact of digitalisation*. Präsentation, CONNECT University Summer School 2021: Digital for our Planet, 2021.
- BGBI. I Nr. 106/2011. *Bundesgesetz zur Einhaltung von Höchstmengen von Treibhausgasemissionen und zur Erarbeitung von wirksamen Maßnahmen zum Klimaschutz (Klimaschutzgesetz – KSG)*. Wien, 2011.

- Bieser und Hilty. *Indirect Effects of the Digital Transformation on Environmental Sustainability: Methodological Challenges in Assessing the Greenhouse Gas Abatement Potential of ICT*. Zurich: University of Zurich, 2018.
- Bieser, J., Salieri B., Hischier R., Hilty L.M. *Next generation mobile networks - Problem or opportunity for climate protection?* Zürich: University of Zurich, 2020.
- BLW. „Einen Blick in die Zukunft werfen.“ 12. 06 2020. https://www.innovationfarm.at/wp-content/uploads/06_20_BLW_Einen_Blick_in_die_Zukunft_werfen.pdf (Zugriff am 04. 01 2022).
- BMK. *Mobilitätsmasterplan 2030 für Österreich*. Wien: Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, 2021.
- BMNT. *Integrierter nationaler Energie- und Klimaplan für Österreich - Periode 2021 bis 2030*. Wien: Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus, 2019b.
- BMVIT, Logistikum Steyr, Institut für Marketing - Strategieberatung, Herry Consult. *eComTraf - Auswirkungen von E-Commerce auf das Gesamtverkehrssystem*. Wien: Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, 2015.
- BMWi. *Industrie 4.0 - Volks- und betriebswirtschaftliche Faktoren für den Standort Deutschland - Eine Studie im Rahmen der Begleitforschung zum Technologieprogramm AUTONOMIK für Industrie 4.0*. Berlin: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), 2015.
- . *Was ist Industrie 4.0*. 2019. <https://www.plattform-i40.de/IP/Navigation/DE/Industrie40/WasIndustrie40/was-ist-industrie-40.html> (Zugriff am 29. 03 2019).
- Borderstep. *Trotz verbesserter Energieeffizienz steigt der Energiebedarf der deutschen Rechenzentren im Jahr 2016*. Berlin: Borderstep Institut für Innovation und Nachhaltigkeit, 2016.
- Branchenradar. *KEP-Dienste in Österreich 2021*. Branchenradar.com, 2021.
- Bretscher, D., Ammann, C., Wüst, C., Nyfeler, A., Felder, D. „Reduktionspotenziale von Treibhausgasemissionen aus der Schweizer Nutztierhaltung.“ *Agrarforschung Schweiz*, 2018: 376-383.
- Brunner, C.U. „Topmotors Studie: Potentialuntersuchung Rotierende Maschinen und Transportanlagen.“ Zürich, 2015.
- CH-BA Statistik. *Bundesamt für Statistik - Umweltauswirkungen*. 2021. <https://www.bfs.admin.ch/bfs/de/home/statistiken/mobilitaet-verkehr/unfaelle-umweltauswirkungen/umweltauswirkungen.html> (Zugriff am 04. 12 2021).
- Cirillo V., Fanti L., Mina A., Ricci A. *Digitalizing Firms: Skills, Work Organization and the Adoption of New Enabling Technologies*. Working Paper, Pisa: Laboratory of Economics and Management (LEM), 2021.

- Cisco. *Cisco Annual Internet Report (2018-2023) White Paper*. 09. 03 2020.
<https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/executive-perspectives/annual-internet-report/white-paper-c11-741490.html> (Zugriff am 20. 12 2021).
- Coroama V., Bermark, P., Höjer M., Malmodin J. *A Methodology for Assessing the Environmental Effects Induced by ICT Services*. Bristol, United Kingdom; New York, USA: International Conference on ICT for Sustainability, 2020.
- de Haas, Y., Veerkamp, R.F., de Jong, G., Aldridge, M.N. *Selective breeding as a mitigation tool for methane emissions from dairy cattle*. *Animal - The international journal of animal biosciences*, 2021.
- Delaye, E., Heyndricks, C., Freder, R., Van Zeebroeck, B., Rousseau, S., Proost, S. *Rebound effect met impact op het milieu*. Brüssel: Transport & Mobility, Leuven, 2013.
- Delden van S.H., SharathKumar M., Butturini M., Graamans L.J.A., Heuvelink E., Kacira M., Kaiser E., Klamer R. S., Klerkx L., Koostra G., Loeber A., Schouen R. E., Stanghellini C., van Ieperen W., Verdonk J.C., Vialet-Chabrand S., Woltering E.J., ... „Current status and future challenges in implementing and upscaling vertical farming systems.“ *Nature* , 06. 12 2021: 944-956 (2021).
- Deloitte. *Smart Livestock Farming - Potential of Digitalization for Global Meat Supply*. Diskussionspapier, Deloitte, 2017.
- Dena. *Analyse der mit erhöhtem IT-Einsatz verbundenen Energieverbräuche infolge der zunehmenden Digitalisierung*. Metastudie, Berlin: Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena), 2017.
- Die Presse. „Mit wegfinder ist Mobility as a Service in Österreich angekommen.“ *Die Presse*, 11. 02 2021.
- EC. *Code of Conduct for Energy Efficiency in Data Centres*. 2021. <https://ec.europa.eu/jrc/en/energy-efficiency/code-conduct/datacentres> (Zugriff am 20. 12 2021).
- E-Control. *Bericht zur Einführung von intelligenten Messgeräten in Österreich 2021*. Wien: E-Control, 2021.
- EPRS. *Präzisionslandwirtschaft und die Zukunft der Landwirtschaft in Europa*. Wissenschaftliche Vorausschau, Wissenschaftlicher Dienst des Europäischen Parlaments, 2016.
- ETC. *Unlocking the potential of Industry 4.0 to reduce the environmental impact of production*. European Topic Centre Waste and Materials in a Green Economy, 2021.
- ETH Zürich, Vlad Coroama. *Investigating the Inconsistencies among Energy and Energy Intensity Estimates of the Internet*. Zürich: ETH Zürich, 2021.
- EY. *Studie Smart Country Österreich - Digitale Verwaltung und E-Government aus Sicht der österreichischen Bürgerinnen und Bürger*. Wien: Ernst and Young, 2018.

