

ENRICH

-

Energie, Nachhaltigkeit, Ressourceneffizienz in IT und Rechenzentren

von

Universität Stuttgart, HLRS – Höchstleistungsrechenzentrum Stuttgart, Prof. Dr. Michael Resch,
Marcel Brodbeck M.Sc., Dr. Martin Rose, Inna Wöckener, Dr. José Gracia, Diana Wang, Dr. Natalie Le-
wandowski, Dr. Cosima-Maria Weyers

Universität Stuttgart IER – Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, Prof. Dr.
Peter Radgen, Nicola Schuckert, Dirk Turek, Felix Dörpmund

DIALOGIK gemeinnützige Gesellschaft für Kommunikations- und Kooperationsforschung mbH, Stutt-
gart: Dr. Wilfried Konrad, Frank Dratsdrummer, Dr. Dirk Scheer

Universität Ulm UUlM, Lutz Schubert

Förderkennzeichen: BWND21101-04

Laufzeit: 01.04.2021 – 31.03.2023

Die Arbeiten des Baden-Württemberg-Programms Lebensgrundlage Umwelt und ihre
Sicherung (BWPLUS) werden mit Mitteln des Landes Baden-Württemberg gefördert

April 2023

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	3
Abbildungsverzeichnis.....	6
Tabellenverzeichnis.....	8
1 Einleitung	9
1.1 Motivation und Ziel des Forschungsvorhabens	9
2 Arbeitspaket 1 – Megatrends in der Digitalisierung und zukünftige Entwicklung.....	11
2.1 Ziel des Arbeitspakets.....	11
2.2 Begriffsdefinitionen	11
2.3 Methodik.....	11
2.4 Trendbereich	12
2.4.1 Mobilität/Logistik	12
2.4.2 Arbeitsplatz	14
2.4.3 Unterhaltung.....	15
2.4.4 Gesundheit.....	16
2.4.5 Industrie/Wirtschaft.....	18
2.4.6 Konsum	19
2.4.7 Wohnen.....	21
2.4.8 Bildung	21
2.4.9 Kommunale Daseinsvorsorge.....	22
2.4.10 Landwirtschaft	24
2.4.11 Finanzwesen.....	24
2.5 Quantifizierung	25
2.5.1 Quantifizierung im Bereich Homeoffice.....	26
2.5.2 Quantifizierung im Bereich Streaming.....	29
2.5.3 Quantifizierung im Bereich elektronische Patientenakten	33
2.6 Einsatz neuer Technologien - Künstliche Intelligenz	37
2.6.1 Ziel des Arbeitspakets.....	37
2.6.2 Methode.....	37
2.6.3 Was sind KI-Systeme?.....	37
2.6.4 Festlegung der zu betrachtenden Szenarien.....	39
2.6.5 Anwendungsfelder und Szenarien	40
3 Arbeitspaket 2 – Herstellung von Geräten und Einrichtungen, Einkauf und Beschaffung	45
3.1 Arbeitspaket 2.1 – Beschaffung und Entsorgung von Hard- und Software und der Berücksichtigung von Nachhaltigkeitskriterien.....	45
3.1.1 Bedarfsanalyse.....	46
3.1.2 Marktanalyse	46

3.1.3	Auftragsgegenstand	47
3.1.4	Leistungsbeschreibung	47
3.1.5	Ausschlusskriterien & Eignungsprüfung	47
3.1.6	Zuschlagskriterien	48
3.1.7	Auftragsausführung	48
3.1.8	Vertragsmanagement und –monitoring	48
3.2	Arbeitspaket 2.2 – Lieferketten beispielhafter Hardwarekomponenten HPC	55
3.2.1	Rohstoffgewinnung	63
3.2.2	Verarbeitung	64
3.2.3	Endfertigung	64
3.2.4	Nutzung	65
3.2.5	Recycling & Entsorgung	66
3.2.6	Transport	66
3.3	Arbeitspaket 2.3 – Effiziente Nutzung bestimmter Hardwarekomponenten	69
3.4	Arbeitspaket 2.4 – Beschaffungsmaßnahmen Büro-IT	73
4	Arbeitspaket 3 – Betrieb digitaler Infrastrukturen – HPC	75
4.1	Messinfrastruktur – CPU-System	75
4.2	Messinfrastruktur – GPU System	75
4.3	Leistungsbegrenzung – CPU System.....	75
4.4	Arbeitspaket 3.1 – Performance optimierter HPC Rechenbetrieb.....	76
4.4.1	Einleitung.....	76
4.4.2	Ergebnisse der Experimente.....	76
4.4.3	Auswertung und Interpretation	79
4.5	Arbeitspaket 3.2 – Effiziente Programmierung von Algorithmen	80
4.5.1	Abschätzung der Effizienzsteigerung durch effizientere Programmierung	80
4.5.2	Abschätzung des nötigen Personalaufwands zur Umsetzung.....	88
4.6	Arbeitspaket 3.3 – Intelligente Netze.....	90
4.7	Arbeitspaket 3.4 – Betrieb digitaler Infrastrukturen – Office, Telekommunikation, Media .	92
5	Arbeitspaket 4 – Anwenderperspektiven	93
5.1	Ziele	93
5.2	Methoden	93
5.2.1	Experten-Workshops.....	93
5.2.2	Fokusgruppen	93
5.3	Ergebnisse.....	93
5.3.1	Themenbereich Videostreaming	94
5.3.2	Themenbereich Homeoffice.....	98
6	Arbeitspaket 5 – Digitaler Atlas BW	103
6.1	Ziel des Arbeitspakets.....	103

6.2	Begriffsdefinitionen	103
6.3	Visualisierung digitale Infrastruktur Deutschland	103
6.3.1	Mobilfunkmasten	103
6.3.2	Rechenzentren	105
6.3.3	Schwerindustrie.....	106
6.3.4	Breitbandabdeckung	107
6.3.5	Fazit	108
7	Arbeitspaket 6 – Bewertung, Öffentliche Verwaltung als First Mover, Kommunikation und Wissensvermittlung	109
7.1	Ziel des Arbeitspakets.....	109
7.2	Begriffsdefinitionen	109
7.2.1	Ökonomische Bewertung:	109
7.2.2	Ökologische Bewertung:	109
7.2.3	Soziale Bewertung:	109
7.3	Methodik	109
7.4	Beurteilung von Digitalisierungsmaßnahmen in Hinsicht auf ihren ökologischen, ökonomischen und sozialen Einfluss	110
7.4.1	Ökonomische Bewertung	110
7.4.2	Ökologische Leistungsbewertung.....	112
7.4.3	Soziale Leistungsbewertung	113
7.5	Nachhaltigkeitsindikatoren für Digitalisierungsmaßnahmen.....	115
7.5.1	Sozial.....	115
7.5.2	Ökonomisch.....	117
7.5.3	Ökologisch	118
8	Zusammenfassung und Ausblick	120
9	Literaturverzeichnis	122

Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG 1: SZENARIO SOMMER & AUTO	27
ABBILDUNG 2: SZENARIO SOMMER & S-BAHN	27
ABBILDUNG 3: SZENARIO WINTER & S-BAHN	28
ABBILDUNG 4: SZENARIO WINTER & S-BAHN (STROM)	28
ABBILDUNG 5: ERGEBNIS DURCHSCHNITT	29
ABBILDUNG 6: STREAMING KONZEPT	30
ABBILDUNG 7: ANNAHMEN STREAMING	31
ABBILDUNG 8: ENERGIEVERBRAUCH STREAMING BW	31
ABBILDUNG 9: ENTWICKLUNG STREAMING/TV	32
ABBILDUNG 10: ENERGIEVERBRAUCH VERGLEICH	33
ABBILDUNG 11: KONZEPT EPA (KBV)	34
ABBILDUNG 12: USA GESUNDHEITSSYSTEM EMISSIONEN	34
ABBILDUNG 13: AKTUELLER STAND EPA	36
ABBILDUNG 14: ERGEBNIS EPA VS. TRADITIONELL	37
ABBILDUNG 15: PROGNOSE ZUM UMSATZ MIT UNTERNEHMENSANWENDUNGEN IM BEREICH KÜNSTLICHE INTELLIGENZ WELTWEIT VON 2016 BIS 2025 (IN MILLIONEN US-DOLLAR) (STATISTICA. STATISTICA GMBH)	38
ABBILDUNG 16: STUFEN DES LEBENSWEGS VON PRODUKTEN UND DIENSTLEISTUNGEN	51
ABBILDUNG 17: UMWELTZEICHEN IN DEN BEREICHEN DER INFORMATIONEN- UND KOMMUNIKATIONSTECHNIK (KOMPASS LIEFERKETTENMANAGEMENT TEIL 1 2021)	53
ABBILDUNG 18: SSD-FESTPLATTE (ISTOCK 2021)	59
ABBILDUNG 19: SSD-FESTPLATTE (ISTOCK 2021)	60
ABBILDUNG 20: ÜBERSICHT SPEICHERDICHTEN VON 3D-NAND (COMPUTER BASE 2022)	61
ABBILDUNG 21: LIEFERKETTE IM DETAIL (KOMPASS NACHHALTIGKEIT 2023D)	63
ABBILDUNG 22: CRAY XC40 – HAZEL HEN (BORIS LEHNER FÜR HLRS)	72
ABBILDUNG 23: EINFLUSS DER LEISTUNGSBEGRENZUNG AUF ANWENDUNG "A"	76
ABBILDUNG 24: EINFLUSS DER LEISTUNGSBEGRENZUNG AUF ANWENDUNG "D"	77
ABBILDUNG 25: EINFLUSS DER LEISTUNGSBEGRENZUNG AUF ANWENDUNG "B"	78
ABBILDUNG 26: EINFLUSS DER LEISTUNGSBEGRENZUNG AUF ANWENDUNG "C"	78
ABBILDUNG 27: EINFLUSS DER LEISTUNGSBEGRENZUNG AUF ANWENDUNG "E"	79
ABBILDUNG 28: ELEKTRISCHE LEISTUNG UND RECHENLEISTUNG IN ABHÄNGIGKEIT DER RECHNERISCHEN LASTVERTEILUNG	81
ABBILDUNG 29: ZUSÄTZLICH BENÖTIGTE ENERGIE PRO OPERATION ALS FUNKTION DER LASTVERTEILUNG	81
ABBILDUNG 30: VERTEILUNG DER RECHNERISCHEN LASTENVERTEILUNG AUS POP2	83
ABBILDUNG 31: KUMULATIVE VERTEILUNG DER RECHNERISCHEN LASTENVERTEILUNG AUS POP2	84
ABBILDUNG 32: VERTEILUNG DER LASTVERTEILUNG NACH DER OPTIMIERUNG MI LVMIN = 70%	85
ABBILDUNG 33: ENERGIEBEDARF FÜR CPU- UND GPU-VARIANTE ALS FUNKTION DER RECHENLEISTUNG	88
ABBILDUNG 34: MAXIMALE ZEIT FÜR BROADCAST OPERATIONEN	91
ABBILDUNG 35: MAXIMALE ZEIT FÜR ALLREDUCE-OPERATIONEN	91

ABBILDUNG 36: MAXIMALE ZEIT FÜR REDUCE-OPERATIONEN	92
ABBILDUNG 37: KARTENANSICHT BADEN-WÜRTTEMBERG MIT DER VERTEILUNGSDICHTE VON MOBILFUNKMASTEN	104
ABBILDUNG 38: KARTENANSICHT BADEN-WÜRTTEMBERG MIT DER VERTEILUNGSDICHTE VON RECHENZENTREN	105
ABBILDUNG 39: KARTENANSICHT BADEN-WÜRTTEMBERG MIT DER VERTEILUNGSDICHTE VON SCHWERINDUSTRIE	106
ABBILDUNG 40: 5G-VERFÜGBARKEIT GEMEINDEEBENE BADEN-WÜRTTEMBERG	108

Tabellenverzeichnis

TABELLE 1: IDENTIFIZIERTE TRENDBEREICHE WELCHE DURCH DIE DIGITALISIERUNG MAßGEBLICH BEEINFLUSST WERDEN	12
TABELLE 2: TREND IM BEREICH (TEIL-)AUTONOMEN FAHREN	12
TABELLE 3: TREND IM BEREICH CAR SHARING/CARPOOLING	13
TABELLE 4: TREND IM BEREICH HOMEOFFICE UND MOBILES ARBEITEN.....	14
TABELLE 5: TREND IM BEREICH WEB MEETINGS.....	15
TABELLE 6: TREND IM BEREICH VIDEOSTREAMING	15
TABELLE 7: TREND IM BEREICH MUSIKSTREAMING.....	16
TABELLE 8: TREND IM BEREICH DIGITALE SPRECHSTUNDE.....	16
TABELLE 9: TREND IM BEREICH GESUNDHEITSDATEN	17
TABELLE 10: TREND IM BEREICH DER ELEKTRONISCHEN PATIENTENAKTE.....	17
TABELLE 11: TREND IM BEREICH MONITORING.....	18
TABELLE 12: TREND IM BEREICH INDUSTRIE 4.0.....	18
TABELLE 13: TREND IM BEREICH SIMULATION	19
TABELLE 14: TREND IM BEREICH ONLINE SHOPPING.....	20
TABELLE 15: TREND IM BEREICH SHARING/CIRCULAR ECONOMY.....	20
TABELLE 16: TREND IM BEREICH GEBÄUDEAUTOMATION	21
TABELLE 17: TREND IM BEREICH DIGITALE BIBLIOTHEK	22
TABELLE 18: TREND IM BEREICH DIGITALE ZEITUNGEN.....	22
TABELLE 19: TREND IM BEREICH ABFALLENTSORGUNG/STRAßENREINIGUNG	23
TABELLE 20: TREND IM BEREICH WASSERVERSORGUNG.....	23
TABELLE 21: TREND IM BEREICH AUTOMATION DER LANDWIRTSCHAFT.....	24
TABELLE 22: TREND IM BEREICH BÖRSENHANDEL	24
TABELLE 23: TREND IM BEREICH KRYPTOWÄHRUNG	25
TABELLE 24: ANNAHMEN EPA.....	35
TABELLE 25: AUSWIRKUNGEN BEIM EINSATZ VON SMART HOME SYSTEMEN.....	40
TABELLE 26: AUSWIRKUNGEN EINSATZ KI IM VERKEHRSEKTOR.....	41
TABELLE 27: AUSWIRKUNGEN BEIM EINSATZ VON KI IN DER LANDWIRTSCHAFT.....	44
TABELLE 28: DIE ACHT ILO-KERNARBEITSNORMEN	52
TABELLE 29: FRAGEN ZUR NACHHALTIGEN BESCHAFFUNG VON IT-GERÄTEN BZW. HPC-CLUSTERN (KOMPASS LIEFERKETTENMANAGEMENT TEIL 1 2021).....	54
TABELLE 30: MODELL-PARAMETER FÜR DIE CPU- UND MEM-VARIANTE.....	82
TABELLE 31: ENERGIEEFFIZIENZ FÜR DIE AUSGANGSSITUATION UND VERSCHIEDENE OPTIMIERUNGSZIELE FÜR CPU- UND MEM-VARIANTE	86

1 Einleitung

Das Forschungsvorhaben wird durch die Projektpartner Höchstleistungsrechenzentrum Stuttgart (HLRS), Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER), DIALOGIK GmbH und der Universität Ulm (UUI) bearbeitet. Durch die Zusammensetzung des Konsortiums wird die komplette Wertschöpfungskette der Digitalisierung von der Herstellung bis zur Entsorgung abgedeckt. Das Forschungsvorhaben ist in sechs inhaltliche und ein administratives Arbeitspaket unterteilt.

Das erste Arbeitspaket befasst sich mit der Identifikation von Megatrends im Bereich der Digitalisierung. Im zweiten Arbeitspaket werden die Herstellung von Geräten und Einrichtungen sowie die Beschaffung und der Einkauf betrachtet. Der Lebenszyklus von in Rechenzentren verwendeter Hardware soll näher beleuchtet werden. Arbeitspaket drei betrachtet aktuelle Trends und Entwicklungen beim Betrieb digitaler Infrastrukturen von (High Performance Computing Center (HPC)) Rechenzentren sowie Büroarbeitsplätzen der öffentlichen Verwaltung. Arbeitspaket 4 befasst sich intensiv mit den Anwenderperspektiven. In Arbeitspaket 5 werden Visualisierungen im Bereich der digitalen Infrastruktur erstellt. Das letzte Arbeitspaket (AP 6) befasst sich mit einer ganzheitlichen Bewertung von Digitalisierungsmaßnahmen, mit der Wissensvermittlung nach Projektende und der Umsetzung von Konzepten.

Der vorliegende Forschungsbericht beschreibt die Motivation, die Ziele, die Methoden und die Ergebnisse der einzelnen Arbeitspakete in der oben genannten Reihenfolge. Der Bericht wird mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick abgeschlossen.

1.1 Motivation und Ziel des Forschungsvorhabens

Das Projekt ENRICH zielt drauf ab, verschiedene Aspekte der Digitalisierung zu untersuchen, um umfassende Unterstützung und Lösungsansätze in Bezug auf Nachhaltigkeit und Effizienz zu bieten. Die IT-Branche und die Rechenzentren sind ein wichtiger Bestandteil der Digitalisierung, die dazu benötigt werden diese voranzutreiben. Rechenzentren und Informationstechnik sollen einen Beitrag zur Emissionsreduktion leisten und damit den Zielpfad der Europäischen Union zur Klimaneutralität unterstützen. Sie verbrauchen jedoch große Mengen an Energie (Zandt 2022) und Ressourcen wie Strom, Wasser und Rohmaterialien. Durch die Erforschung von Lösungen zur Energieeinsparung, Ressourceneffizienz und Nachhaltigkeit in diesem Bereich kann dazu beigetragen werden, die Umweltauswirkungen in diesem Bereich zu reduzieren.