- Fassler, J. „Lab-grown meat is supposed to be inevitable. The science tells a different story.“ 22. 09 2021. <https://thecounter.org/lab-grown-cultivated-meat-cost-at-scale/> (Zugriff am 10. 01 2022).
- FEEI, Harrasko-Kochmann S., Sabbatini G., Sommer R., Winkelmayr P. *Digitalisierungstechnologien in Österreich mit Einfluss auf Energieverbrauch und Treibhausgasemissionen - Darstellung der Technologielandschaft*. Wien: FEEI - Fachverband der Elektro- und Elektronikindustrie, 2021.
- FFG. „Leifaden Energy Transition 2050 - 3. Ausschreibung.“ 06 2020. https://www.ffg.at/sites/default/files/downloads/200624_Energy_Transition_2050_Leitfaden_2020_BF_v1.0_final.pdf (Zugriff am 06 2020).
- Figliozzi M.A. „Lifecycle Modeling and Assessment of Unmanned Aerial Vehicles (Drones) CO₂e Emissions.“ *Civil and Environmental Engineering Faculty (Portland State University) Publications and Presentation*, 17. 12 2018.
- Fraunhofer ISI, Fraunhofer IML, PTV Group, TUHH, MFIVE. *Energie- und Treibhausgaswirkungen des automatisierten und vernetzten Fahrens im Straßenverkehr*. Fraunhofer ISI (Michael Krail, Jens Hellekes, Uta Schneider, Elisabeth Dütschke), Fraunhofer IML (Maximilian Schellert, David Rüdiger, Alina Steindl) PTV AG (Inga Luchmann), PTV Transport Consult GmbH Volker Waßmuth), TU Hamburg-Harburg - VPL Heike Flämig, 2019.
- Fraunhofer-IZM. „Entwicklung des IKT-bedingten Strombedarfs in Deutschland.“ Abschlussbericht, Berlin, 2015.
- GeSI. *#SMARTer2030 - ICT Solutions for 21st Century Challenges*. Brussels: Global e-Sustainability Initiative (GeSI), 2015.
- Gordon-Smith H. *AFN - Vertical farming is headed for the "trough of disillusionment". Here's why that's a good thing*. 14. 12 2021. <https://agfundernews.com/vertical-farming-is-headed-for-the-trough-of-disillusionment-heres-why-thats-a-good-thing.html> (Zugriff am 21. 12 2021).
- Handelsblatt. *Mobilfunkstandard - Vier Gründe, warum Österreich Deutschland bei 5G abhängt*. 04. 06 2019. <https://www.handelsblatt.com/technik/it-internet/mobilfunkstandard-vier-gruende-warum-oesterreich-deutschland-bei-5g-abhaengt/24414390.html?ticket=ST-4682725-K52imARzNd6lgAXDdRqv-cas01.example.org> (Zugriff am 20. 12 2021).
- Horner et al. *Known unknowns: indirect energy effects of information and communication technology*. Environmental Research Letters, 2016.
- Huang, R. *A Multi-Scale Life Cycle Framework for the Net Impact Assessment of Additive Manufacturing in the United States*. Northwestern University, 2016.
- Humbird, D. *Scale-Up Economics for Cultured Meat - Techno-Economic Analysis and Due Diligence*. Colorado (USA): prepared for Open Philanthropy, 2021.