Darüber hinaus setzen Regierungen und internationale Organisationen zunehmend auf strenge Vorschriften und Richtlinien zur Steigerung der Energieeffizienz und Nachhaltigkeit (Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz 2023a). Durch die Forschung in diesem Bereich können Unternehmen und Organisationen sicherstellen, dass sie den gesetzlichen Anforderungen entsprechen und potenzielle Strafen oder rechtliche Konsequenzen vermeiden. Die Erforschung von Energie- und Ressourceneffizienz im IT-Sektor und bei Rechenzentren fördert technologische Innovationen. Neue Ansätze, Technologien und Best Practices können entwickelt werden, um den Energieverbrauch zu reduzieren, erneuerbare Energiequellen zu nutzen und den Lebenszyklus von IT-Geräten zu optimieren. Dies kann zu wirtschaftlichen Vorteilen führen und gleichzeitig den Fortschritt in Richtung einer nachhaltigen Gesellschaft unterstützen.

Um Erkenntnisse in möglichst vielen Bereichen zu erzielen, ist das Projekt in sechs Arbeitspakete unterteilt, die ineinandergreifen.

Arbeitspaket 1 widmet sich der Untersuchung und Bewertung der Megatrends im Bereich der Digitalisierung, um einen umfassenden Überblick über den aktuellen Stand und deren Auswirkungen zu erhalten. Dabei werden spezifische Aspekte, wie zum Beispiel das Homeoffice (Kapitel 2.5.1) besonders berücksichtigt und eingehend bewertet.

Im Rahmen von Arbeitspaket 2 wird der Lebenszyklus, von Beschaffung bis zur Entsorgung, von IT-Geräten untersucht. Diese ganzheitliche Betrachtung ist notwendig, um die Umweltauswirkungen um-

fassend zu verstehen und gezielte Maßnahmen zur Verbesserung zu ergreifen. Die Ergebnisse aus diesem Arbeitspaket werden in Form eines Handouts mit den wichtigsten Erkenntnissen zur Verfügung gestellt.

In Arbeitspaket 3 werden aktuelle Trends und Entwicklungen beim Betrieb digitaler Infrastrukturen von (HPC) Rechenzentren sowie Büroarbeitsplätzen der öffentlichen Verwaltung betrachtet. Dabei werden die aktuellsten Entwicklungen

- des effizienten Rechnerbetriebs von HPC-Systemen (AP 3.1) welche einen großen Teil des Energiebedarfs der IT der Landesverwaltung ausmachen,
- des Einsatzes effizienter Programmierung (AP 3.2),
- des Einsatzes intelligenter Netze sowie (AP 3.3)
- beim Betrieb digitaler Infrastrukturen – Office, Telekommunikation und Media (AP 3.4) betrachtet.

Ziel dieses Arbeitspakets ist die Abschätzung der Effizienzpotentiale sowie die Entwicklung von Faktoren und Indikatoren für deren Übertragung auf andere (HPC) Rechenzentren und Büroarbeitsplätze der öffentlichen Verwaltung in Baden-Württemberg. Außerdem wird der nötige Personal- und Arbeits-einsatz zur Umsetzung der Effizienzsteigerung bei der Programmierung bewertet.

Arbeitspaket 4 analysiert Digitalisierungstrends aus Arbeitspaket 1 hinsichtlich deren Potential und Risiko auf Energie- und Ressourcenebene. Zudem werden Perspektiven und Handlungsoptionen beschrieben.

Arbeitspaket 5 soll unter Zuhilfenahme öffentlich verfügbarer Daten die Digitalisierung in Baden-Württemberg darstellen.

Das sechste Arbeitspaket bildet die öffentliche Schnittstelle des Projektes und dient dazu die erzielten Ergebnisse im Projekt zu aggregieren und praxisorientiert zu kommunizieren. Die Anwendbarkeit der Ergebnisse ist hier der Leitgedanke, um den Wissenstransfer an externe Anwendende zu vereinfachen. Hierzu gehört es, die gewonnenen Erkenntnisse der anderen Arbeitspakete zusammenzufassen und zu bewerten. Teil dieser Bewertung ist die Festlegung eines Indikatorensets, welches zur Bewertung von Digitalisierungsmaßnahmen bezüglich ihrer Nachhaltigkeit herangezogen werden kann und den Status quo in Baden-Württemberg angibt bzw. einordnet.

Diese Arbeitspakete ermöglichen einen umfassenden Blick auf verschiedene Aspekte der Digitalisierung. Ein besonderes Augenmerk liegt dabei auf der Anwendbarkeit der Ergebnisse, um den Wissenstransfer für externe Anwendende zu erleichtern.

2 Arbeitspaket 1 – Megatrends in der Digitalisierung und zukünftige Entwicklung

2.1 Ziel des Arbeitspakets

Im Rahmen dieses Arbeitspakets sollen die möglichen Auswirkungen von Megatrends im Bereich der Digitalisierung auf den Ressourcen und Energieverbrauch in Baden-Württemberg qualitativ beschrieben und abgeschätzt werden. Basierend auf den identifizierten Megatrends soll am Beispiel von drei Megatrends der Einfluss quantifiziert werden. Aufgrund seiner Omnipräsenz wird auf das Thema Künstliche Intelligenz (KI) und dessen Einfluss auf Energie- und Ressourcenverbrauch in einem eigenen Unterkapitel eingegangen.

2.2 Begriffsdefinitionen

Um eine einheitliche Definitionsgrundlage zu schaffen soll der Begriff Megatrend kurz definiert und beschrieben werden, da dieser im allgemeinen Sprachgebrauch nicht konsistent verwendet wird.

Der Ursprung des Begriffs Megatrend geht auf den Zukunftsforscher John Naisbitt zurück, welcher 1982 das Buch „Megatrends. Ten New Directions Transforming Our Lives“ veröffentlichte (Naisbitt 1986). Naisbitt definiert darin einen Megatrend als eine langfristige Veränderung, die über einen langen Zeitraum eine Gesellschaft grundlegend verändert. Im Originalwortlaut heißt es: „Megatrends (...are) large social, economic, political, and technological changes (...), they influence us for some time – between seven and ten years, or longer“.

Abweichend von Naisbitt soll in diesem Projekt der Begriff Megatrend enger gefasst werden und sich auf konkrete Veränderungen in gesellschaftlichen, wirtschaftlichen und technischen Bereichen beziehen, die von der Digitalisierung grundlegend verändert oder erweitert werden. Der Begriff Megatrend umfasst somit konkrete Bereiche des Lebens, welche durch die Digitalisierung betroffen sind. Hierzu gehören beispielsweise die Bereiche Mobilität, Arbeitsplatz, Unterhaltung und Konsum. Die Eingrenzung des Begriffs Megatrends ermöglicht es hier konkret auf bestimm- und messbare Effekte in der Gesellschaft einzugehen. Im Weiteren wird für das Wort Megatrend auch die Bezeichnung Trendbereich als Überbegriff für verschiedenen Veränderungen verwendet.

2.3 Methodik

Für das Arbeitspaket 1 wurden die folgenden wissenschaftlichen Methoden angewandt:

- **Identifizierung**
Der Denken-Teilen-Austauschen Ansatz wird für die Identifikation von Trendbereichen herangezogen. Dieser Prozess wird iterativ zwischen den Projektpartnern durchgeführt, um einen umfassenden Überblick über die relevanten Trendbereiche zu erhalten.
- **Literaturrecherche**
Die Literaturrecherche basiert auf einer systematischen Analyse der verfügbaren Quellen (Fachliteratur, Datenbanken, Statistiken oder Websites). Diese diente vor allem dazu, den Stand der Wissenschaft zu ermitteln.
- **Befragungen**
Um den Stand der Wissenschaft und die Ergebnisse aus der Literaturrecherche zu validieren werden verschiedene Experten befragt.

Folgend auf eine Identifikation von relevanten Trendbereichen, werden mithilfe einer Literaturrecherche über die Trendbereiche konkrete Anwendungsgebiete sowie Bereiche ermittelt, um deren Veränderung durch die Digitalisierung und deren Energie- bzw. Ressourcenverbrauch qualitativ zu beschrie-

ben. Basierend auf Expertenbefragungen werden aus dieser Übersicht drei Trends ausgewählt und genauer untersucht. Hierbei soll ein quantifizierter Möglichkeitenkorridor erstellt werden, um die Entwicklung in Bezug auf den Energie- und Ressourcenverbrauch einzuordnen.

2.4 Trendbereich

Zur Identifikation von Trendbereichen wurde im Denken-Teilen-Austauschen Ansatz eine Liste mit relevanten Trendbereichen erstellt. Diese ist in Tabelle 1 zusammengefasst. Die Trendbereiche werden im Folgenden beschrieben und wenn nötig in Subkategorien unterteilt. Jedem Trend wird, basierend auf einer Literaturrecherche, eine zu erwartende Trendbewertung durch die Digitalisierung in den Kategorien Ressourcen- und Energieverbrauch gegeben.

Mobilität/Logistik	Arbeitsplatz	Unterhaltung	Gesundheit
Industrie/Wirtschaft	Konsum	Bildung	Finanzwesen
Landwirtschaft	Kommunale Daseinsvorsorge	Wohnen	

Tabelle 1: Identifizierte Trendbereiche welche durch die Digitalisierung maßgeblich beeinflusst werden

2.4.1 Mobilität/Logistik

Die Digitalisierung verändert die Mobilität der Gesellschaft im Ganzen und gewisse Branchen im speziellen. Von besonderer Relevanz sind hier die Aspekte des (teil-)autonomen Fahrens sowie der gesenkten Nutzerschwelle für Carsharing, welche durch die Digitalisierung ermöglicht wird. Beide Trends befinden sich in der Anfangsphase und haben den Markt noch nicht flächendeckend erreicht. Im Folgenden wird darauf näher eingegangen.

An dieser Stelle soll erwähnt werden, dass die Elektrifizierung des Verkehrs ein paralleler Prozess ist, welcher den Ressourcen- und Energieverbrauch von Mobilität maßgeblich beeinflusst. Dieser Trend findet jedoch unabhängig von der Digitalisierung statt und wird deshalb hier nicht berücksichtigt.

(Teil-)Autonomes Fahren

	Ressourcenverbrauch	Energieverbrauch
Erwartete Veränderung durch die Digitalisierung in diesem Bereich verglichen mit dem Status Quo	Steigerung	Unklar

Tabelle 2: Trend im Bereich (teil-)autonomen Fahren

Das Thema autonomes Fahren erfährt breite Aufmerksamkeit aus Wirtschaft und Bevölkerung. Technisch betrachtet, handelt es sich dabei um teilautomatisiertes Fahren. Die Autonomie des Fahrzeugs lässt sich in 6 Stufen einteilen:

- Stufe 0: Keine Automation. Der Fahrende lenkt, beschleunigt und bremst selbst.
- Stufe 1: Das Auto verfügt über einzelne unterstützende Systeme, wie Antiblockiersystem (ABS), die selbsttätig eingreifen. Dies entspricht in weiten Teilen dem Status Quo der heutigen Mobilität.
- Stufe 2: Automatisierte Systeme übernehmen Teilaufgaben (z. B. adaptive Geschwindigkeitsregelung, Spurwechselassistent, automatische Notbremsung). Der Fahrende behält aber die

Kontrolle über das Fahrzeug und die Verantwortung. Dieser Technologiestand ist ebenfalls bereits vermehrt in Deutschland verfügbar.

- Stufe 3: Das Auto kann streckenweise selbsttätig beschleunigen, bremsen und lenken (bedingte Automation). Bei Bedarf fordert das System den Fahrenden auf, die Kontrolle zu übernehmen. Dieser Technikstand ist bereits kommerziell verfügbar, jedoch noch nicht weit verbreitet.
- Stufe 4: Im Normalbetrieb kann das Fahrzeug vollständig autonom fahren. Der Fahrende hat aber die Möglichkeit einzugreifen und das System zu „überstimmen“.
- Stufe 5: Vollautomatisierter, autonomer Betrieb des Fahrzeugs ohne die Möglichkeit (und Notwendigkeit) des Eingreifens durch den Fahrenden.

Folgende Effekte sind mit steigender und flächendeckender Nutzung von (teil-)autonomen Fahren auf den Ressourcen- und Energieverbrauch zu erwarten:

- erhöhter Ressourcenverbrauch durch mehr Hardware in Form von Sensoren, Mess- und Verarbeitungselektronik im Vergleich zu konventionellen PKWs
- erhöhter Energieverbrauch des PKWs durch aktive Verbraucher, wie Sensoren und Datenverarbeitung
- reduzierter Energieverbrauch (Treibstoffverbrauch) durch effizienteres Fahrverhalten im Vergleich zu menschlichem Eingreifen.

Eine Studie von Zhu et al. (Zhu et al. 2019) gibt für den Einsatz von Abstandsregeltempomaten (Stufe 2 Autonomie) eine mögliche Treibstoffeinsparung von durchschnittlich 5–7 % an. In einer Studie von Wadud und Kollegen (Wadud et al. 2016) wurde der Effekt einer weitreichenden Automatisierung des Verkehrs betrachtet. Der mögliche Lösungsraum wird in dieser Studie mit einer Halbierung oder Verdoppelung des Energieverbrauchs durch den Verkehrssektor angegeben. Diese Ambivalenz der Auswirkungen liegt laut den Autoren an den möglichen Nutzerszenarien und der Effekte, die durch die Automatisierung dominieren.

Car Sharing/Carpooling

	Ressourcenverbrauch	Energieverbrauch
Erwartete Veränderung durch die Digitalisierung in diesem Bereich verglichen mit dem Status Quo	Reduzierung	Reduzierung

Tabelle 3: Trend im Bereich Car Sharing/Carpooling

Juristisch formuliert stellt Carsharing die „organisierte gemeinschaftliche Nutzung eines oder mehrerer Automobile auf der Grundlage einer Rahmenvereinbarung (Daniel Zhang, Nestor Maslej, Erik Brynjolfsson, John Etchemendy, Terah Lyons, James Manyika, Helen Ngo, Juan Carlos Niebles, Michael Sellitto, Ellie Sakhaee, Yoav Shoham, Jack Clark und Raymond Perrault 2022; Bundesverband Car Sharing 2007) dar“. Im Vergleich zur Autovermietung erlaubt das Carsharing eine kurzzeitige bzw. minutenweise Anmietung eines Fahrzeugs. Die nutzerfreundliche Verwendung dieser Services basiert auf neu geschaffenen Möglichkeiten der Digitalisierung und ermöglicht es einen PKW automatisch über eine App oder ein Ausweisdokument zu nutzen. Neben dem Kostenvorteil für die Kund*innen können sich auch Vorteile im Energie- und Ressourcenverbrauch durch die Nutzung von Carsharing ergeben.

Eine Studie von Amatuni (Amatuni et al. 2020) beziffert den Effekt der reduzierten Treibhausgasemissionen über die Lebenszeit eines PKWs auf 3–18 % im Vergleich zu herkömmlichen PKW-Nutzung. Vorangegangenen Studien schätzen den gleichen Effekt auf 67 %, sie vernachlässigten aber die stärkere Abnutzung des PKWs durch Carsharing. Chen und Kollegen (Peng Chen, Songhua Hu et al.) errechneten

für den Einsatz von Carsharing eine Einsparung von 5 % des mobilitätsbezogenen Energieverbrauchs von Haushalten.

Carpooling ist eine dem Carsharing Konzept verwandte Methode für PKW-Nutzung. Beim Carpooling nimmt der Fahrende auf einer vorher kommunizierten Strecke bekannte oder fremde Personen mit. Das spontane Carpooling kann auch als klassisches Trampen bezeichnet werden und wurde aufgrund der durch die Digitalisierung vereinfachten Kommunikation für viele Nutzende planbarer, sicherer und attraktiver. Da beim Carpooling mehrere Personen im gleichen Fahrzeug bewegt werden, sinkt der personenbezogene Energieverbrauch pro gefahrene Strecke. Sowohl Carsharing als auch Carpooling können durch den Einsatz von Digitalisierung für Nutzende attraktiver werden und somit zu einer stärkeren Marktdurchdringung führen. Es ist zu erwarten, dass der Einfluss der Digitalisierung auf diese Trendbereiche eine positive Auswirkung auf den Energie- und den Ressourcenverbrauch hat (siehe Tabelle 3).

2.4.2 Arbeitsplatz

Die Digitalisierung verändert den Arbeitsplatz, vor allem von Bildschirm- und Bürotätigkeiten. In Deutschland sind 36,7 % der Beschäftigten (Arbeitnehmende, Verbeamtete und Selbstständige) in einem Büro tätig. Von besonderer Relevanz sind hier die Aspekte des Homeoffice sowie die gesenkte Nutzerschwelle für Webmeetings durch Digitalisierung, die als Alternative zu Dienstreisen genutzt werden.

Homeoffice und mobiles Arbeiten

	Ressourcenverbrauch	Energieverbrauch
Erwartete Veränderung durch die Digitalisierung in diesem Bereich verglichen mit dem Status Quo	Steigerung	Reduzierung

Tabelle 4: Trend im Bereich Homeoffice und mobiles Arbeiten

Homeoffice (auch Telearbeit oder Teleheimarbeit genannt) ist eine Arbeitsorganisation, bei der Beschäftigte ihre Tätigkeit ganz oder teilweise außerhalb der Büros des Unternehmens ausüben. Juristisch relevant ist hier die Unterscheidung zwischen Homeoffice und mobilem Arbeiten, da beim Homeoffice der Arbeitgebende für die adäquate Ausstattung des Arbeitsplatzes verantwortlich ist. Hinsichtlich des Energie- und Ressourcenverbrauchs ist diese Unterscheidung jedoch nicht entscheidend.

Relevant ist dafür die Differenzierung von reiner Teleheimarbeit und alternierender Telearbeit. Die Arbeitnehmenden verfügen in der reinen Teleheimarbeit über keinen Arbeitsplatz in den Räumlichkeiten des Unternehmens und verrichten Tätigkeit komplett von zu Hause aus. Diese Form ist in Deutschland noch weniger verbreitet.

In der alternierenden Telearbeit findet ein Wechsel zwischen Heimarbeit und Arbeiten im Unternehmen statt. Hierbei kann es zu redundanter Arbeitsmittelausrüstung wie Telefon, Drucker, Laptop oder PC kommen. Diese Variante ist in Deutschland vorherrschend, wenn über das Thema „Homeoffice“ gesprochen wird. Die SarsCoV2 Pandemie führte zu einem signifikanten Anstieg der alternierenden Telearbeit in Deutschland. In der Verwaltung stieg der Anteil der ganz oder teilweise in Telearbeit beschäftigten von 16 % auf 73 %. Nach dem Lockdown sank der Anteil wieder auf 42 % (PWC 2021).

Miller (Miller, G., & Gatersleben, B. 2011) gibt in seiner Arbeit ein Energieverbrauchsreduktionspotenzial von 30,8 % durch die Einführung von drei Tagen Telearbeit an und führt dies vor allem auf die Vermeidung von Arbeitswegen zurück. Der Effekt auf den Ressourcenverbrauch hängt jedoch stark davon ab, ob für die Telearbeit redundanten Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT)

Ausrüstung nötig ist, was den Ressourcenverbrauch durch die Einführung von alternierender Telearbeit sogar erhöhen kann.

Basierend auf der aktuellen Umsetzung ist zu erwarten, dass das Homeoffice den Energieverbrauch auf der einen Seite reduziert und auf der anderen Seite den Ressourcenverbrauch ansteigen lässt (siehe Tabelle 4). Mit einer konsequenten Umsetzung einer Vermeidungsstrategie zur redundanten Ausstattung kann der Ressourcenverbrauch aber perspektivisch im Vergleich zur normalen Büroarbeit gesenkt werden.

Web Meetings

	Ressourcenverbrauch	Energieverbrauch
Erwartete Veränderung durch die Digitalisierung in diesem Bereich verglichen mit dem Status Quo	Reduzierung	Reduzierung

Tabelle 5: Trend im Bereich Web Meetings

Miller untersucht in seiner Arbeit auch die Auswirkungen einer verstärkten digitalen Meetingkultur. Es wird ein Energieeinsparpotenzial von 3,3 % angegeben, sollte der Anteil von Videokonferenzen als Alternative zu Geschäftsreisen von 11 auf 15 % ansteigen. Grund für die Einsparung sind die vermiedenen Energieverbräuche des Personentransports, welche die Energiemehrverbräuche für Raumwärme- und Warmwasserbereitstellung sowie das Videokonferenzsystem überwiegen.

Bezüglich des Ressourcenverbrauchs kann davon ausgegangen werden, dass dieser nicht erhöht wird, da die für Web-Meetings nötige Infrastruktur derzeit bereits zum Status Quo der Büroausstattung gehört (siehe Tabelle 5).

2.4.3 Unterhaltung

Die Digitalisierung verändert den Konsum von Unterhaltungsmedien der Gesellschaft. Besonders das Konzept Inhalte „On-Demand“ zu nutzen ersetzt zunehmend das lineare Fernsehen und Radio. Im Folgenden soll im Bereich der Unterhaltung vor allem auf die Themen Videostreaming und Musikstreaming eingegangen werden.

Video Streaming

	Ressourcenverbrauch	Energieverbrauch
Erwartete Veränderung durch die Digitalisierung in diesem Bereich verglichen mit dem Status Quo	Reduzierung	Steigend

Tabelle 6: Trend im Bereich Videostreaming

Fortschritte bei den digitalen Technologien, wie verbesserte Videokompression und höhere Datenübertragungsgeschwindigkeiten, eröffneten Anfang der 90er Jahre die Möglichkeit, Video-on-Demand-Dienste (VoD) anzubieten. Kingston Communication in Großbritannien startete 1998 den ersten voll kommerziellen VoD-Dienst. Seitdem stehen die traditionellen Rundfunkdienste mit ihrem statischen Sendeplan zunehmend unter Druck mit diesen neuartigen Diensten zu konkurrieren. Die Verbrauchenden nutzen mehr und mehr die On-Demand-Angebote, die ihnen die Freiheit geben, Inhalte zu den für sie günstigsten Zeiten anzusehen und anzuhören.

Der Energieverbrauch im Videostreaming ist im Gegensatz zu dem geringen zusätzlichen Ressourcenverbrauch recht hoch (siehe Tabelle 6). Das Volumen der Datenübertragung, welche für das Streaming notwendig ist, ist hierbei maßgeblich.

Musikstreaming

	Ressourcenverbrauch	Energieverbrauch
Erwartete Veränderung durch die Digitalisierung in diesem Bereich verglichen mit dem Status Quo	Reduzierung	Reduzierung

Tabelle 7: Trend im Bereich Musikstreaming

Vergleichbar zum Videostreaming, haben auch im Musikbereich technologische Fortschritte dafür gesorgt, dass sich der Konsum verändert hat. Von Aufnahmen auf Tonträgern, wie Kassette und CD, über den Kauf von digitalen Titeln bspw. über iTunes, ist die Entwicklung im Angebot von Streamingdiensten gemündet. Für monatliche Pauschalen können Kund*innen von Unternehmen wie Apple Music, Deezer oder Spotify auf Millionen von Titeln und Formaten zugreifen.

Ähnlich wie im Bereich des Videostreamings, werden hierbei die eingesetzten Ressourcen reduziert. Allerdings fällt beim Streaming von Musik erheblich weniger Datenübertragung an, sodass durch Einsparungen in Transport und Produktion, die energetische Entwicklung positive zu sehen ist (siehe Tabelle 7).

2.4.4 Gesundheit

Die Digitalisierung verändert das Gesundheitswesen rasant. Digitale Angebote werden von einer zunehmenden Anzahl von Ärzt*innen angeboten und von Bürger*innen auch eingefordert. Die Pandemie hat diese Entwicklung zusätzlich gefördert. In diesem Kapitel wird auf drei exemplarische Phänomene eingegangen.

Digitale Sprechstunde

	Ressourcenverbrauch	Energieverbrauch
Erwartete Veränderung durch die Digitalisierung in diesem Bereich verglichen mit dem Status Quo	Reduzierung	Reduzierung

Tabelle 8: Trend im Bereich Digitale Sprechstunde

Digitale Sprechstunden sind ein integraler Teil des wachsenden digitalen Gesundheitsangebots. Neben Gesundheit-Apps und der digitalen Patientenakte, hilft dieses Angebot die Gesundheitsversorgung zu verbessern und effizienter zu machen und birgt somit das Versprechen, systemischen Herausforderungen, wie etwa dem Ärztemangel, entgegenzuwirken.

Die digitale Sprechstunde gewinnt in den letzten Jahren an Popularität. Bis zu 45 % aller Patient*innen geben in repräsentativen Studien schon vor der Pandemie an, dass sie eine digitale Sprechstunde nutzen würden. Das erhöhte Infektionsrisiko bei offline Besuchen in der Praxis, hat die Anzahl an durchgeführten Video-Sprechstunden weiter in die Höhe schnellen lassen. Jede achte zu behandelnde Person gibt an, bereits Erfahrungen mit Online-Sprechstunden gemacht zu haben, und die wenigsten (1

%) geben an, diese Erfahrung nicht wiederholen zu wollen. Andere Gründe für die Nutzung eines digitalen Angebots sind bspw. der schnellere Zugang zu ärztlicher Betreuung, weniger Wartezeit oder schlicht Bequemlichkeit (McKinsey & Company 2020; Bestsenny et al. 2021).

Aus energetischer Sicht lassen sich digitale Sprechstunden ähnlich bewerten wie Webmeetings-Konstellationen. Es ist davon auszugehen, dass das nötige Equipment beidseitig bereits vorhanden ist, weswegen eine erhöhte Nutzung von Ressourcen nicht zu erwarten ist. Auch der Energieverbrauch ist, wenn dieser mit dem analogen Weg zur Praxis verglichen wird, aus energetischer Sicht positiv einzuordnen (siehe Tabelle 8).

Tracking Gesundheitsdaten

	Ressourcenverbrauch	Energieverbrauch
Erwartete Veränderung durch die Digitalisierung in diesem Bereich verglichen mit dem Status Quo	Steigend	Reduzierung

Tabella 9: Trend im Bereich Gesundheitsdaten

Ähnlich wie in anderen Bereichen der Wirtschaft, findet auch im Gesundheitswesen eine vermehrte Datennutzung statt. Das ist auf die von der Digitalisierung ermöglichten Trends im Bereich Apps und Wearables zurückzuführen. Neuartige Geräte wie etwas Fitnesstracker und Smartwatches erheben täglich Daten in den unterschiedlichsten Anwendungsgebieten. So können bspw. Schlafdauer- und -qualität, Fitnesslevel und die täglich zurückgelegte Distanz quantifiziert werden. Das führt unter anderem zu einer erhöhten Motivation im sportlichen Training, weniger Notwendigkeit von medizinischen Konsultationen und zu einer solideren und breiten Datenbasis für gesundheitsrelevante Forschung.

Aus energetischer Sicht wird aufgrund der steigenden Anzahl von Sensoren und Tracking Geräten der Ressourcenverbrauch gesteigert (siehe Tabelle 9). Der Energieverbrauch bleibt größtenteils unverändert. Die Sensoren und Geräte verbrauchen sehr wenig Strom, welcher durch weniger Arztbesuche und deswegen weniger Mobilität aufgewogen wird (TA-Swiss 2021).

Elektronische Patientenakte

	Ressourcenverbrauch	Energieverbrauch
Erwartete Veränderung durch die Digitalisierung in diesem Bereich verglichen mit dem Status Quo	Reduzierung	Reduzierung

Tabella 10: Trend im Bereich der elektronischen Patientenakte

Einrichtungübergreifende und elektronische Patientenakten werden seit viele Jahren als wichtiger Bestandteil einer besseren Gesundheitsversorgung diskutiert. Vergangene Studien zeigen, dass besonders Deutschland in dieser Hinsicht noch einiges aufzuholen hat. Sorgen bezüglich des Datenschutzes und des Eigentums der sensiblen Daten haben viele bisherige Initiativen gebremst (Bertelsmann 2021).

Die eAkten versprechen sowohl den Patienten als auch den Leistungsbringern mehr Transparenz und Instrumente in die Hände zu geben, um fundierte gesundheitliche Entscheidungen zu treffen. Aus energetischer Sicht gibt es keine signifikanten Veränderungen (siehe Tabelle 10). Die benötigten Ressourcen in Form digitaler Speicherplätze sind ausreichend vorhanden und benötigen allenfalls einer

besseren Einbindung in bestehende Systeme. Zudem ist davon auszugehen, dass Ressourcen in Papierform eingespart werden. Ähnliche Annahmen lassen sich bezüglich des Energieverbrauchs machen, weswegen hier abermals keine signifikanten Veränderungen zu erwarten sind.

2.4.5 Industrie/Wirtschaft

Die Digitalisierung verändert große Teile der Wirtschaft rasant. Es werden neue Wirtschaftszweige erschaffen und bestehende erfahren eine Disruption. Im Folgenden werden drei Trends in der Wirtschaft exemplarisch in Hinsicht auf Ressourcenverbrauch und Energieverbrauch untersucht.

Monitoring

	Ressourcenverbrauch	Energieverbrauch
Erwartete Veränderung durch die Digitalisierung in diesem Bereich verglichen mit dem Status Quo	Reduzierung	Reduzierung

Tabelle 11: Trend im Bereich Monitoring

Im Zuge der Digitalisierung von Wirtschaft und Industrie können anfallende Daten für das kontinuierliche Monitoring von Prozessen genutzt werden. Diese Vorteile lassen sich sehr breit fassen. Das Monitoring beinhaltet in diesem Fall sowohl das Monitoring von Marketing Maßnahmen im digitalen Raum (Social-Media-Monitoring), als auch das Monitoring von internen Business Prozessen (z.B. People Analytics) und Produktionsprozessen. In Verbindung mit intelligenten Algorithmen kann Monitoring auch aktiv ausgeführt werden. Im Beispiel der Überwachung von Produktionsprozessen können hierbei bspw. Anomalien von Maschinen frühzeitig erkannt werden und vorzeitig Korrekturen vorgenommen werden (z.B. predictive maintenance).

In diesem Zuge ist von minimalen zusätzlichen Ressourcen auszugehen, die im Zuge von vermehrter Monitoring Vorhaben gebraucht werden. Auf der anderen Seite ergeben sich positive Effekte für die effektive Nutzung von Ressourcen, etwa durch frühzeitiges Erkennen von Anomalien (wie oben beschrieben). Der Energieverbrauch dieser Monitoring-Anwendung ist ebenfalls zu vernachlässigen im Vergleich zu den Einsparungen aus der Optimierung von Prozessen (siehe Tabelle 11).

Industrie 4.0

	Ressourcenverbrauch	Energieverbrauch
Erwartete Veränderung durch die Digitalisierung in diesem Bereich verglichen mit dem Status Quo	Reduzierung	Reduzierung

Tabelle 12: Trend im Bereich Industrie 4.0

Die Vernetzung von Produktionsstätten und Prozessen durch Sensoren hat im Zuge der Digitalisierung bereits viel Aufmerksamkeit erhalten. Durch die Übertragung der physischen Vorgänge in digitale Repräsentationen (Digital Twins) lassen sich zahlreiche Mehrwerte schaffen. Für digitale Zwillinge lassen sich höhere Effizienzen und Qualitäten der produzierten Güter, reduzierte Risiken und mehr Flexibilität sowie Transparenz feststellen. Zusätzlich wird durch die Vernetzung von Produktionsfaktoren Automatisierung und damit Effizienzgewinne und Profitsteigerung im großen Stil ermöglicht.

Für den Aufbau der nötigen Infrastruktur in Industrie 4.0 werden zunächst die Ressourcenverbräuche insbesondere im Elektrotechnikbereich steigen. Aller Voraussicht nach werden jedoch im Zuge der Steigerung in puncto Materialausschuss diese Verbräuche ausgeglichen, sodass auf lange Sicht eine Verbesserung der Ressourcennutzung einsetzt (siehe Tabelle 12). Bezüglich des Energieverbrauchs lässt sich festhalten, dass zwar für zusätzliche Sensoren, Module und digitale Infrastruktur Energie verwendet wird, dass jedoch die Effizienzgewinne und eine intelligente Steuerung von Produktionsprozessen diesen mehr als ausgleichen wird (Deloitte 2020).

Simulation

	Ressourcenverbrauch	Energieverbrauch
Erwartete Veränderung durch die Digitalisierung in diesem Bereich verglichen mit dem Status Quo	Reduzierung	Reduzierung

Tabelle 13: Trend im Bereich Simulation

Die durch digitale Technologien ermöglichten Fortschritte in der Simulation schlagen sich in den unterschiedlichsten Branchen nieder. Besonders in Verbindung mit Künstlicher Intelligenz (KI) können hier große Schritte in Richtung einer effizienteren Wirtschaft gegangen werden.

In der Versorgungs- und Energieindustrie können beispielsweise bestehende, innovative Entwürfe und Prozesse simuliert und somit optimiert werden, inklusive Einsparungen in der Energienutzung und Ressourcennutzung (Siemens). In der Chemieindustrie und -forschung wird auf Simulationen zurückgegriffen, um den Einsatz von knappen Ressourcen zu verringern das Potential von Experimenten abzuschätzen und strategische Entscheidungen zu treffen (ACS). In Kombination mit KI wird computergestützte Simulation von Proteinfaltung vorgenommen. Das ist für die Synthese von Molekülen in der Pharmabranche besonders interessant, weil auch dadurch der Einsatz von Faltungshilfen optimiert werden kann (Doerr 2017; American Chemical Society 2021; Siemens Digital Industries Software 2021).

Ähnlich wie in der Industrie 4.0 werden zunächst erhöhte Ressourcenverbräuche für den Aufbau der nötigen IT-Infrastruktur verzeichnet. Jedoch wird durch die Optimierung von Ressourceneinsatz dieses Plus mittel bis langfristig abgebaut. Ähnliches gilt auch für den Energieverbrauch (siehe Tabelle 13). Zwar werden signifikante Energieverbräuche für komplexe Simulationen angesetzt, diese relativieren sich jedoch im Vergleich zur eingesparten Energie durch die Optimierung von Prozessen.

2.4.6 Konsum

Die Omnipräsenz von digitalen Dienstleistungen und Produkten hat die Art und Weise verändert, in der Konsumierende an Waren herangebracht werden und in der sie gekauft werden. Das Erbe der traditionellen, linearen Wirtschaft hat sich zudem als gefährlich für das ökologische Gleichgewicht des Planeten herausgestellt. Davon inspiriert und von Digitalisierung ermöglicht, zeigen sich neue Entwicklungen in der Wirtschaft, um bestehende Ressourcen besser zu nutzen.

Onlineshopping

	Ressourcenverbrauch	Energieverbrauch
Erwartete Veränderung durch die Digitalisierung in diesem Bereich verglichen mit dem Status Quo	Steigend	Reduzierung

Tabelle 14: Trend im Bereich Online Shopping

Der Trend zu mehr Onlineshopping ist seit vielen Jahren erkennbar und zieht sich durch alle Konsumentenbereiche. Nicht zuletzt in der Corona Pandemie hat diese Tendenz noch einmal stark an Popularität gewonnen. Im Vergleich zum Offlineshopping kann durch den Onlineeinkauf die Zahl von Kontaktpersonen reduziert werden, welches auch neue Produkte für Konsumierende in den Blick rückt. Über die Hälfte in der DACH-Region Befragten geben an, dass sie während der Corona Pandemie neuartige Produkte online bezogen haben, in diesem Fall hauptsächlich Lebensmittel (KPMG 2021).