- IBM. „Feeding Future Generations.“ 2012.
https://www.flickr.com/photos/ibm_research_zurich/8091229846/ (Zugriff am 04. 01 2022).
- ICCT. *Battery electric tractor-trailers in the European Union: A vehicle technology analysis*. International Council on Clean Transportation, 2021.
- IEA. „Data Centres and Data Transmission Networks.“ 11 2021. <https://www.iea.org/reports/data-centres-and-data-transmission-networks> (Zugriff am 17. 12 2021).
- IEA. *Digitalisation opportunities for energy efficiency*. Präsentation, Pretoria: International Energy Agency, SEA - Pretoria, 15 October 2019 (Lane K., Bennich P.), 2019a.
- IEA. *Digitalization & Energy*. Paris: International Energy Agency, 2017.
- IEA. *Energy Efficiency 2019*. International Energy Agency, 2019b.
- IFR. *Robot density rises globally*. Frankfurt: International Federation of Robotics, 2018.
- IFR. *World Robotics 2020 Report*. Bericht, International Federaion of Robotics, 2020.
- IMK, Ingenieurbüro für Mechatronik und Cybernetik Dr. Bruns. *Forschung & Entwicklung -> Industrie 4.0*. 2021. <https://imk.engineering/industrie-4.0.html> (Zugriff am 14. 11 2021).
- Industrie 4.0. *Smart Logistics*. 2021. <https://plattformindustrie40.at/smart-logistics/> (Zugriff am 04. 12 2021).
- ITS Austria. *MaaS made in Austria*. Wien: ITS Austria, 2019.
- JRC. *2021 Best Practice Guidelines for the EU Code of Conduct on Data Centre Efficiency*. Ispar (Italy): JRC Technical Report, 2021.
- JRC. *Digitalisation: Opportunities for heating and cooling*. Luxembourg: Joint Research Center, 2019.
- JRC, Soto et al. *The contribution of precision agriculture technologies to farm productivity and the mitigation of greenhouse gas emissions in the EU*. Luxemboug: Joint Research Center, European Commission, 2019.
- Kearney. *When consumers go vegan, how much meat will be left on the table for agribusiness?* A.T. Kearney, 2020.
- KeyQuest. *6% der österreichischen Landwirte nutzen Precision Farming Systeme*. 2016.
<https://keyquest.at/news/news/agrar-news/precision-farming> (Zugriff am 04. 01 2022).
- KiM, Durand A., Harms L., Hoogendoorn-Lanser S., Zijlstra T. *Mobility-as-a-Service and changes in travel preferences and travel behaviour: a literature review*. The Hague: KiM Netherlands Institute for Transport Policy Analysis, 2018.
- Kleine Zeitung. *Auch Online-Banking nimmt zu*. Zeitungsbericht, Kleine Zeitung, 2019.

- KMU Forschung Austria. *E-Commerce-Studie Österreich 2021*. Wien: Handelsverband, 2021.
- Koch M., Manuylov I., Smoka M. *Robots and firms*. Working Paper, Munich: Center for Economic Studies and ifo Institute, 2019.
- Kohnhauser V., Schobesberger M., Siller M., Peterwagner C. *Wege zu Smart Logistics, Ansätze zur umfassenden Integration von Informations- und Kommunikationstechnologien in österreichischen KMUs*. Managementstudie, Salzburg: Prof. (FH) Dr. Roald Steiner, Fachhochschule Salzburg, 2017.
- Kopf A. *Medium - Let's Talk About Market Size*. 19. 05 2017. <https://medium.com/artemis/lets-talk-about-market-size-316842f1ab27> (Zugriff am 21. 12 2021).
- Kulterer, K. *Electric Motor Systems Annex, Projektphase 2017-2019*. Berichte aus Energie- und Umweltforschung, Wien: Bundeministerium für Verkehr, Innovation und Technology, 2019a.
- Kulterer, K. *Industrie 4.0 - Lösungen für effiziente Motorsysteme*. Wien: Österreichische Energieagentur - Austrian Energy Agency, 2019b.
- Kulterer, K. *Report on the EMSA Survey on digitalisation in electric motor driven systems*. Electric Motor Systems Annex (EMSA), International Energy Agency (IEA), Austrian Energy Agency, 2021.
- LK. *Energieeffizienz in der Landwirtschaft - Ein Wegweiser zur Senkung der Energiekosten im Betrieb*. Landwirtschaftskammer Österreich - Ländliches Fortbildungs-Institut, 2017.
- LK. *Landwirte zeigen Energieeffizienz*. Landwirtschaftskammer Österreich - Ländliches Fortbildungs-Institut, 2019.
- Luber. „Bigdata Insider.“ 09. 01 2019. <https://www.bigdata-insider.de/was-ist-digitalisierung-a-626489/> (Zugriff am 03. 12 2021).
- Mangiaracina R., Marchet G., Perotti S, Tumino A. *A review of the environmental implications of B2C e-commerce: a logistics perspective*. Milan (IT): Department of Management, Economics and Industrial Engineering, Politecnico di Milano, 2015.
- Masanet E., Shehabi A., Lei N., Smith S., Koomey J. *Recalibrating global data center energy-use estimates*. Sciencemag.org [Vol 367, Issue 6481], 2020.
- McKinsey Digital. *Industry 4.0 - How to navigate digitization of the manufacturing sector*. München: McKinsey & Company, 2015.
- Microsoft und PWC. *How AI can enable a Sustainable Future*. Microsoft and PWC, 2019.
- Nperf. *Netabdeckungskarte - Austria*. 20. 12 2021. <https://www.nperf.com/de/map/AT/-/63446.A1-Mobile/signal/?ll=47.29413372501023&lg=12.315673828125&zoom=7> (Zugriff am 20. 12 2021).