Die größten Bausteine in der Nachhaltigkeit des Onlinehandels sind die Transportaufwendungen und die Verpackungen. Hinzu kommen Retouren, welche wiederholten Transport- und Verpackungsaufwand, bis hin zur Vernichtung der Ware mit sich bringen. Aufgrund von weniger logistischen Prozessen in der Warenbeschaffung im Onlinehandel, ist letztendlich der ökologische Fußabdruck geringer als im stationären bzw. im traditionellen Handel (siehe Tabelle 14). Dies führt zu einem geringeren Energieverbrauch. Aus Sicht der Ressourcennutzung ist jedoch der erhöhte Verpackungsaufwand eindeutig negativ einzustufen (Till Zimmermann, Robin Memelink, Lisa Rödiger, Alexander Reitz, Nane Pelke, Rene John, Ulrike Eberle 2020).

Sharing Economy/Circular Economy

	Ressourcenverbrauch	Energieverbrauch
Erwartete Veränderung durch die Digitalisierung in diesem Bereich verglichen mit dem Status Quo	Reduzierung	Reduzierung

Tabelle 15: Trend im Bereich Sharing/Circular Economy

Die Digitalisierung bringt die Möglichkeit mit sich, Kooperation und Koordination auf einem neuen Level zu betrachten. Digitale Marktplätze und Plattformen, welche Menschen zusammenbringen können die nachhaltige Nutzung von existierenden Ressourcen unterstützen. Unternehmen, die in der Sharing Economy angesiedelt sind, geben ihren Nutzenden die Möglichkeit Ressourcen zu teilen. Hierunter fallen sowohl kapitalintensivere Güter wie Häuser, Transportmittel oder Boote, als auch günstigere Güter wie Kleidung und Nahrungsmittel. Während viele Unternehmen in diesem Modell seither Schwierigkeiten haben, ist nicht abzustreiten, dass sich einige Marktteilnehmende fest etabliert haben (Chasin et al. 2018).

Circular Economy ist ein Begriff für ein wirtschaftliches System, welches weniger auf die Ausnutzung von natürlichen Ressourcen abstellt und, inspiriert von natürlichen, ökologischen Lebenszyklen, die zirkuläre Nutzung von Produkten vorsieht. Demnach wird Kleidung nicht wie im traditionellen Wirtschaftssystem aus natürlichen Ressourcen hergestellt, dann getragen und entsorgt, sondern erfährt nach dem Ende seines Lebens eine weitere Verwendung. Finite Ressourcen sollen somit besser genutzt werden und der ökologische Fußabdruck verringert werden (PWC 2019).

Im Sinne der Ressourcennutzung sind beide angeführte Trends positiv zu bewerten. Die Energienutzung, die durch den erhöhten Einsatz von IT im Bereich Sharing Economy zu tragen kommt, kann durch

eine effizientere Verwendung von Ressourcen, welche ihrerseits Energie verbrauchen, ausgeglichen werden (siehe Tabelle 15). Die Aufbereitung von Produkten am Ende ihrer Nutzungsdauer kann wiederum sehr energieintensiv sein, so wie beispielsweise im Bereich Plastik oder Kleidung. Selbst wenn energieintensive Anwendungen im Circular Economy Modell betrachtet werden, ist der Energieaufwand für die Herstellung neuer Materialien immer noch größer als bei der Wiederverwendung oder Aufbereitung bereits vorhandener Materialien. Der Anteil dieser energieintensiven Anwendungen im Circular Economy Modell ist im Vergleich dazu gering.

2.4.7 Wohnen

Die Bereiche Gebäude und Wohnen zählen zu einem Großteil der wirtschaftlichen Aktivität weltweit und in Deutschland. Zugleich sind die dafür verwendeten Materialien, die Gebäudekonstruktionen, die begleitenden Dienstleistungen und die Produkte (beispielsweise Heizung) für bis zu 40 % aller CO₂-Emissionen weltweit verantwortlich. In diesem Zuge wird die Digitalisierung nicht nur für die Erhöhung der Wohn- und Lebensqualität gehandelt, sondern sie verspricht auch den ökologischen Fußabdruck zu verbessern.

Gebäudeautomation

	Ressourcenverbrauch	Energieverbrauch
Erwartete Veränderung durch die Digitalisierung in diesem Bereich verglichen mit dem Status Quo	Steigend	Reduzierung

Tabelle 16: Trend im Bereich Gebäudeautomation

Unter Gebäudeautomation wird, ähnlich wie in der Industrie 4.0, die Vernetzung von Sensoren und cyber-physischen Geräten verstanden, die die Automatisierung zum Ziel hat. Das rangiert von gängigen Szenarien wie Bewegungsmeldern für Licht und Heizung, bis zu komplexeren Lösungen wie der automatischen Temperierung von Räumlichkeiten basierend auf den anwesenden Mitarbeitenden. In Kombination mit besseren Materialien zur Isolierung und zum Bau von umweltfreundlichen Alternativen für Heizung und Kühlung kann die Gebäudeautomatisierung einen signifikanten Beitrag zur Dekarbonisierung des Gebäudesektors beitragen (Deloitte 2021; Lucon O., D. Ürge-Vorsatz, A. Zain Ahmed, H. Akbari, P. Bertoldi, L.F. Cabeza, N. Eyre, A. Gadgil, L.D.D. Harvey, Y. Jiang, E. 2014).

In Anlehnung an Industrie 4.0 wird der Ressourcenverbrauch bei der Gebäudeautomation aufgrund des vermehrten Einsatzes von Sensoren steigen (siehe Tabelle 16). Die intelligente Steuerung von Heizungs- und Kühlungsapparaten sowie der Lichtverhältnisse sorgt jedoch für starke Einsparungen beim Energieverbrauch.

2.4.8 Bildung

Die Digitalisierung ist sowohl in der grundlegenden als auch in der weiterführenden Bildung angekommen. Von digitaler Technologie hervorgebrachte Plattformen wie YouTube, Coursera oder EdX gewähren interessiertem Publikum Zugang zu Bildungsformaten auf allen Leistungsstufen und Fachbereichen. Auch traditionell analoge Teilbereiche des Bildungssektors werden zunehmend digitalisiert.

Digitale Bibliothek

	Ressourcenverbrauch	Energieverbrauch
Erwartete Veränderung durch die Digitalisierung in diesem Bereich verglichen mit dem Status Quo	Reduzierung	Reduzierung

Tabelle 17: Trend im Bereich digitale Bibliothek

Deutsche Universitätsbibliotheken zeigen, dass sie viel mehr sind als nur ein Ort zum Ausleihen von Büchern. Heutzutage haben Studierende an den Arbeitsplätzen in der Bibliothek vermehrt Laptops als Bücher liegen. Die meisten relevanten Inhalte für etwaige wissenschaftliche Arbeiten finden sich im Onlinekatalog der Universitätsbibliotheken. Auch außerhalb des universitären Betriebs bieten Stadtbibliotheken einen Großteil ihrer Inhalte auch im digitalen Format zum Download an.

Diese Umstellung bedeutet zum einen, dass weniger Ressourcen zur Produktion von physischen Gütern genutzt werden müssen, und zum anderen, dass Energie in Form von Transportwegen wegfällt (siehe Tabelle 17). Die digitale Infrastruktur zum Abrufen und Speichern von digitalen Medien besteht in der breiten Bevölkerung bereits, sodass es hierbei zu keiner zusätzlichen Belastung von Ressourcen kommt. Das Plus an Energieverbrauch durch den Konsum von digitalen Formaten wird abermals mehr als ausgeglichen, durch weniger Energie im Transport.

Digitale Zeitung

	Ressourcenverbrauch	Energieverbrauch
Erwartete Veränderung durch die Digitalisierung in diesem Bereich verglichen mit dem Status Quo	Steigend	Reduzierung

Tabelle 18: Trend im Bereich digitale Zeitungen

Die meisten Zeitungen werden heutzutage in mehreren Formaten angeboten. Zusätzlich zu den traditionellen Printformaten, gibt es digitale Formate für den Browser, in der App oder für eReaders. Diese digitalen Angebote gewinnen konstant an Popularität und somit auch an Umsatz. Im Jahr 2021 wird der Umsatz dieser Medien auf mehr als 7 Mrd. US \$ geschätzt (Statista 2022).

Der CO₂-Fußabdruck von ePapern im Vergleich zu Printmedien hat eine Diskussion in der wissenschaftlichen Gemeinschaft hervorgerufen. Für beide Formate gilt, dass der Großteil der Ressourcen und des Energieverbrauchs bei der Herstellung anfällt (siehe Tabelle 18). Sowohl Papier als auch elektronische Geräte sind in dieser Hinsicht kostspielig. Bei Papier fällt der Energieverbrauch stärker ins Gewicht und bei elektronischen Geräten der Ressourcenverbrauch.

2.4.9 Kommunale Daseinsvorsorge

Die kommunale Daseinsvorsorge bezeichnet die sozialen, wirtschaftlichen und kulturellen Dienstleistungen, die für alle Bürger bereitgestellt werden. Dazu gehören die essenziellen Dienstleistungen in der Wasser- und Abfallwirtschaft.

Abfallentsorgung / Straßenreinigung

	Ressourcenverbrauch	Energieverbrauch
Erwartete Veränderung durch die Digitalisierung in diesem Bereich verglichen mit dem Status Quo	Reduzierung	Reduzierung

Tabelle 19: Trend im Bereich Abfallentsorgung/Straßenreinigung

Die Digitalisierung in der Abfallwirtschaft erstreckt sich von intelligenten Mülleimern in Innenstädten, über semi-autonome Transportmittel bis hin zu KI-gestützter Klassifizierung von Materialien für das Recycling. Bisher sind viele solcher Ansätze in Pilotprojekten sowie in der Wissenschaft bekannt, jedoch mitunter nicht in der Praxis. Es mangelt an vielen Stellen bei der Umsetzung. Besonders werden hier fehlende technische Standards und hohe Anfangsinvestments genannt. Zudem fehlt es an einer Kultur die digitale Tools umzusetzen (Borchard et al. 2021).

Die Vorteile einer vollständigen Nutzung von digitalen Technologien in der Abfallwirtschaft sind vielfältig. Auf unternehmerischer Seite werden durch erhöhtes Monitoring und mehr Transparenz Prozesse optimiert, supply chains verbessert und allgemein die Dienstleistungen auf ein neues Niveau gebracht. Das schlägt sich auch in einer verbesserten finanziellen Situation der Betriebsbetreiber nieder (Borchard et al. 2021). Für die Ressourcen- und Energienutzung wiederum, ergeben sich zusätzliche Vorteile. Durch transparente und optimierte Prozesse, wie beispielsweise in der Routenplanung, zeigen sich Energieeinsparungen. Zudem reduziert sich der Verschleiß von bestehenden Gütern, der besonders im Kontext des Recyclings die Wiederverwendung von Ressourcen unterstützt wird (siehe Tabelle 19).

Wasserversorgung

	Ressourcenverbrauch	Energieverbrauch
Erwartete Veränderung durch die Digitalisierung in diesem Bereich verglichen mit dem Status Quo	Reduzierung	Reduzierung

Tabelle 20: Trend im Bereich Wasserversorgung

In der Wasserversorgung, ähnlich wie in der Industrie und Abfallwirtschaft, bietet die Digitalisierung große Chancen. Von der Integration von Sensoren für die Überwachung von Wasseranlagen, bewegt sich der Trend hin zu Anwendungen in der Simulation von Prozessen und Anlagen, zu Echtzeit-Überwachung und Vorhersagen, zur optimierten und vernetzten Abgabe an die Endnutzenden. Die Technologien, die hierbei zum Einsatz kommen stammen sowohl aus dem Bereich der Sensorik als auch der KI, insbesondere wenn es um die Vorhersage von Nutzungsverhalten und Großaufkommen geht.

Die Vorteile der Digitalisierung in diesem Bereich decken sich mit dem in der Abfallwirtschaft und anderen Großindustrien. Durch mehr Vernetzung, Sensorik und Monitoring werden Qualitätsfortschritte, bessere Dienstleistungen und eine bessere Nutzung von Ressourcen projiziert. In diesem Zuge wird auch eine effizientere Nutzung von Energie im Allgemeinen angesetzt (siehe Tabelle 20). Ähnlich wie in der Abfallwirtschaft, mangelt es an Standardisierung für die Implementierung sowie dem Wissen über digitale Technologien und Anwendungsfälle (German Water Partnership 2019).

2.4.10 Landwirtschaft

Die Digitalisierung in der Landwirtschaft verspricht mehr Kooperation in der gesamten Wertschöpfungskette, mehr Unterstützung für Bauern und die Möglichkeit für mehr Innovation im Sektor.

Automation Landwirtschaft

	Ressourcenverbrauch	Energieverbrauch
Erwartete Veränderung durch die Digitalisierung in diesem Bereich verglichen mit dem Status Quo	Reduzierung	Reduzierung

Tabelle 21: Trend im Bereich Automation der Landwirtschaft

Automation spielt in der Intersektion Landwirtschaft und Digitalisierung eine große Rolle, besonders vor dem Hintergrund einer effizienten Nutzung von finiten Ressourcen. Hierbei werden Probleme behandelt, wie zum Beispiel die punktuelle und bedarfsgerechte Wässerung von Agrarfläche sowie deren Spritzung und Düngung. Ähnlich wie in anderen Sektoren der Wirtschaft, spielen auch hier Monitoring und damit verbunden die Transparenz eine große Rolle. Der wohl wichtigste Teilaspekt der Digitalisierung für die Automation in der Landwirtschaft ist das Internet der Dinge, also die Vernetzung und Steuerung von Sensoren und darauf aufbauenden Geräten.

Im Vergleich mit dem hohen Bedarf an Equipment und sonstigen Ressourcen in der Landwirtschaft, bilden die einzusetzenden Sensoren und die digitale Umrüstung der Geräte einen kleinen Anteil. Zudem werden durch die Optimierung von Prozessen und den akkuraten Einsatz von etwa Wasser, Saat und Pestiziden erheblich Ressourcen gespart (siehe Tabelle 21). Der Energieverbrauch, welcher durch die zusätzlichen Sensoren entsteht verblasst abermals im Vergleich zu den Einsparungen durch einen geringen Einsatz von Equipment (Ingram und Maye 2020; European Commission 2022b).

2.4.11 Finanzwesen

Im Finanzsektor spielt die Digitalisierung bereits seit einigen Jahren eine besonders wichtige Rolle. Der Handel von Finanzprodukten fällt heutzutage länderübergreifend digital aus, ebenso wie der Zugang von Unternehmens- und Privatkunden zu ihren Konten.

Börsenhandel

	Ressourcenverbrauch	Energieverbrauch
Erwartete Veränderung durch die Digitalisierung in diesem Bereich verglichen mit dem Status Quo	Steigend	Steigend

Tabelle 22: Trend im Bereich Börsenhandel

Insbesondere im Börsenhandel schlägt sich der Trend der Digitalisierung stark nieder. Sowohl die Verbindung von teilnehmenden Finanzinstituten untereinander und zu zentralen Marktplätzen, als auch die Verbindung von Endkunden mit dem Börsenhandel verläuft zunehmend digital. Erste wissenschaftliche Arbeiten in diesem Bereich finden sich bereits Anfang der 2000er Jahre.

Heutzutage wird die Digitalisierung der Kapitalmärkte insbesondere durch junge Start-Ups, so genannte FinTechs, vorangetrieben. Hierbei wird insbesondere im Konsumentenbereich der Zugang zum Finanzmarkt vereinfacht und damit für ein neues Publikum eröffnet. Diese Marktteilnehmenden sind

zumeist jünger oder hatten zuvor weniger Chancen an den Finanzmärkten zu partizipieren. Der Zugang wird oftmals über einfach zu benutzende Apps geboten, welche zugleich auch den Mindestbetrag zur Teilhabe senken. So können bei modernen Anbietern beispielsweise Sparpläne bereits mit Beträgen ab 25 € angelegt werden. Diese Demokratisierung in Richtung der Konsumierenden ist nicht zuletzt auch der verbesserten Effizienz in der Datenübertragung und Abwicklung von Transaktionen geschuldet, welche ihrerseits durch die Digitalisierung gefördert werden (Brandl und Hornuf 2020).

Die Ressourcen, die für diese digitale Umstellung genutzt werden, sind größtenteils bereits vorhanden, etwa in Form von Smartphones oder bestehenden Computern. Ein weiterer Ausbau an Infrastruktur, beispielsweise im Bereich der Rechenzentren und der Internetleitungen, etwa für Hochgeschwindigkeitshandel, ist allerdings zu erwarten. Durch die gesenkten Eintrittsbarrieren und die Demokratisierung des Handels an Börsen ist zudem mit einer Zunahme an Energieverbrauch durch vermehrten Handel zu rechnen (siehe Tabelle 22).

Kryptowährung

	Ressourcenverbrauch	Energieverbrauch
Erwartete Veränderung durch die Digitalisierung in diesem Bereich verglichen mit dem Status Quo	Steigerung	Steigerung

Tabelle 23: Trend im Bereich Kryptowährung

Kryptowährungen, angeführt von Bitcoin, haben sich in den letzten Jahren vervielfacht. Während erst im Jahr 2009 das Positionspapier zu Bitcoin und auch die Implementierung von Satoshi Nakamoto veröffentlicht wurden, zählen Kryptomärkte heutzutage über 17.000 unterschiedlichen Währungen mit einem Gesamtvolumen von über 1.5 Billionen \$ US (CoinMarketCap 2022). Auch etablierte Finanzinstitutionen und Dienstleister öffnen sich zunehmend dem Trend. So hat alleine der Zahlungsdienstleister Visa Partnerschaften mit den meisten Kryptobörsen weltweit geschlossen und plant die Einführung von Kryptowährungen über ihre Kreditkarten und Zahlungssysteme zu ermöglichen (Visa 2022).

Das Konzept, welches den meisten Kryptowährungen als Basis dient, ist die Dezentralisierung. Anstatt, dass Banken ein zentrales Register über alle Finanzströme und die assoziierten Transaktionen führen, wird dieses Register über die Teilnehmenden der Blockchain verteilt und verwaltet. Im Falle von Bitcoin ist diese Verwaltung in Form eines Proof-of-Work Mechanismus eingebaut, welcher die Verifizierung von Zahlungen in der Blockchain orchestriert. Die Teilnehmenden an diesem Protokoll stellen für die Verifizierung ihre Rechenleistung bereit und werden im Umkehrschluss mit Kryptowährungen belohnt.

In Punkto Ressourcen- und Energieverbrauch haben Kryptowährungen und insbesondere Bitcoin viel Kritik einstecken müssen. Der Energieverbrauch der Rechenleistungen, welche hinter der Validierung und dem Erschaffen von Bitcoin liegen, werden auf über 4 GW geschätzt (Gallersdörfer et al. 2020). Während es andere Kryptowährungen sind, die weniger energieintensiv betrieben werden, ist das Wachstum in dem Sektor ein Treiber für mehr Energieverbrauch (siehe Tabelle 23). Für die Rechenkapazität, die zur Validierung von Transaktionen benötigt wird, werden zusätzliche, teils speziell auf die Kryptowährung zugeschnittene, Computer angeschafft. Diese steigern wiederum den Ressourcenverbrauch.

2.5 Quantifizierung

Im Zuge des Arbeitspakets 1 sollen drei Trendbereiche exemplarisch in Hinsicht auf ihre Nachhaltigkeit näher untersucht werden, insbesondere bezüglich auf die anfallenden CO₂-Emissionen. Basierend auf der Entscheidung/Empfehlung des Auftraggebers werden die Bereiche Homeoffice, Elektronische Patientenakte und Streaming einer genaueren Quantifizierung unterzogen.

2.5.1 Quantifizierung im Bereich Homeoffice

Die Digitalisierung hat die Art und Weise wie die Gesellschaft arbeitet stark verändert. Nicht zuletzt durch die Pandemie beschleunigt, geht der Trend in Richtung Hybrid (Office und Homeoffice) und komplettem Homeoffice. Immer mehr Unternehmen versprechen ihren Mitarbeitenden nun eine remote-first Kultur, in der ein Aufenthalt im Büro des Unternehmens allenfalls eine Ausnahme darstellt.

Zusammenfassend lässt sich attestieren, dass die CO₂-Einsparungen durch Homeoffice von unterschiedlichen Rahmenbedingungen und Umsetzungskonzepten abhängen. Generell kann, am Beispiel Baden-Württemberg ersichtlich, besonders im Verkehr CO₂ eingespart werden, welches jedoch durch Rebound-Effekte wiederum aufgeweicht werden kann. Diese Rebound-Effekte sind besonders präsent, da die Umstellung auf das Homeoffice viele Arbeitgebende unvorbereitet erwischt hat. Das wiederum führt dazu, dass Übergangsmaßnahmen getroffen wurden und das optimale Einsparpotential nicht erreicht wird, beispielsweise durch die intelligente Steuerung von Heizbedarfen.

Variablen & Annahmen

Die ausschlaggebenden Variablen für die Berechnung der Emissionen im Falle Homeoffice, setzen sich aus den folgenden zusammen:

- Arbeitsweg
 - Distanz und Art des Arbeitswegs
 - Allokation von Emissionen in öffentlichen Verkehrsmitteln
 - Rebound-Effekte
- Büro
 - Allokation Wärme/Kälte
 - Allokation Stromverbrauch
- Homeoffice
 - Allokation Wärme/Kälte
 - Allokation Stromverbrauch
 - Rebound-Effekte

Für die Berechnung der Emissionen werden zudem Annahmen bezüglich Strommix, Brennstoffen sowie Wohnung und Distanzen im Sinne von Durchschnittswerten getroffen. Es wird der deutsche Strommix und Durchschnittsbrennstoff für Büro und Homeoffice sowie durchschnittliche Distanzen zum Arbeitsplatz (34 km) und Größen im Homeoffice (12 qm) herangezogen. Zudem wird angenommen, dass keine redundante Hardware angeschafft werden muss und dass 100 % des Stroms und Heizung/Kühlung eingespart wird, wenn die Arbeitnehmenden nicht im Büro und Homeoffice sind.

Szenarien und Potentiale

Im Folgenden werden unterschiedliche Szenarien und die dazugehörigen Ergebnisse aufgezeigt und erläutert.

Sommer & Auto

Im Falle einer 100 % Nutzung des Autos in Kombination mit wenig Heizungsaufwand durch die Arbeit im Sommer, können bis zu 8 kg CO₂e pro Tag und Person eingespart werden. Die Emissionen, die durch das Arbeiten im Haushalt anfallen, sind minimal. Während Einsparungen im Bereich Verkehr und Büro für ein starkes Einsparungspotential führen (siehe Abb. 1).

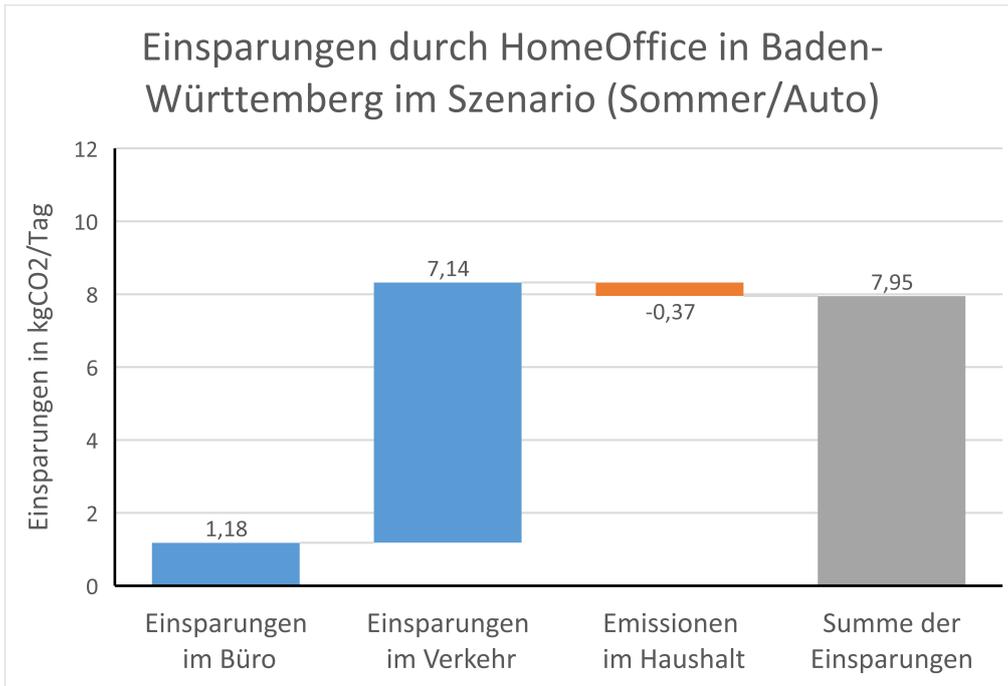


Abbildung 1: Szenario Sommer & Auto

Sommer & S-Bahn

Durch die Nutzung von öffentlichen Verkehrsmitteln, werden die Emissionseinsparungen im Verkehr im Vergleich zur Nutzung des regulären Büros stark reduziert. Als Ergebnis werden jedoch trotzdem Einsparungen um 2 kg CO₂e pro Person und Tag erhalten (siehe Abb. 2).

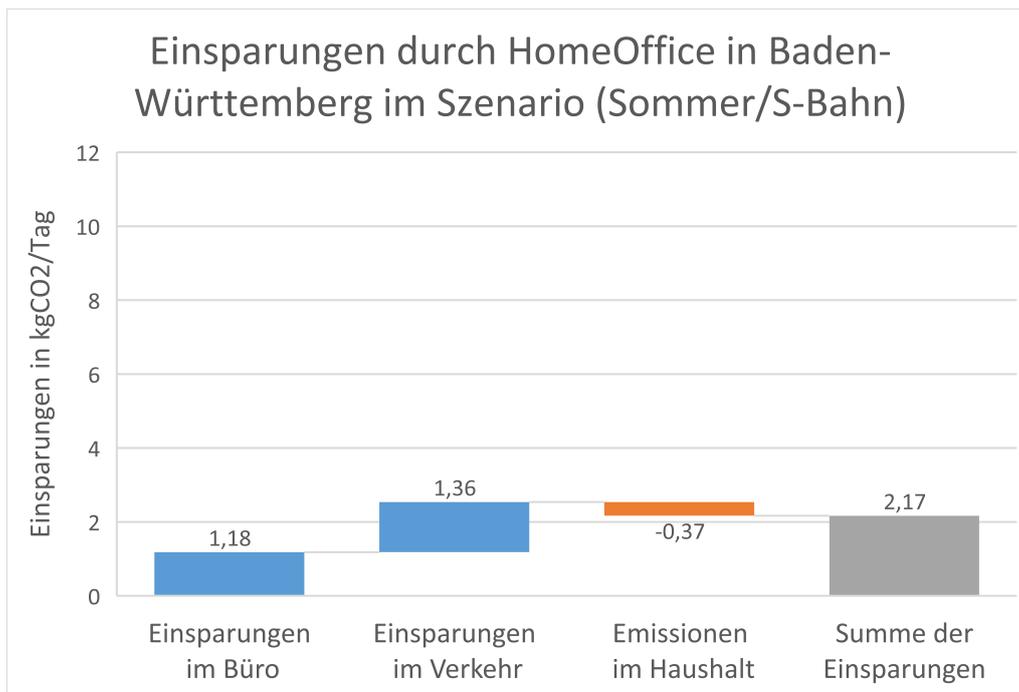


Abbildung 2: Szenario Sommer & S-Bahn

Winter & S-Bahn

Im Winter belaufen sich die Emissionseinsparungen auf den Wegfall der Mobilität. Die Einsparungen im Büro setzen sich aus Heizungs- und Stromemissionen zusammen (siehe Abb. 3).

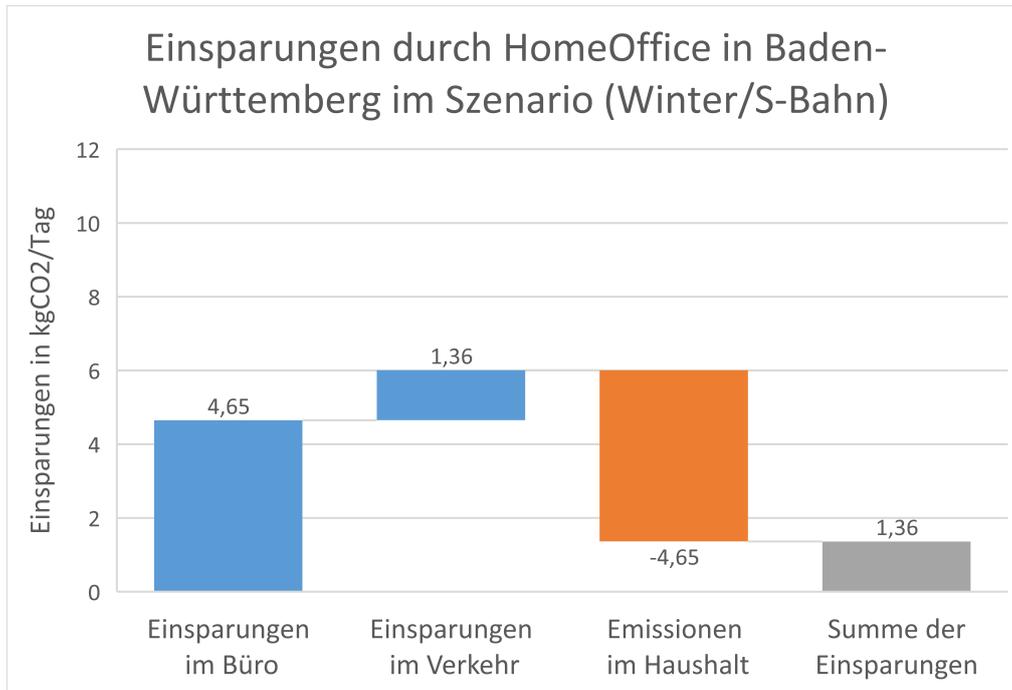


Abbildung 3: Szenario Winter & S-Bahn

Winter & S-Bahn (Strom)

Wenn jedoch angenommen wird, dass keine intelligente Steuerung von Heizenergie im Büro vorgenommen wird, reduzieren sich die Einsparungen im Büro stark. Das wiederum sorgt dafür, dass durch die Doppelheizung von Büro und Homeoffice mehr Emissionen freigesetzt werden (siehe Abb. 4).

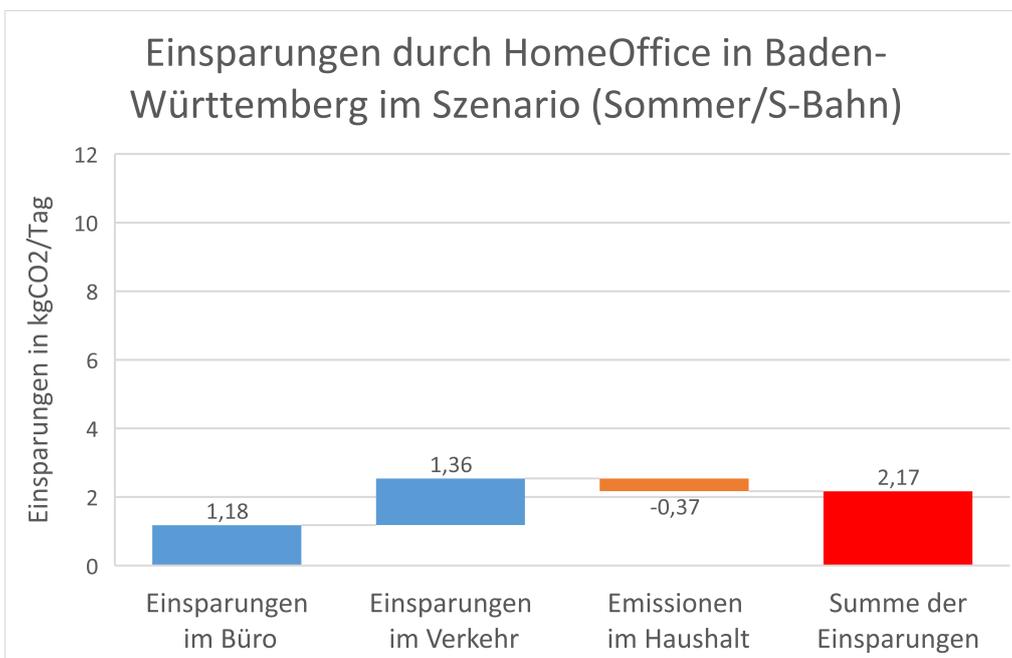


Abbildung 4: Szenario Winter & S-Bahn (Strom)

Ergebnis

Im Durchschnitt lässt sich sagen, dass enormes Einsparpotential vorhanden ist. Wie vorher dargestellt, hängt das Einsparpotential stark von den genauen Umständen und Maßnahmen ab, welche seitens der Unternehmen und der Arbeitnehmenden getroffen werden. In einer Jahresbetrachtung und unter Einbezug kompletter Einsparungen von Heiz- und Stromemissionen im Büro, lassen sich bis zu 5,79 kg CO₂e pro Person und Tag einsparen (siehe Abb. 5).

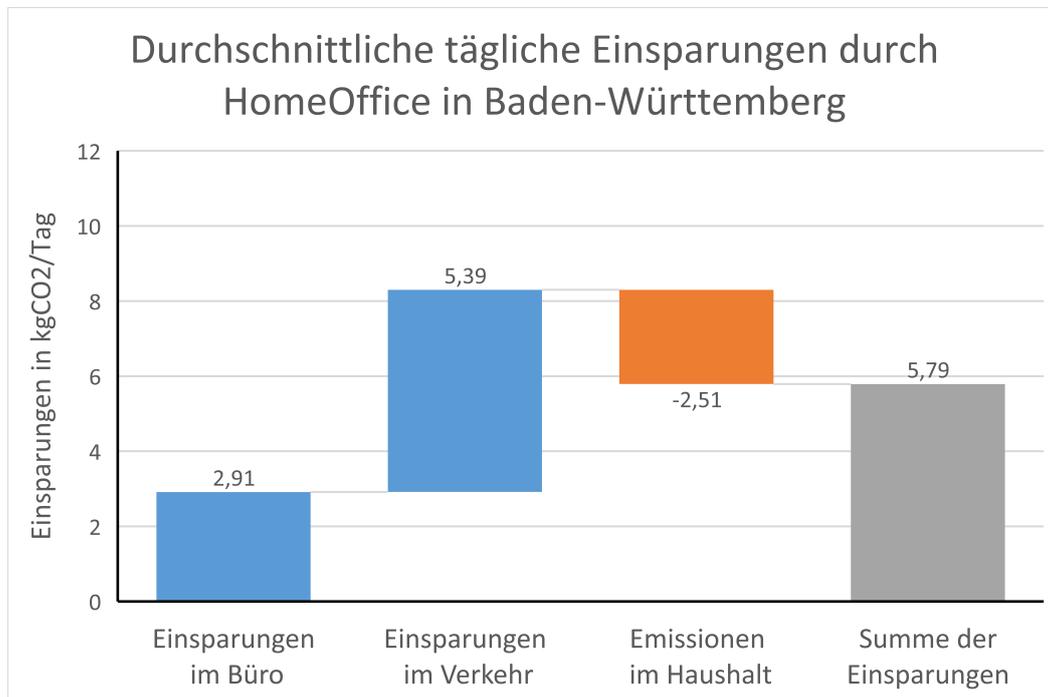


Abbildung 5: Ergebnis Durchschnitt

Wenn das Potential für das Land Baden-Württemberg hochgerechnet wird, ergibt sich ein Einsparungspotential von bis zu 2.622.623t CO₂/a, unter idealen Bedingungen.