- O'Neill, B.C., Kriegler, E., Ebi, K.L., Kemp-Benedict, E., Riahi, K., Rothman, D.S., van Ruijven, B.J., van. *The roads ahead: narratives for shared socioeconomic pathways describing world futures in the 21st century*. Global Environ. Change, 2015.
- Obermaier, R. *Industrie 4.0 als unternehmerische Gestaltungsaufgabe: Strategische und operative Handlungsfelder für Industriebetriebe*. Springer Verlag, 2016.
- OERV. *Fakten und Zahlen Österreichischer Reisemarkt 2018*. Österreichischer ReiseVerband (OERV), 2018.
- OMV. *Nachhaltigkeitsbericht 2020*. OMV, 2021.
- ÖU. *Österreich unterwegs 2013/2014*. Wien: BMVIT, ASFINAG, ÖBB, Land Burgenland, Land Niederösterreich, Land Steiermark, Land Tirol, 2016.
- Ramschek, D. *Industrie 4.0 - Anwendungen zur Erhöhung der Energie- und Materialeffizienz am Beispiel der Eisen- und Stahlindustrie*. Masterarbeit, Leoben: Montan Universität Leoben - Lehrstuhl für Wirtschafts- und Betriebswissenschaften, 2020.
- Reindl, R. *Präzisionslandwirtschaft als Zukunftsmodell für österreichische Kartoffelbauern?* Masterarbeit, Graz: Karl-Franzens-Universität Graz, Studienrichtung Umweltsystemwissenschaften Geographie, 2019.
- Rogers E., Elliott N., Kwatra S., Trmbley D., Nadadur V. „Intelligent Efficiency: Opportunities, Barriers and Solutions.“ 2013.
- Rogers, E. *The Energy Savings Potential of Smart Manufacturing*. American Council for Energy-Efficient Economy (ACEEE), 2014.
- Schramm, H., Therbo, J., Chambris, A., Osojnik, M., Kolb, S., Funder-Kristensen, T. *Optimizing the control of energy use in technical building systems – why energy and climate policies should fill regulatory gaps*. eceee Summer Study, 2017.
- SMLC. *Implementing 21st Century Smart Manufacturing*. Los Angeles: Smart Manufacturing Leadership Coalition, 2011.
- SMLC. *Implementing 21st Century Smart Manufacturing. Workshop Summary Report, University of California*. 2011, Los Angeles: Smart Manufacturing Leadership Coalition , 2011.
- Statistik Austria. *Energiegesamtrechnung (NACE 2008) 2008-2019*. Statistische Datentabelle, Wien: Statistik Austria, 2020c.
- . *Land- und Forstwirtschaft - Agrarstruktur, Flächen Erträge - Maschinen, Geräte*. 13. 12 2021d. http://statistik.at/web_de/statistiken/wirtschaft/land_und_forstwirtschaft/agrarstruktur_flachen_ertraege/maschinen_geraete/index.html (Zugriff am 04. 01 2022).
- Statistik Austria. *Nutzenergieanalyse für Österreich 1993-2019*. Wien: Statistik Austria,, 2020b.

- Statistik Austria. *Nutzenergieanalyse für Österreich 1993-2020*. Wien: Statistik Austria, 2021.
- Statistik Austria. *Österreich-Energiebilanzen 1970-2019*. Statistische Datentabelle, Wien: Statistik Austria, 2020a.
- Statistik Austria. „Standard-Dokumentation zu den Energiebilanzen für Österreich und die Bundesländer.“ Wien, 2020b.
- Statistik Austria. „Standard-Dokumentation zur Nutzenergieanalyse.“ Wien, 2020c.
- Statistik Austria. *Vorausberechnete Bevölkerungsstruktur für Österreich 2019-2100 Hauptintervall*. Datentabelle, Wien: Statistik Austria, 2020.
- Statistik Austria, *Land- und Forstwirtschaft - Agrarstruktur, Flächen, Erträge - Bodennutzung*. 13. 12 2021c.
http://statistik.at/web_de/statistiken/wirtschaft/land_und_forstwirtschaft/agrarstruktur_flachen_ertraege/bodennutzung/index.html (Zugriff am 04. 01 2022).
- . *Land- und Forstwirtschaft Agrarstruktur, Flächen, Erträge*. 13. 12 2021b.
http://statistik.at/web_de/statistiken/wirtschaft/land_und_forstwirtschaft/agrarstruktur_flachen_ertraege/betriebsstruktur/index.html (Zugriff am 04. 01 2022).
- Taiebat M., Brown A.L., Safford H.R., Qu S., Xu M. *A Review on Energy, Environmental, and Sustainability Implications of Connected and Automated Vehicles*. Wissenschaftlicher Artikel, Environmental Science and Technology, 2018.
- Trupa, A., Aplocina, E., Degoa, L. „Forage Quality and Feed Intake Effect on Methane Emissions from Dairy Farming.“ *Engineering for rural development*, 20.-22.. 05 2015.
- Tullo, E., Finzi, A., Guarina, M. „Review: Environmental impact of livestock farming and Precision Livestock Farming as a mitigation strategy.“ *Science of the Total Environment*, 2019: 2751-2760.
- UBA AT. *PoviMob - Potentiale virtuelle Mobilität - Rahmen und Maßnahmen für eine bestmögliche Verknüpfung virtueller und physischer Mobilität*. Wien: Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK), 2020.
- UBA DE. *Die Zukunft im Blick: 3D-Druck - Trendbericht zur Abschätzung der Umweltwirkungen*. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt (DE), 2018.
- UBA DE. *Die Zukunft im Blick: Fleisch der Zukunft - Trendbericht zur Abschätzung der Umweltwirkungen von pflanzlichen Fleischersatzprodukten, essbaren Insekten und In-vitro-Fleisch*. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt (DE), 2019.
- . *Rebound-Effekte*. 17. 09 2019. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/abfall-ressourcen/oekonomische-rechtliche-aspekte-der/rebound-effekte> (Zugriff am 05. 01 2022).
- UBA. *Klimaschutzbericht 2021*. Bericht, Wien: Umweltbundesamt, 2021.