2.5.2 Quantifizierung im Bereich Streaming

Das Streamen von Medien hat im Zuge der Digitalisierung stark zugenommen. Durch den Ausbau von digitaler Infrastruktur in Verbindung mit Fortschritten in der dazugehörigen Technologie, ist es für Konsumenten heute möglich Millionen von Musiktiteln sowie Serien und Filme auf ihren Endgeräten zu streamen. Streamen bedeutet in diesem Sinne, dass die Medien sich nicht auf dem Endgerät befinden, sondern dort lediglich ein Bitstrom von einem Datenzentrum übertragen wird, welcher auf dem Endgerät dargestellt wird (siehe Abb. 6).

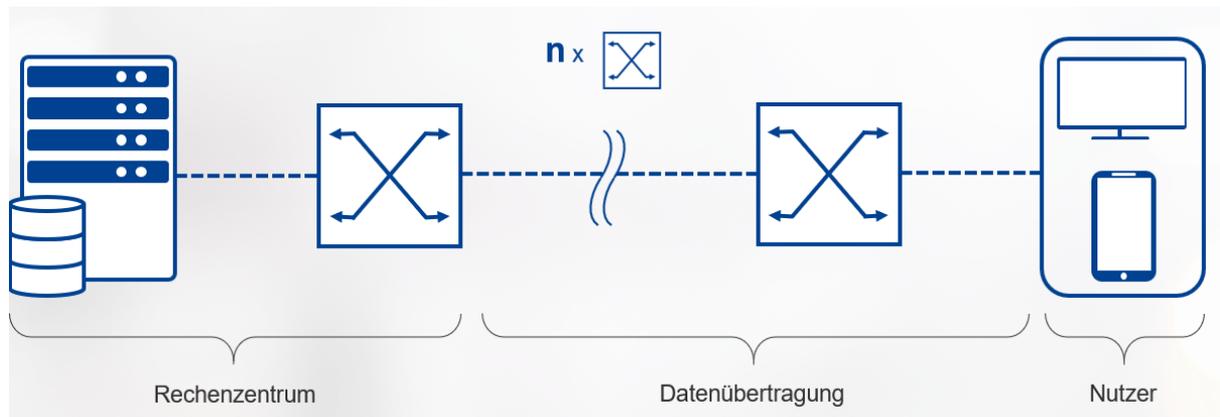


Abbildung 6: Streaming Konzept

Diese Rechenzentren lassen sich wiederum aufteilen in traditionelle Rechenzentren, welche zentral an einem einzigen Ort stehen, und sogenannten Edge Rechenzentren. Letzteren werden geografisch näher am Endnutzer genutzt und stellen somit eine schnellere Verbindung für den Endkunden her. Hierbei werden jedoch nicht alle Daten aus dem unterliegenden Datenzentrum repliziert, sondern lediglich solche, die in der geografischen Nähe abgerufen werden.

Variablen & Annahmen

Der Energieverbrauch im Streaming hängt von unterschiedlichen Variablen ab. Zunächst kommt es auf die Rechenzentren an, welche die digitalen Medien bereitstellen. Hierbei spielt die spezifische Performance von den individuellen Rechenzentren eine Rolle. Diese zeigt sich etwa in der Auslastung der Hardware, dem Zusatz an Energie, welcher für den kontinuierlichen Betrieb der Hardware genutzt wird, und den Nutzenden pro Rechenzentrum. Die Datenübertragung ist ein weiterer wichtiger Faktor für den Energieverbrauch im Streaming. Dieser wird durch die Übertragungstechnik, durch die zu überbrückende Distanz und die gewählte Komprimierung bestimmt. Zuletzt spielen die Endgeräte der Konsumierenden eine übergeordnete Rolle. Die Größe und Technik der Bildschirme ist ebenso ausschlaggebend wie die Auswahl der Abspielqualität.

In Abbildung 7 wurden folgende Annahmen für die Berechnung getroffen:

Alle Nutzer zwischen 14-64 Jahren in BW
2,09 Personen pro Haushalt
Gemeinsamer Konsum bei Pay-VoD (SVoD, TVoD)
Einzelner Konsum bei kostenl. VoD (AVoD)
Durchschnittlicher Router (10W)
Durchschnittlicher TV Größe für Pay-VoD (105W)
Ø-Bitrate Pay-VoD (1,53 GB/h)
Ø-Bitrate kostenl. VoD (0,93 GB/h)
Ø-Endgerätewahl kostenl. VoD (Mobil 59%; TV 27%; PC 14%)
Ø-Endgerätewahl Pay-VoD (Smartphone 10%; Tablet 8%; PC 19%; TV 63%)
Nutzungsdauer (Pay-VoD Ø22 min/Tag; kostenl. VoD Ø26 min/Tag) in 2020
Nutzungsdauer (Lineares TV Ø212 min/Tag) in 2020

Abbildung 7: Annahmen Streaming

Entwicklung

Der Energieverbrauch, der mit dem Streamen von Videos zusammenhängt, wächst in den letzten Jahren rasant und ist auf knapp 220 GWh im Jahr 2020 gestiegen. Der Energieverbrauch lässt sich auf die unterschiedlichen Bestandteile des Prozesses verteilen. Rechenzentren nehmen den kleinsten und am wenigsten stark ansteigenden Teil dieses Wachstum ein. Besonders stark gestiegen ist der Energieverbrauch in Verbindung mit der Datenübertragung und den verbundenen Endgeräten (siehe Abb. 8). Durch eine verbesserte Infrastruktur und neue Technologien steigt die Qualität der gestreamten Medien und der Konsum in höherer Auflösung wird möglich. Zudem wird die Gruppe der Menschen größer, die eine digitale Affinität aufweisen und somit zur Zielgruppe der Streaminganbieter gehören.

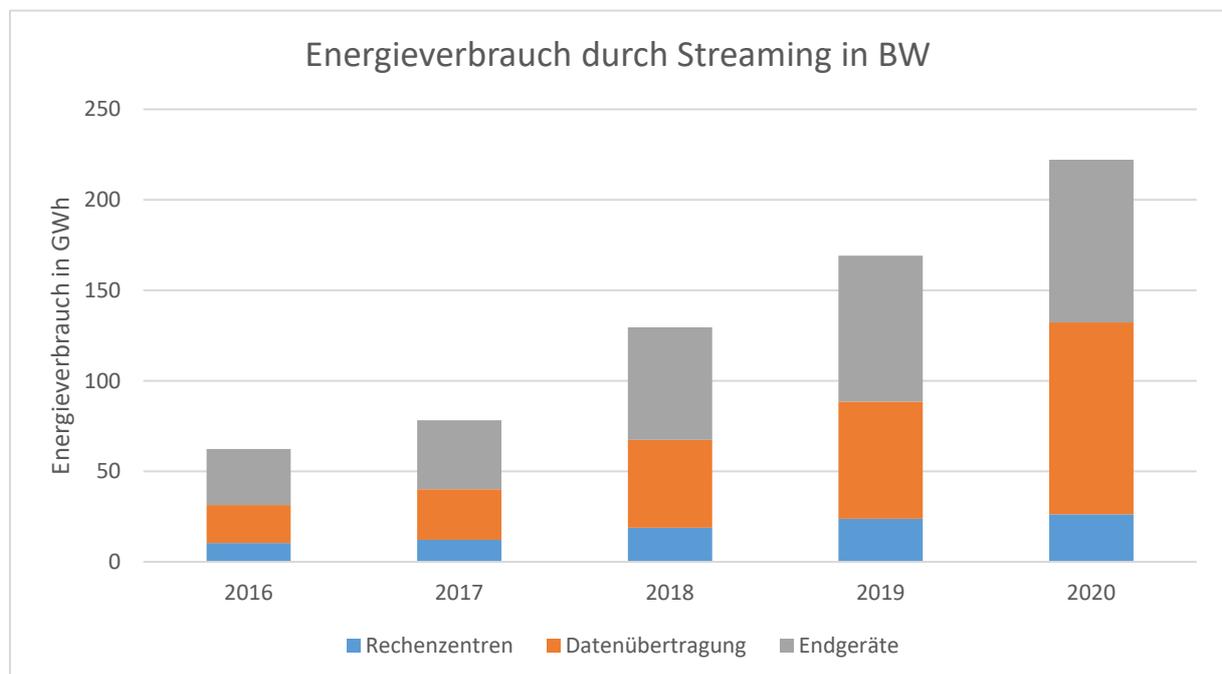


Abbildung 8: Energieverbrauch Streaming BW

Eine Entwicklung, die diesem Plus an Energieverbrauch entgegenwirkt, ist die Verbesserung der Komprimierungsverfahren. Diese führen dazu, dass das Datenvolumen, welche von Rechenzentren zu den Nutzenden fließen, geringer wird, während die Qualität der Medien mindestens gleichbleibt. Es gibt heutzutage unterschiedlichste Komprimierungsverfahren, welche ständig weiterentwickelt werden. Der aktuelle Trend besagt eine Halbierung der Bitrate, also des Volumens in der Datenübertragung, alle neun Jahre. Dies ist dementsprechend eine wichtige Entwicklung, um dem steigenden Energieverbrauch des Sektors entgegenzuwirken.

Ergebnis

Aktuell ist lineares Fernsehen noch der dominierende Modus der Bürgerschaft in Baden-Württemberg. Der durchschnittliche Konsum fällt jedoch und wird zusehends von Streaming abgelöst. Im Vergleich zum Jahr 2016 hat die durchschnittliche Nutzungsdauer im linearen TV um 16 Minuten pro Tag auf 212 Minuten abgenommen, während im Streaming die Nutzung von 16 Minuten auf 48 Minuten gestiegen ist (siehe Abb. 9).

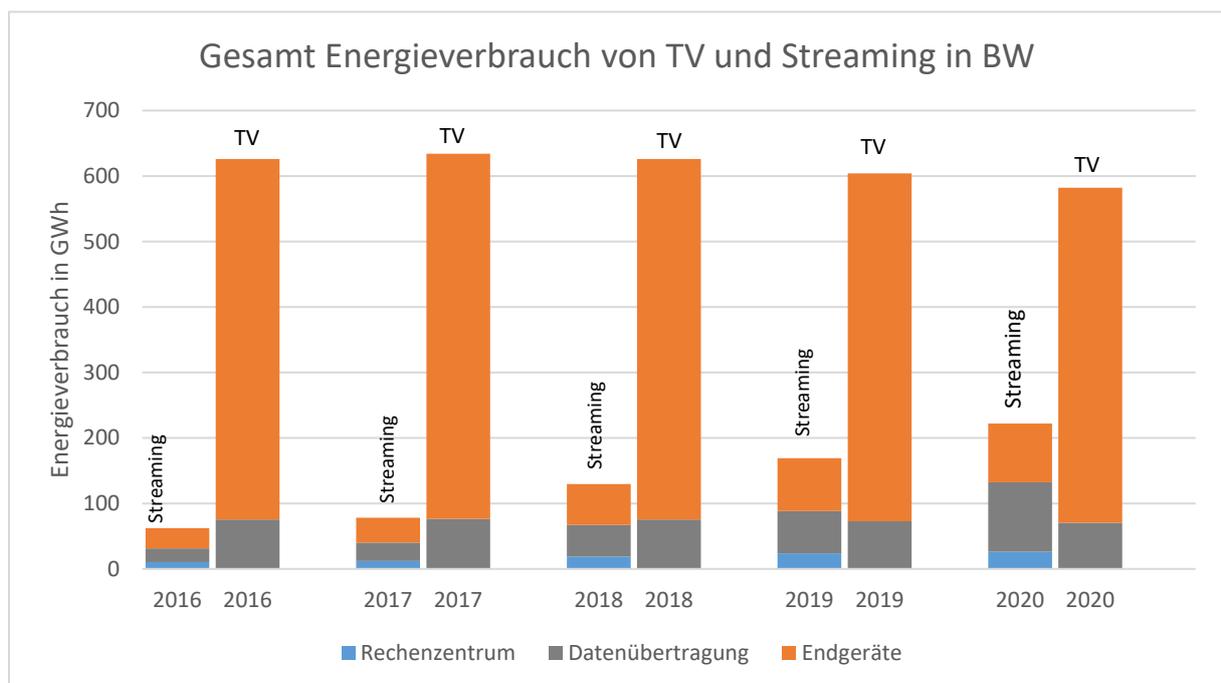


Abbildung 9: Entwicklung Streaming/TV

Aus energetischer Sicht ist das durchaus keine negative Entwicklung. Frei verfügbare Streamingdienste, wie beispielsweise YouTube, verbrauchen durch ihre im Durchschnitt schlechtere Qualität auch weniger Energie pro Stunde. Die teureren Dienste, die auch HD-Qualität im Stream anbieten, haben hingegen eine schlechtere Energiebilanz als traditionelles TV (siehe Abb. 10).

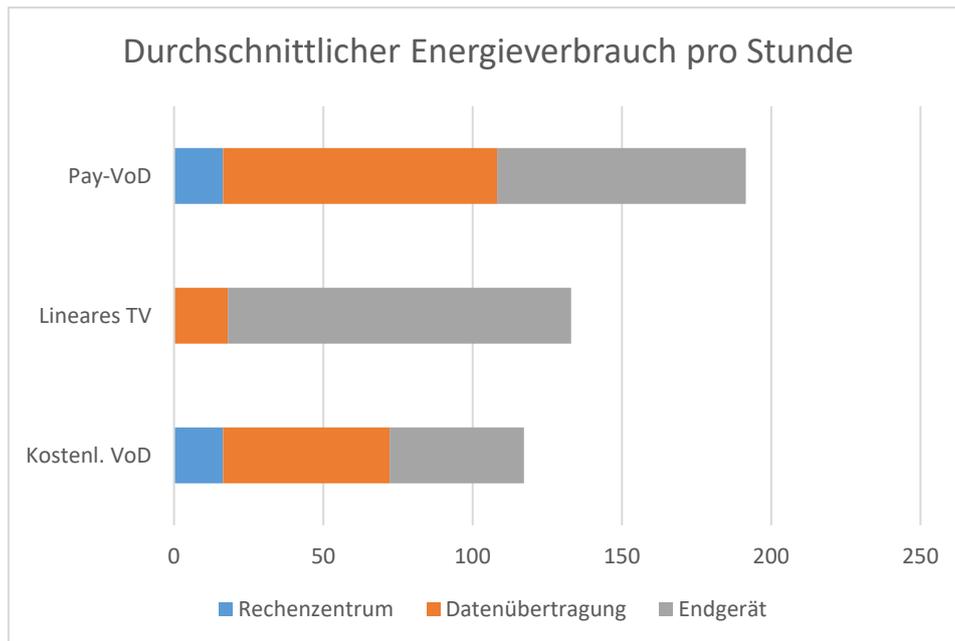


Abbildung 10: Energieverbrauch Vergleich

Es sollte festgehalten werden, dass die vorstehenden Ergebnisse auf Hochrechnungen beruhen und mit Durchschnittswerten berechnet wurden. So ist der Energieverbrauch eines durchschnittlichen Endgeräts verwendet worden. Zukünftige Entwicklungen, nicht nur in den Komprimierungsprozessen, sondern beispielsweise in der Displaytechnologie, halten die Schlüssel zu mehr Energieeinsparungen. Außerdem wird auch auf der Seite der Rechenzentren daran gearbeitet, diese effizienter zu machen. Durch eine bessere Ausnutzung von existierender Hardware können Effizienzgewinne geschaffen werden. Zudem spielt das Design von Streamingdiensten eine große Rolle in deren Konsum und somit auch in Bezug auf den Energieverbrauch. Funktionen, wie die automatische Anpassung von Videoqualitäten oder das automatische Abspielen sowie das Bewerben von weiteren Videos, fördern den Konsum dieser Medien.

Es ist unwahrscheinlich, dass der Konsum von Streamingangeboten in der Zukunft abnehmen wird. Genauso unwahrscheinlich ist es, dass Unternehmen aus monetärer Sicht sinnvolle Funktionen wie Videoempfehlungen oder die automatische Auswahl der bestmöglichen Auflösung unterlassen. Bestehende Entwicklungen im Bereich der Energieeffizienz von Rechenzentren sowie der Technologie in Endgeräten und Datenübertragung werden in der Zukunft eine wichtige Rolle in der Begrenzung des Energiehungers der Streamingbranche spielen.

2.5.3 Quantifizierung im Bereich elektronische Patientenakten

Medikation, Anamnese, Laborwerte und vergangene Erkrankungen. Viele dieser Informationen liegen patientenbezogen zwar vor, sind jedoch von Ärzt*innen und Patient*innen beidseitig nur schwer einzusehen. Oftmals sind Akten dezentral in den Händen unterschiedlichster Praxen und Organisationen. Der Austausch zwischen diesen Parteien ist zudem nicht immer erfolgreich, sodass Untersuchungen redundant gemacht werden oder nicht vollständig sind. Die elektronische Patientenakte (EPA), die seit Beginn des Jahres 2021 bei allen gesetzlichen Krankenkassen zum Repertoire gehört, soll einige dieser Probleme lösen. Alle Versicherten können zentral ihre medizinischen Befunde und andere Daten organisationsübergreifend beziehen.