- UBS. *The Food revolution*. UBS Chief Investment Office GWM, 2019.
- Uhlmann, E., Rinkober, S., Hollerbach, T. *Energy efficient usage of industrial robots for machining processes*. 23rd CIRP Conference on Life Cycle Engineering, 2016.
- UITP. *Mobility as a Service*. Brüssel: International Association of Public Transport, 2019.
- Vasques, T.L., de Almeida, A.T., Moura, P.S.,. *Energy efficiency insight into small and medium data centres: A comparative analysis based on a survey*. eceee Summer Study, 2017.
- VCÖ. *Mobilität als Dienstleistung erspart teuren Autobesitz*. Wien: VCÖ, 2020.
- . *Österreich beim Bahngüterverkehr im EU-Spitzenfeld*. 4. 07 2018.
<https://www.vcoe.at/presse/presseaussendungen/detail/bahngueterverkehr-eu-vergleich-2018> (Zugriff am 04. 12 2021).
- VDI. *Ressourceneffizienz durch Industrie 4.0 - Potenziale für KMU des verarbeitenden Gewerbes*. Berlin: VDI - Zentrum Ressourceneffizienz, 2017.
- VDI ZRE. *Ressourceneffizienz durch Industrie 4.0, Potenziale für KMU des verarbeitenden Gewerbes*. VDI Zentrum Ressourceneffizienz, 2017.
- WEF. *Fourth Industrial Revolution, Beacons of Technology and Innovation in Manufacturing*. World Economic Forum in collaboration with McKinsey & Company, 2019.
- WIFO. *Kräftiger Konjunkturaufschwung in Österreich*. Bericht, Wien: WIFO - Österreichisches Institut für Wirtschaftsforschung, 2021a.
- WIFO. *Update der mittelfristigen Prognose der österreichischen Wirtschaft 2021 bis 2025*. Monatsbericht, Wien: WIFO - Österreichisches Institut für Wirtschaftsforschung, 2021b.
- Wikipedia. „Shared Socioeconomic Pathways.“ 2021.
https://en.wikipedia.org/wiki/File:Shared_Socioeconomic_Pathways.svg (Zugriff am 05. 11 2021).
- WKO. *Unselbständig Beschäftigte im Sachgüterbereich 2019*. Datentabelle, Wien: Wirtschaftskammer Österreich, 2019.
- Yaskawa. „Annual Report 2018.“ 2018.
- ZVEI. *More energy efficiency through process automation*. Frankfurt am Main: Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V, 2012.

7 Abkürzungen

a	Jahr
ACC	Adaptive Cruise Control
ADSL	Asymmetric Digital Subscriber Line
AEA	Österreichische Energieagentur – Austrian Energy Agency
AP	Arbeitspaket
ATO	Automatisierter Zugbetrieb
AVF	Automatisiertes und Vernetztes Fahren
BEEV	Brutto-Endenergieverbrauch
BJ	Binder Jetting
bn	billion (de: Milliarden)
BIM	Building Information Model
BIP	Bruttoinlandsprodukt
BMK	Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie
BRP	Bruttoregionalprodukt
B2C	Business-to-Consumer
btkm	Bruttotonnenkilometer
Ch	chemisch
CH₄	Methan
CO₂	Kohlendioxid
CPPS	Cyber-physical Production System
CPS	Cyber-physical Systems
CRT	Röhrenbildschirm
C2C	Consumer-to-consumer
DAS	Echzeit-Fahrerberatung
DECT	Digital Enhanced Cordless Telephone
DED	Directed Energy Deposition
DNA	Desoxyribonukleinsäure
DSL	Digital Subscriber Line
EB	Exabyte
EB	Extrusion-based Process
EDV	Elektronische Datenverarbeitung
EEff	Energieeffizienz
EEV	Endenergieverbrauch
EGR	Energiegesamtrechnung
EMS	Energiemanagementsystem
ERP	Enterprise Resource Planning
EV	Energieverbrauch
FAN	Fixed Access Network
FE	Final Energy (de: Endenergieverbrauch)

FEEL	Fachverband der Elektro- und Elektronikindustrie
FFG	Forschungsförderungsgesellschaft
FMS	Flexible Manufacturing System
FTI	Forschung, Technologie und Innovation
FTTH	Fibre to the Home: Glasfaseranschluss
Fzgkm	Fahrzeugkilometer
g	Gramm
GDP	Gross domestic product
GHG	Greenhouse gas
GPS	Global Positioning System
GVE	Großvieheinheiten
GWh	Gigawattstunden
h	Stunde
ha	Hektar
HFC	Hybrid Fiber Coax
ICS	Industrial Control Systems
ICT	Information and communication technology
IEA	Internationale Energieagentur
IIoT	Industrial Internet of Things
IKT	Informations- und Kommunikationstechnologie
Incl.	Inclusive
Inkl.	Inklusive
IoT	Internet of Things
KLIEN	Klima- und Energiefonds
KI	Künstliche Intelligenz
kg	Kilogramm
km	Kilometer
KSG	Klimaschutzgesetz
kt	Kilotonnen
kW	Kilowatt
kWh	Kilowattstunden
l	Liter
IAM	Integrated Assessment Model
IFR	International Federation of Robotics
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
LAN	Local Area Network
LCD	Liquid Crystal Display
LiDAR	Light Detection and Ranging
LKA	Lane Keeping Assist
Lkw	Lastkraftwagen
LNF	Leichte Nutzfahrzeuge
LRR	Long Range Radar
OM	Operations Management
m²	Quadratmeter

MaaS	Mobility-as-a-Service
MES	Manufacturing Executive System
MFD	Multi-Function Device
Mio.	Millionen
MIT	Motorized Individual Traffic
MIV	Motorisierter Individualverkehr
MJ	Material Jetting
ML	Machine Learning
MLS	Metal Laser Sintering
Mrd.	Milliarden
MRR	Mid Range Radar
MWh	Megawattstunden
M2M	Machine-to-machine
M3	Fahrzeugklasse M3
n	Anzahl
NaCl	Natriumsalz
NEA	Nutzenergieanalyse
N₂O	Lachgas
N3	Fahrzeugklasse N3
ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr
ÖRV	Österreichischer ReiseVerband
p. a.	Per annum
PBF	Powder Bed Fusion Processes
PCC	Predictive Cruise Control
Phy	physikalisch
Pkm	Personenkilometer
Pkw	Personenkraftwagen
PLC	Programmable Logic Controllers
PLS	Polymer Laser Sintering
PP	Photopolymerization Processes
PRR	Predictive Cruise Control
PSTN	Public switched telephone network
PT	Public Transport
PUE	Power Usage Effectiveness
RAN	Radio Access Network
RFID	Radio-Frequency Identification
RTI	Research, technology and innovation
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition
SL	Sheet Lamination
SLA	Stereolithografie
SLS	Selective Laser Sintering
SNF	Schwere Nutzfahrzeuge
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
SSD	Solid-State-Drive

SSR	Short Range Radar
SSP	Shared Socioeconomic Pathway
SZM	Sattelzugmaschine
t	Tonnen
TB	Terabyte
THG	Treibhausgas
tkm	Tonnenkilometer
TWh	Terawattstunden
UVB	Ultraviolettstrahlung im B-Bereich
VCÖ	Verkehrsclub Österreich
VDSL	Very High Speed Digital Subscriber Line
VoIP	Voice over IP
V2V	Automatisiertes Eco-Driving
W	Watt
WAN	Wide Area Network
WEM	With Existing Measures
Wh	Wattstunden
WLAN	Wireless Local Area Network
WOM	Without Measures

8 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Betrachtete Digitalisierungsanwendungen; Quelle: AEA	3
Abbildung 2 (Figure 2): Analyzed digitalization applications; source: AEA	7
Abbildung 3: Übersicht über die Shared Socioeconomic Pathways; Quelle: (Wikipedia 2021)	16
Abbildung 4: Überblick über historische Entwicklungen für die Jahre 2000 und 2019, ausgewählte Prognosen und Ziele (laut Klimaschutzgesetz-Entwurf) für das Jahr 2040; Quelle: (Statistik Austria 2020), (WIFO 2021a), (WIFO 2021b), (BMNT 2019b), (UBA 2021), (Statistik Austria 2020a), (Bemark P. 2021) und Berechnungen und Darstellung AEA.....	17
Abbildung 5: Brutto-Endenergieverbrauch in Österreich im Jahr 2019; Quelle: (Statistik Austria 2020a), (Statistik Austria 2020b), Abbildung AEA	18
Abbildung 6: Treibhausgasemissionen in Österreich im Jahr 2019; Quelle: (UBA 2021), Abbildung AEA	18
Abbildung 7: Automatisierungspyramide; Quelle: (IMK 2021)	24
Abbildung 8: Primäre THG-/EEV-Reduktionspotenziale in Deutschland – Welt des Fahrzeugbesitzes; Quelle: (Fraunhofer ISI 2019)	36
Abbildung 9: Primäres THG-Reduktionspotenzial für Deutschland – Welt des Fahrzeugbesitzes; Quelle: (Fraunhofer ISI 2019)	36
Abbildung 10: THG-Reduktionspotenzial in der Schweiz im Jahr 2030; Quelle: (Bieser und Hilty 2018), Anpassung AEA.....	40
Abbildung 11: IKT-Energieverbrauch in Haushalten in Österreich; Quelle: AEA, Berechnungen auf Basis von (Fraunhofer-IZM 2015).....	48
Abbildung 12: IKT-Stromverbrauch Haushalte – Szenarien; Quelle: AEA	48
Abbildung 13: IKT-Energieverbrauch am Arbeitsplatz in Österreich; Quelle: AEA, Berechnungen auf Basis von (Fraunhofer-IZM 2015).....	60
Abbildung 14: IKT-Stromverbrauch am Arbeitsplatz – Szenarien; Quelle: AEA.....	60
Abbildung 15: Energieverbrauch von Datenzentren – historisch und projiziert bei einer Verdopplung des Computing-Bedarfs; Quelle: (Masanet E. 2020)	62
Abbildung 16: IKT-Energieverbrauch in Rechenzentren in Österreich; Quelle: AEA, Berechnungen auf Basis von (Fraunhofer-IZM 2015).....	64
Abbildung 17: IKT-Stromverbrauch am Arbeitsplatz – Szenarien; Quelle: AEA, (Borderstep 2016)	65
Abbildung 18: High-Level-Topologie des Internets; Quelle: (ETH Zürich 2021).....	66
Abbildung 19: Energieverbrauch der Telekommunikationsinfrastruktur in Österreich; Quelle: AEA, Berechnungen auf Basis von (Fraunhofer-IZM 2015)	68
Abbildung 20: Stromverbrauch der Telekommunikationsinfrastruktur – Szenarien; Quelle: AEA, (Statistik Austria 2020c)	69
Abbildung 21: Netzwerkgrafik wichtiger Technologien (rosa) für die Digitalisierungsanwendungen (grün), die Größe der Technologieknoten (rosa) entspricht der Anzahl der Verbindungen zu Digitalisierungsanwendungen (grün); Quelle: AEA	87
Abbildung 22: Schematische Darstellung der verwendeten Szenarien; Quelle: AEA	89