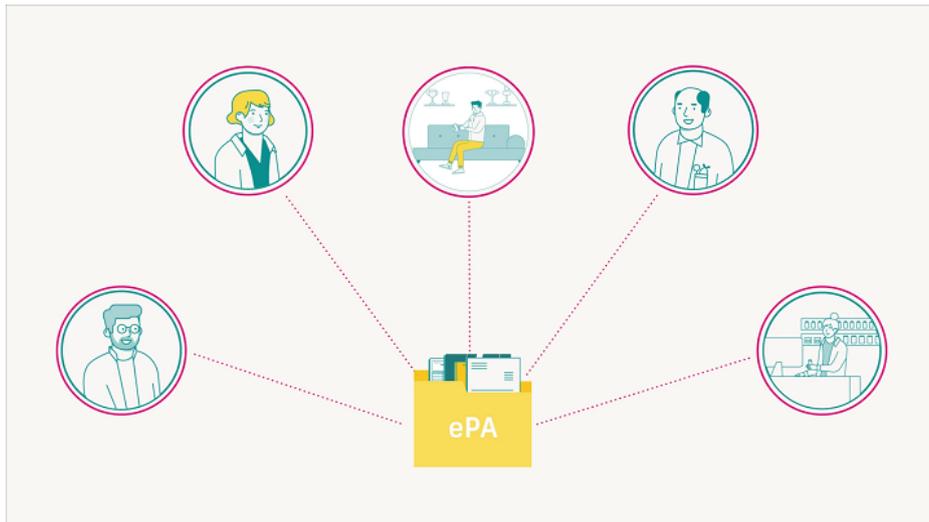


Abbildung 11: Konzept EPA (KBV)

Laut dem Konzept können die Patient*innen selbst bei der EPA Freigaben für unterschiedliche Organisationen erteilen (siehe Abb. 11). Das soll den Informationsfluss zwischen den Organen des Gesundheitssystems vereinfachen und somit Prozesse verschlanken und letztendlich Geld und Zeit sparen.

Im internationalen Vergleich ist Deutschland mit der elektronischen Patientenakte keinesfalls allein (Vetters und Akbik 2020). Viele der Initiativen in anderen Ländern sind bereits erprobt und etabliert. Der Funktionsumfang bestehender Lösungen ist breit gefächert und erstreckt sich von der Bereitstellung von Daten über das Datenmanagement bis hin zu integrierten Dienstleistungen. Patient*innen können somit ihre gesamten Tätigkeiten in Verbindung mit dem Gesundheitssystem mit den Applikanten verwalten.

Das Gesundheitssystem weltweit ist, je nach Berechnung, für gut 5 % aller CO₂-Emissionen verantwortlich (Lenzen et al. 2020). Diese Emissionen sind, wie bei vielen Industriezweigen mit komplexen Supply Chains, schwer punktgenau zu quantifizieren. So werden viele Produkte in unterschiedlichen Verarbeitungsstadien durch die ganze Welt verschifft, um später an einem zentralen Ort in einem Land verwendet zu werden. Auf diese Lieferketten entfällt somit auch der Großteil der Emissionen der Branche, wie in Abbildung 122 am Beispiel der USA illustriert ist (Eckelman et al. 2020).

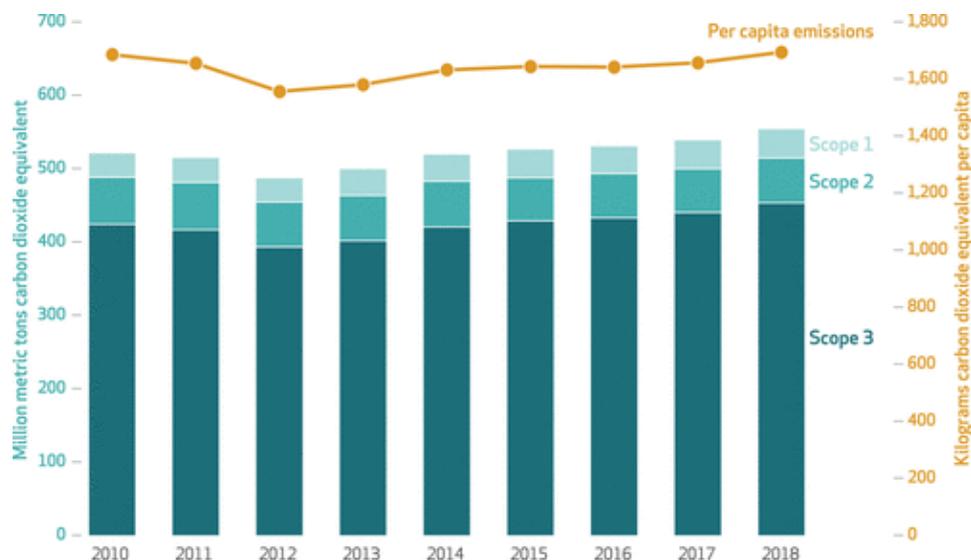


Abbildung 12: USA Gesundheitssystem Emissionen

Während das Problem der Lieferketten von der EPA weitestgehend unberührt bleibt, verspricht sie jedoch, neben Zeit und Kosten, durch die inhärente Digitalisierung auch CO₂-Emissionen des Sektors zu vermindern. Hierbei spielen sowohl direkte als auch indirekte Faktoren eine Rolle. Die EPA reduziert sowohl den Verbrauch an Papier und Druckertinte, als auch die Notwendigkeit der analogen Übertragung von Informationen. Zudem können durch den vereinfachten Fluss von Informationen redundante Untersuchungen reduziert werden, was auch einen Einfluss auf die assoziierten Energie- und Ressourcenverbräuche hat. Auf der anderen Seite stehen jedoch die IT-Hardware sowie die Energie, die für deren Herstellung und für die Datenübertragung gebraucht wird.

Variablen & Annahmen

Die Berechnung der Emissionen besteht sowohl bei der analogen als auch bei der digitalen Patientenakte aus Hochrechnungen, welche auf Schätzungen basieren. Insbesondere bei der EPA, sind die Emissionen in Bezug auf Datenspeicherung- und Übertragung stark variabel. Hierbei fällt besonders stark ins Gewicht, dass die Technologie sich schnell entwickelt und, ähnlich wie bei den Kompressionstechniken im Streaming in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**, stetig voranschreitet. Es lassen sich keine pauschalen Aussagen hinsichtlich der ökologischen Kosten zur Herstellung von 1 GB Speicherplatz treffen. Materialien, die vor 10 Jahren noch für 100 MB verwendet wurden, reichen jetzt für erheblich mehr Speicherplatz. Somit basieren wir unsere Hochrechnungen auf bestehenden Lifecycle Assessments, wohlwissend, dass der Vergleich nicht zu 100 Prozent valide ist. Zudem sind die Synergieeffekte, welche durch die EPA wie oben erwähnt stattfinden, schwer quantifizierbar. Die Funktion als Kommunikationsmedium für unterschiedlichste Aspekte im Bereich eHealth (z.B. Telemedizin) wird daher im Folgenden außer Acht gelassen. Zuletzt werden die Energie und die Ressourcen, die für die Darstellung der digitalen Inhalte der EPA auf Endgeräten gebraucht werden, nicht in den Vergleich mit eingerechnet.

Die Annahmen für die Berechnung sind wie folgt:

Alle Nutzende zwischen 14-64 Jahren in Baden-Württemberg
9,8 Arztbesuche im Jahr
3 unterschiedliche Ärzt*innen im Jahr
Datenaufkommen von 2 Blättern pro Arztbesuch
3,0 g CO ₂ -Emissionen pro Blatt
In 15 % aller Arztbesuche müssen im Nachhinein Daten analog an den Hausarzt versendet werden
10,00 g CO ₂ pro versendeten Brief
Datenabruf der Patientenakte 16 (Patient*in), 4 (Ärzt*in)
0,05 kWh/GB Datenübertragung
50 kWh/TB/Jahr Datenspeicherung
Emissionen des Energiemixes in BW 230 g/kWh
Speicheraufkommen pro Dokument in der Patientenakte (1x Besuch) 0,001 GB (1MB)
44,75 g/GB Speicherplatz für die Herstellung neuer Datenmedien

Tabelle 24: Annahmen EPA

Entwicklung

Nach dem offiziellen Start der EPA Anfang 2021, wurde zunächst eine initiale Auswahl an Funktionalitäten für die EPA entwickelt. Hierzu gehört das Teilen von Informationen zu Befunden, Diagnosen, Sitzungen und ähnlichen, medizinischen Informationen. Ab Januar 2022 soll das Angebot erweitert werden. Hierzu gehört insbesondere der Übertrag von bis dato bei den Krankenkassen gespeicherte Daten über bisherige Leistungen. Ab 2023 sollen dann weitere digitale Gesundheitsanwendungen für die Versicherten angebunden werden, wie beispielsweise Daten der pflegerischen Versorgung und Verordnung von Arzneimitteln.

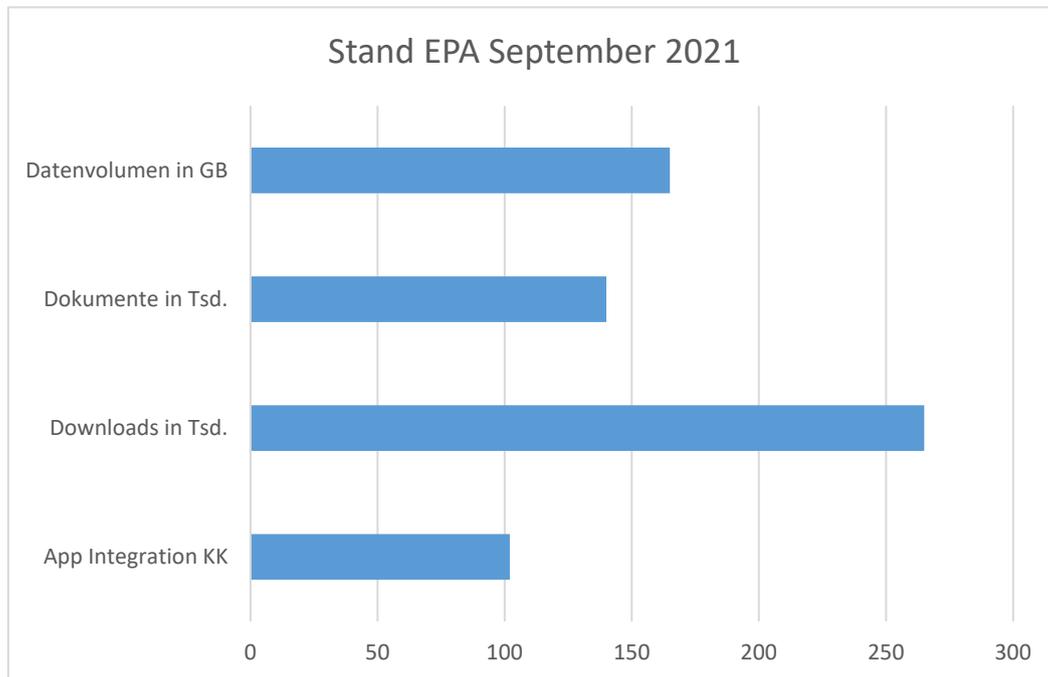


Abbildung 13: Aktueller Stand EPA

Nach neun Monaten wurde ein erstes Resümee im Jahr 2021 gezogen und erste Nutzungsdaten veröffentlicht. In dem Zeitraum wurden bereits über 250 Tausend elektronische Akten angelegt und knapp 135 Tausend Dokumente hochgeladen. Dies verteilt sich über 102 Krankenkassen, die ihren Versicherten diesen Service zu dem Zeitpunkt angeboten haben. Das Datenvolumen beläuft sich hierbei auf 165 GB (siehe Abb. 13).

Ergebnis

Unter Berücksichtigung der oben genannten Annahmen und Limitationen, ergibt sich ein klares Bild was die Emissionen angeht. Die EPA kann, alleine für das Land Baden-Württemberg, erheblich CO₂ einsparen. Das ergibt sich besonders aus dem deutlich günstigeren Speichermedium. Aber auch die digitale Übertragung ist um einiges emissionsärmer.

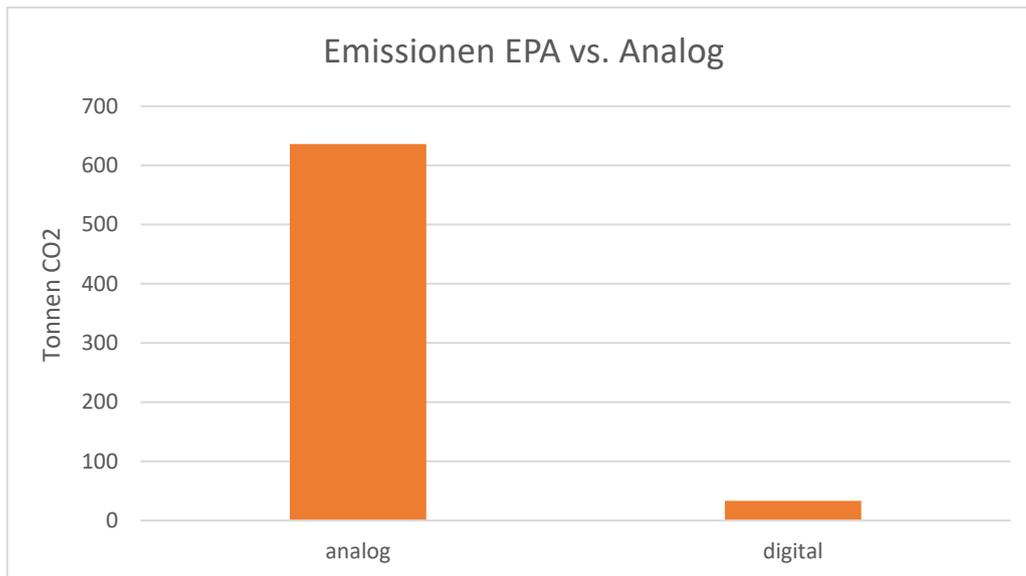


Abbildung 14: Ergebnis EPA vs. Traditionell

Die Emissionen der analogen Patientenakte werden auf ca. 630 Tonnen für das Land Baden-Württemberg geschätzt (siehe Abb. 14). Der Fußabdruck der digitalen Version beläuft sich hingegen auf lediglich ca. 30 Tonnen. Das Einsparpotential durch die Umstellung auf die EPA ist dementsprechend hoch. Zudem kommen weitere Dienstleistungen, welche mit der Digitalisierung der Prozesse und Daten einhergehen. Diese können zu weiteren Einsparungen führen, etwa durch den Wegfall analoger Arztbesuche oder durch die Optimierung von Untersuchungen.

2.6 Einsatz neuer Technologien - Künstliche Intelligenz

2.6.1 Ziel des Arbeitspakets

Ein signifikanter Teilaspekt des Megatrends Digitalisierung ist die Entwicklung und Weiterentwicklung der Künstlichen Intelligenz (KI). Ihr Einsatz ermöglicht heute schon in vielen Bereichen Ergebnisse, die noch vor einigen Jahren undenkbar gewesen wären (aktuell ChatGTP). Der Fortschritt wurde hauptsächlich durch die Weiterentwicklung der Hardware initiiert, der aber inzwischen auch neue Software nach sich zieht. Die KI soll innerhalb des Arbeitspakets folgendermaßen betrachtet werden:

- Anhand von verschiedenen Szenarien soll der Nutzungsumfang von KI abgeschätzt werden und daraus die Ressourcennutzung abgeleitet werden.

2.6.2 Methode

Um die geforderten Ergebnisse zu erreichen wurde zuerst eine Literaturrecherche durchgeführt. Hierbei wurde der aktuelle Nutzungsumfang von KI-Systemen ermittelt. Die Literatur beschäftigt sich zum Teil auch mit dem Ressourcenverbrauch von KI-Systemen. Auch auf diese Aspekte wird eingegangen.

Auf Basis der Recherche werden Szenarien festgelegt und genauer auf ihren potenziellen Ressourcenverbrauch untersucht.

2.6.3 Was sind KI-Systeme?

Im Proposal für eine „*Regulation of the European Parliament and of the council laying down harmonized rules on Artificial Intelligence and amending certain union legislative acts*“ der Europäischen Kommission wird künstliche Intelligenz wie folgt definiert:

“artificial intelligence system’ (AI system) means software that is developed with one or more of the techniques and approaches listed in Annex I and can, for a given set of human-defined objectives, generate outputs such as content, predictions, recommendations, or decisions influencing the environments they interact with.” (European Commission 2021, S. 12)

Künstliche Intelligenz befindet sich auf dem Vormarsch, was eine Prognose zum Umsatz mit Unternehmensanwendungen im Bereich KI von Statista aus dem Jahr 2018 zeigt (siehe Abb. 15).