9 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht der Brutto-Effekte 2040 für die Digitalisierungsanwendungen im Industriesektor; Quelle: AEA.....	4
Tabelle 2: Übersicht der Brutto-Effekte 2040 für die Digitalisierungsanwendungen im Verkehrssektor; Quelle: AEA.....	4
Tabelle 3: Übersicht der Brutto-Effekte 2040 für die Digitalisierungsanwendungen im Haushaltssektor; Quelle: AEA.....	5
Tabelle 4: Übersicht der Brutto-Effekte 2040 für die Digitalisierungsanwendungen im Dienstleistungssektor; Quelle: AEA.....	5
Tabelle 5: Übersicht der Brutto-Effekte 2040 für die Digitalisierungsanwendungen im Landwirtschaftssektor; Quelle: AEA.....	6
Tabelle 6 (Table 6): Overview of gross effects 2040 of digitalization applications in the industrial sector; source: AEA	8
Tabelle 7 (Table 7): Overview of gross effects 2040 of digitalization applications in the transport sector; source: AEA	8
Tabelle 8 (Table 8): Overview of gross effects 2040 of digitalization applications in the household sector; source: AEA	8
Tabelle 9 (Table 9): Overview of gross effects 2040 of digitalization applications in the service sector; source: AEA	9
Tabelle 10 (Table 10): Overview of gross effect 2040 of digitalization applications in the agricultural sector; source: AEA	9
Tabelle 11: Energierelevante Teilkomponenten von Industrie 4.0; Quellen: (VDI ZRE 2017), (Obermaier 2016), (Rogers 2014), (Kulterer 2019a)	21
Tabelle 12: Annahmen für die Quantifizierung – Prozessautomatisierung; Quelle: AEA	27
Tabelle 13: Annahmen für die Quantifizierung – Digitaler Zwilling; Quelle: AEA	29
Tabelle 14: Annahmen für die Quantifizierung – Additive Fertigung; Quelle: AEA	31
Tabelle 15: Annahmen für die Quantifizierung – Gebäudeautomatisierung; Quelle: AEA.....	32
Tabelle 16: Mögliche Vorteile der Digitalisierung im Verkehr; Quelle: (IEA 2019b), Übersetzung AEA33	
Tabelle 17: Annahmen für die Quantifizierung – Autonomes Fahren; Quelle: AEA	37
Tabelle 18: Annahmen für die Quantifizierung – Mobility-as-a-Service (MaaS), Shared Mobility und Ride-Sharing; Quelle: AEA	39
Tabelle 19: Annahmen für die Quantifizierung – Smart Logistics; Quelle: AEA.....	41
Tabelle 20: Annahmen für die Quantifizierung – Automatisierter Schienengüterverkehr; Quelle: AEA	43
Tabelle 21: Möglichkeiten für Reduktionen durch digitale Anwendungen im Haushaltsbereich; Quelle: (IEA 2019a), (IEA 2019b)	45
Tabelle 22: Annahmen für die Quantifizierung – Smart Home; Quelle: AEA.....	46
Tabelle 23: IKT in Haushalten – Kategorien und Geräte; einige dieser Geräte sind zwar bereits heute nicht mehr relevant, es wird allerdings angenommen, dass der entsprechend berechnete	

Energieverbrauch durch andere in Zukunft verwendete Geräte ersetzt wird; Quelle: Fraunhofer IZM (2015).....	47
Tabelle 24: Annahmen für die Quantifizierung – IKT-Nutzung; Quelle: AEA	49
Tabelle 25: Möglichkeiten für die Reduktion des Energieverbrauchs durch digitale Anwendungen in kommerziellen und öffentlichen Gebäuden; Quelle: (IEA 2019a).....	51
Tabelle 26: Annahmen für die Quantifizierung – Gebäudeautomatisierung; Quelle: AEA.....	52
Tabelle 27: Annahmen für die Quantifizierung – Homeoffice und mobiles Arbeiten; Quelle: AEA.....	54
Tabelle 28: Annahmen für die Quantifizierung – E-Commerce; Quelle: AEA	56
Tabelle 29: Annahmen für die Quantifizierung – E-Learning, E-Banking, E-Health, E-Governance; Quelle: AEA.....	58
Tabelle 30: IKT am Arbeitsplatz – Kategorien und Geräte; manche dieser Geräte sind zwar bereits heute nicht mehr relevant, es wird allerdings angenommen, dass der entsprechend berechnete Energieverbrauch durch andere in Zukunft verwendete Geräte ersetzt wird; Quelle: Fraunhofer IZM (2015).....	59
Tabelle 31: Annahmen für die Quantifizierung – IKT am Arbeitsplatz; Quelle: AEA.....	61
Tabelle 32: IKT in Rechenzentren – Kategorien und Geräte; Quelle: Fraunhofer IZM (2015)	63
Tabelle 33: Annahmen für die Quantifizierung – Rechenzentren; Quelle: AEA.....	65
Tabelle 34: IKT in der Telekommunikationsinfrastruktur – Kategorien und Unterkategorien; Quelle: Fraunhofer IZM (2015)	67
Tabelle 35: Annahmen für die Quantifizierung – Telekommunikationsinfrastruktur; Quelle: AEA.....	69
Tabelle 36: Voraussichtliche ökologische Vorteile durch wichtige Verfahren und Methoden der Präzisionslandwirtschaft mit Bezug zu Digitalisierung, Energieverbrauch und THG-Emissionen; Quelle: (EPRS 2016).....	72
Tabelle 37: Annahmen für die Quantifizierung – Precision Plant Farming; Quelle: AEA	74
Tabelle 38: Annahmen zum THG-Reduktionspotenzial durch Precision Farming in der Tierhaltung für das Jahr 2030 in der Schweiz; Quelle: (Bieser 2020)	76
Tabelle 39: Annahmen für die Quantifizierung – Precision Livestock Farming und Zuchtoptimierung; Quelle: AEA.....	77
Tabelle 40: Annahmen für die Quantifizierung – Lab-grown Meat; Quelle: AEA.....	83
Tabelle 41: Übersicht der Brutto-Effekte 2040 für die Digitalisierungsanwendungen im Industriesektor; Quelle: AEA	84
Tabelle 42: Übersicht der Brutto-Effekte 2040 für die Digitalisierungsanwendungen im Verkehrssektor; Quelle: AEA	84
Tabelle 43: Übersicht der Brutto-Effekte 2040 für die Digitalisierungsanwendungen im Haushaltssektor; Quelle: AEA.....	85
Tabelle 44: Übersicht der Brutto-Effekte 2040 für die Digitalisierungsanwendungen im Dienstleistungssektor; Quelle: AEA	85
Tabelle 45: Übersicht der Brutto-Effekte 2040 für die Digitalisierungsanwendungen im Landwirtschaftssektor; Quelle: AEA	86
Tabelle 46: Charakteristika der im Projekt entwickelten Szenarien; Quelle: AEA	90
Tabelle 47: Strukturen von Energiebilanz (Statistik Austria 2020b), Nutzenergieanalyse (Statistik Austria 2020c) und Klimaschutzgesetz (BGBl. I Nr. 106/2011 2011); Quelle: AEA	90

Tabelle 48: Stufen der kaskadischen Berechnungsmethodik der effektiven Auswirkungen; Quelle: AEA	92
Tabelle 49: Nachfragetreiber und spezifische Energiedienstleistungsnachfrage; Quelle: AEA	93
Tabelle 50: Spezifischer Energieverbrauch; Quelle: AEA	93

ÜBER DIE ÖSTERREICHISCHE ENERGIEAGENTUR – AUSTRIAN ENERGY AGENCY (AEA)

Die Österreichische Energieagentur liefert Antworten für die klimaneutrale Zukunft: Ziel ist es, unser Leben und Wirtschaften so auszurichten, dass kein Einfluss mehr auf unser Klima gegeben ist. Neue Technologien, Effizienz sowie die Nutzung von natürlichen Ressourcen wie Sonne, Wasser, Wind und Wald stehen im Mittelpunkt der Lösungen. Dadurch wird für uns und unsere Kinder das Leben in einer intakten Umwelt gesichert und die ökologische Vielfalt erhalten, ohne dabei von Kohle, Öl, Erdgas oder Atomkraft abhängig zu sein. Das ist die missionzero der Österreichischen Energieagentur.

Mehr als 85 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter aus vielfältigen Fachrichtungen beraten auf wissenschaftlicher Basis Politik, Wirtschaft, Verwaltung sowie internationale Organisationen. Sie unterstützen diese beim Umbau des Energiesystems sowie bei der Umsetzung von Maßnahmen zur Bewältigung der Klimakrise.

Die Österreichische Energieagentur setzt zudem im Auftrag des Bundes die Klimaschutzinitiative klima**aktiv** um.

Der Bund, alle Bundesländer, bedeutende Unternehmen der Energiewirtschaft und der Transportbranche, Interessenverbände sowie wissenschaftliche Organisationen sind Mitglieder dieser Agentur. Weitere Informationen für Interessenten unter www.energyagency.at.