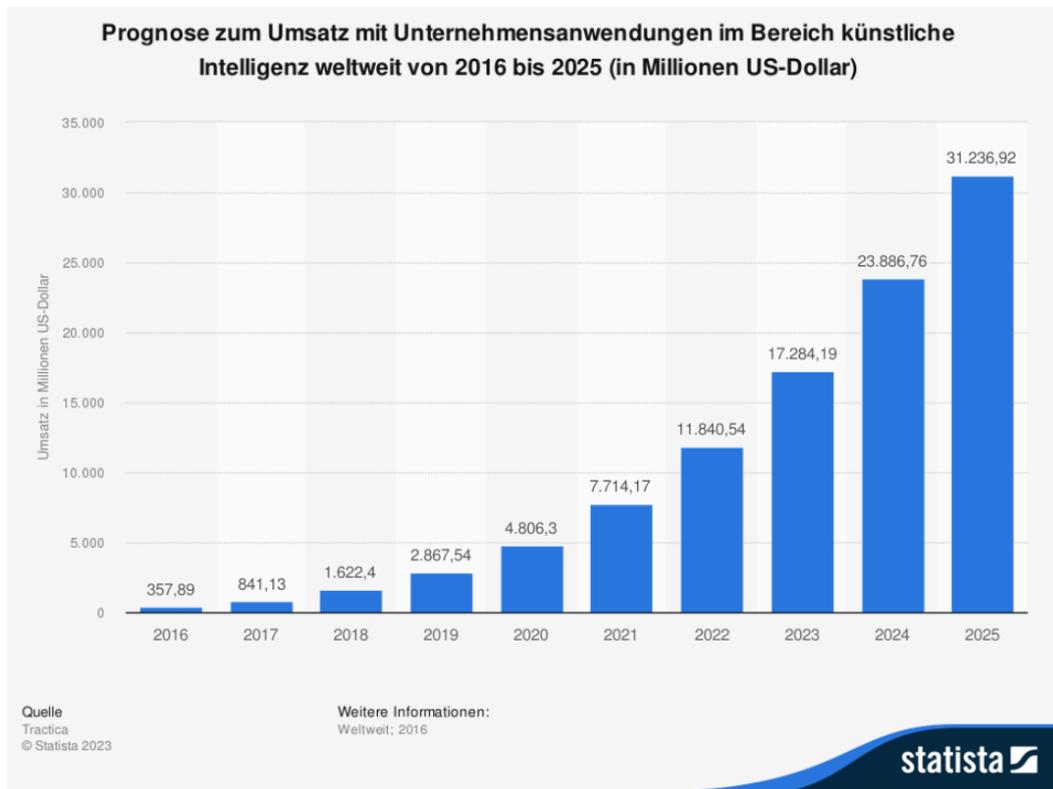


Abbildung 15: Prognose zum Umsatz mit Unternehmensanwendungen im Bereich künstliche Intelligenz weltweit von 2016 bis 2025 (in Millionen US-Dollar) (Statistica. Statistica GmbH)

Laut einer Studie von McKinsey sollen bis zum Jahr 2030 ungefähr 70 % aller Unternehmen mindestens eine Art von KI-System eingeführt haben (McKinsey & Company 2018).

Der Bericht „AI Index 2022 Annual Report“ (Daniel Zhang, Nestor Maslej, Erik Brynjolfsson, John Etchemendy, Terah Lyons, James Manyika, Helen Ngo, Juan Carlos Niebles, Michael Sellitto, Ellie Sakhaee, Yoav Shoham, Jack Clark und Raymond Perrault 2022) der Stanford University befasst sich mit dem aktuellen Stand und der Entwicklung von künstlicher Intelligenz weltweit. Laut dem Bericht nimmt der Umfang der KI-Forschung und -Entwicklung zu. Die Anzahl der KI-Forschungsveröffentlichungen und Patente sowie der Investitionen in KI-Startups nimmt weltweit zu. Die Verwendung von KI in verschiedenen Branchen steigt ebenfalls, einschließlich Gesundheitswesen, Bildung, Landwirtschaft und Energie. KI hat das Potenzial Ungleichgewicht in der Gesellschaft zu verschärfen, insbesondere in Bezug auf Arbeitsplätze und die Verfügbarkeit von KI-Technologien in verschiedenen Regionen der Welt. Der Bericht betont die Notwendigkeit einer nachhaltigen und ethisch verantwortungsvollen Nutzung von KI, um potenzielle Risiken und Herausforderungen im Zusammenhang mit dieser Technologie zu bewältigen. Die Prognosen für den zukünftigen Nutzungsumfang von KI-Systemen sind folgende:

- Autonome Fahrzeuge: Es wird prognostiziert, dass bis 2023 etwa 12 % der weltweiten Fahrzeugflotte autonom sein wird.
- KI im Gesundheitswesen: Bis 2030 wird erwartet, dass die KI in der Lage sein wird, 90 % der klinischen Entscheidungen zu unterstützen.

- KI in der Bildung: Bis 2023 wird erwartet, dass KI-Systeme in der Lage sein werden, personalisierte Lernpfade für Schüler*innen zu erstellen.
- KI im Einzelhandel: Bis 2030 wird erwartet, dass KI-Systeme in der Lage sein werden, personalisierte Einkaufserlebnisse für Kund*innen zu schaffen.

Es ist zu beachten, dass diese Prognosen nur Schätzungen sind und von verschiedenen Faktoren wie technologischen Fortschritten, regulatorischen Veränderungen und wirtschaftlichen Entwicklungen beeinflusst werden können. Ein weiterer Fokus des Berichts liegt auf dem Ressourcenverbrauch im Zusammenhang mit der KI, insbesondere in Bezug auf den Energiebedarf für das Training von KI-Modellen und die Cloud-Computing-Infrastruktur. Der Bericht zeigt, dass der KI-bedingte Energieverbrauch eine potenzielle Bedrohung für die Umwelt darstellt und dass es wichtig ist, nachhaltige Ansätze bei der Entwicklung und Implementierung von KI-Systemen zu fördern.

In einer Veröffentlichung von Ricardo Vinuesa (Vinuesa et al. 2020) wird untersucht welche Rolle KI beim Erreichen der Sustainable Development Goals der UN spielt. Dabei werden die 17 festgelegten Ziele in drei Gruppen unterteilt: Umwelt, Sozial und Wirtschaft. Bei ihren Untersuchungen stellten die Autor*innen Faktoren, die einen positiven Einfluss haben und Faktoren, die einen negativen Einfluss haben, gegenüber. Einzig im Bereich Umwelt überwogen die positiven Aspekte. Das bedeutet, dass Forschung in diesem Bereich besonders sinnvoll ist.

Machine Learning ist eine Methode der Künstlichen Intelligenz, die es Computern ermöglicht Muster in Daten zu erkennen und automatisch aus Erfahrungen zu lernen, ohne dass explizite Anweisungen von einem menschlichen Programmierenden erforderlich sind. Im Wesentlichen geht es darum, Computer-Algorithmen zu entwickeln, die in der Lage sind, von Daten zu lernen und automatisch Entscheidungen zu treffen, ohne dass sie speziell dafür programmiert werden müssen. Der Energieverbrauch beim Maschinellen Lernen kann hier bei einer sehr großen Datenmenge äußerst hoch sein. Eine Studie aus dem Jahr 2019 von Forschenden der University of Massachusetts Amherst schätzte, dass das Training eines einzigen großen neuronalen Netzes 284 Tonnen CO₂-Emissionen verursachen könnte – das entspricht etwa fünf Mal dem durchschnittlichen Lebenszyklus eines Autos (Strubell et al. 2019). Machine Learning Algorithmen werden beispielsweise in der Bilderkennung, der Spracherkennung, der Datenvorhersage und vielen anderen Anwendungen eingesetzt.

2.6.4 Festlegung der zu betrachtenden Szenarien

Die Einsatzfelder der künstlichen Intelligenz verschwimmen miteinander. Beispielsweise wird für die Navigation in GoogleMaps eine Mischform zwischen der Verarbeitung der Sprache und einem Expertensystem verwendet. Durch einen Sprachbefehl wird die Route des Ziels berechnet, durch die Anwendung von Expertensystemen wird außerdem ausgegeben, welche Route den kleinsten CO₂-Ausstoß verursacht.

KI-Systeme finden heutzutage in vielen Bereichen Einsatz. Die folgenden Einsatzmöglichkeiten von Künstlicher Intelligenz wurden der aktuellen Literatur entnommen. Dabei wurden diejenigen berücksichtigt, die einen erheblichen Einfluss auf den Energie- und Ressourcenverbrauch haben.

- Verkehr (autonomes Fahren, Navigation)
- Smart Home und Energiesektor
- Landwirtschaft Einsatz von Düngemittel Pestiziden

2.6.5 Anwendungsfelder und Szenarien

Smart Home und Energiesektor

	Ressourcenverbrauch	Energieverbrauch
Erwartete Veränderung durch die Anwendung von KI-Systemen in diesem Bereich verglichen mit dem Status Quo	Reduzierung	Reduzierung

Tabelle 25: Auswirkungen beim Einsatz von Smart Home Systemen

Ein Smart Home mit künstlicher Intelligenz umfasst eine Vielzahl von vernetzten Geräten und Systemen, die miteinander kommunizieren und automatisch aufeinander abgestimmt werden können. Die künstliche Intelligenz spielt dabei eine wichtige Rolle, da sie Daten aus verschiedenen Quellen analysiert, um Vorhersagen und Entscheidungen zu treffen, die den Energieverbrauch und die Leistung des Hauses optimieren können.

Zu den Geräten und Systemen, die Teil eines Smart Home mit KI sein können, gehören:

- Smarte Thermostate
- Intelligente Beleuchtung
- Smarte Steckdosen
- Intelligente Haushaltsgeräte
- Überwachungssysteme
- Smarte Assistenten

Intelligente Stromnetze können die Versorgungssicherheit erhöhen und idealerweise zu Kostenreduzierung führen. Künstliche Intelligenzen ermöglichen es Stromanbietern die Lastverteilung besser vorherzusagen und zu optimieren. Smart Grid-Initiativen ermöglichen es kleinen privaten Energieerzeugern überschüssige Kapazitäten an die regionalen Energieversorger zu verkaufen. Smart Homes sind im besten Fall mit dem Internet und mit einem intelligenten Stromnetz vernetzt.

Der Energieverbrauch von Gebäuden ist ein wichtiger Faktor bei der globalen Energiebilanz und den CO₂-Emissionen. Smart Homes können, laut einer Studie von Jentsch et al (Jentsch et al. 2010), einen wichtigen Beitrag dazu leisten (DEAB & Werkstatt Ökonomie 2013). Ein aktuelles Thema ist die Kombination von Smart Homes und Intelligenten Stromnetzen. Laut einem Bericht der International Energy Agency von 2020 (International Energy Agency et al. 2020) ist Europa in Bezug auf die Nutzung von Smart-Grid-Technologien und intelligenten Zählern weltweit führend. Insbesondere werden hier Dänemark, Deutschland, Frankreich, Italien, Schweden und Spanien genannt. Laut Statista (Statistica. Statistica GmbH 2022) wird der Nutzen von intelligenten Stromnetzen kontrovers diskutiert. Es gibt unterschiedliche Meinungen zum Nutzen von intelligenten Stromnetzen im Bereich der Elektro- und Informationstechnik. Eine Umfrage aus dem Jahr 2014 zur Innovationslage in Deutschland zeigt jedoch positive Erwartungen bezüglich Smart Grids.

Im Folgenden werden die möglichen Auswirkungen auf den Energie- und Ressourcenverbrauch beim Einsatz eines Smart Home Systems beschrieben. Betrachtet wird dabei der Wohnraum einer vierköpfigen Familie mit 150 m² Wohnfläche und einem kleinen Garten bei dem der Rasen und dekorative Pflanzen bewässert werden müssen. Das Haus ist auch über einen Smart Meter mit dem Smart Grid verbunden, welches mit dem Stromnetz kommuniziert.

Die Wohnung ist mit verschiedenen smarten Geräten ausgestattet, die miteinander vernetzt sind und über eine zentrale Steuerungseinheit bedient werden können. Beispielsweise können über eine App auf dem Smartphone oder dem Tablet verschiedene Funktionen gesteuert werden, wie die Heizung, das Licht, die Jalousien und Elektrogeräte.

Mithilfe der intelligenten Heizsteuerung kann die Familie die Raumtemperatur in den einzelnen Räumen individuell einstellen und auf ihre Bedürfnisse anpassen. So können sie die Heizung in den Zimmern, die nicht genutzt werden, herunterregeln und Energie sparen. Über Sensoren wird außerdem erfasst, ob sich Personen im Raum befinden, sodass die Heizung auch diesbezüglich angepasst wird.

Die Beleuchtung ist ebenfalls smart gesteuert und wird durch Bewegungssensoren aktiviert und deaktiviert. So wird vermieden, dass unnötig Licht brennt. Auch hier kommen Sensoren zum Einsatz, die die Lichtverhältnisse einbeziehen.

Ein weiteres Feature ist die Überwachung des Energieverbrauchs im Haus. Dank intelligenter Stromzähler kann die Familie ihren Energieverbrauch in Echtzeit überwachen und optimieren. So können sie erkennen, welche Geräte besonders viel Strom verbrauchen und gezielt Energie einsparen.

Auch der Wasserverbrauch kann durch den Einsatz von smarten Geräten reduziert werden. So kann eine intelligente Bewässerungsanlage im Garten installiert werden, die den Wasserbedarf der Pflanzen ermittelt und entsprechend steuert. Auch der Wasserdruck und die Temperatur in der Dusche können automatisch angepasst werden, um den Wasserverbrauch zu optimieren.

Die Familie hat auch smarte Geräte wie Waschmaschine und Trockner installiert, die über das Smart Grid gesteuert werden können. Das System erkennt, wenn erneuerbare Energien wie Sonnen- oder Windenergie verfügbar sind und startet dann automatisch den Betrieb der Geräte, um diese Energie zu nutzen. Wenn die Energieversorgung knapp wird, kann das System die Geräte automatisch abschalten, um das Netz zu stabilisieren.

In dem beschriebenen Szenario trägt der Einsatz von Smart Home Technologien dazu bei, den Energie- und Ressourcenverbrauch im Wohnhaus zu reduzieren und somit Kosten zu sparen und den Einfluss auf die Umwelt zu verringern.

Es ist jedoch auch möglich, dass der Einsatz von Smart Home Systemen sich negativ auf den Energie- und Ressourcenverbrauch auswirken kann, wenn sie nicht sinnvoll eingesetzt werden. Die Installation von zu vielen smarten Geräten und Systemen kann dazu führen, dass der Energiebedarf im Haushalt insgesamt steigt anstatt zu sinken.

Auch die Herstellung und Entsorgung von smarten Geräten und Systemen kann negative Auswirkungen auf die Umwelt haben. Um sicherzustellen, dass Smart Home Systeme tatsächlich zu einer Reduktion des Energie- und Ressourcenverbrauchs führen und nicht zu einem Anstieg, ist es wichtig sie sinnvoll und effizient einzusetzen.

Generell lässt sich sagen, dass die Anwendung von Smart Home Technologien dazu beitragen kann, den Energie- und Ressourcenverbrauch zu reduzieren und somit positiv auf die Umweltbilanz wirken kann (siehe Tabelle 25).

Verkehrssektor

	Ressourcenverbrauch	Energieverbrauch
Erwartete Veränderung durch die Anwendung von KI-Systemen in diesem Bereich verglichen mit dem Status Quo	Reduzierung	Unklar

Tabelle 26: Auswirkungen Einsatz KI im Verkehrssektor

Im Verkehrssektor gibt es verschiedene Anwendungen und Technologien der Künstlichen Intelligenz, die eingesetzt werden können. Im Folgenden werden diejenigen untersucht, die einen Einfluss auf den Energie- und Ressourcenverbrauch haben können.

- Autonomes Fahren

KI-Systeme werden verwendet, um die Entscheidungen zu treffen, die für die Navigation, Geschwindigkeitskontrolle, die Vermeidung von Hindernissen und die Sicherheit der Passagiere und anderer Verkehrsteilnehmenden erforderlich sind. Bezüglich des Energie- und Ressourcenverbrauchs gibt es sowohl positive als auch negative Auswirkungen. Zu den potenziell positiven gehören (Lv und Shang 2023):

- Effizientere Fahrweise: Automatisierte Fahrzeuge können in der Lage sein, effizienter zu fahren, indem sie beispielsweise optimale Geschwindigkeiten und Beschleunigungsraten verwenden.
- Elektrifizierung des Verkehrs: Automatisierte Fahrzeuge könnten die Einführung von Elektrofahrzeugen beschleunigen, da sie eine bessere Nutzung der Batteriekapazität ermöglichen.

Zu den potenziell negativen Auswirkungen gehören:

- Erhöhte Fahrleistung: Automatisierte Fahrzeuge können dazu führen, dass mehr Autos auf der Straße unterwegs sind und somit den Energieverbrauch und die Emissionen erhöhen.
- Größere und schwere Fahrzeuge: Automatisierte Fahrzeuge könnten größer und schwerer sein, um die notwendige Technologie und Sensorik aufzunehmen, was den Kraftstoffverbrauch erhöhen kann.
- Energiebedarf der Automatisierung: Die Automatisierung erfordert die Verwendung von Computern und Sensoren, die selbst Energie verbrauchen und hergestellt werden müssen.

Studien kommen zu dem Schluss, dass der Einsatz von KI im Bereich des autonomen Fahrens ein großes Potenzial hat Ressourcen einzusparen. Insgesamt ist es jedoch schwierig, eine eindeutige Aussage darüber zu treffen, ob autonomes Fahren den Stromverbrauch steigert oder senkt, da dies von vielen verschiedenen Faktoren abhängt. Eine Studie des Öko-Instituts aus dem Jahr 2018 (Öko-Institut e.V. Freiburg 2018) kommt zu dem Ergebnis, dass autonomes Fahren den Stromverbrauch in Deutschland um 0,5 bis 2,2 TWh im Jahr erhöhen könnte. Dies entspräche einem Anstieg von etwa 0,2 bis 0,8 Prozent des aktuellen Stromverbrauchs in Deutschland.

Die Studie stellt jedoch auch fest, dass eine Verbreitung von Elektrofahrzeugen und die Verwendung von erneuerbaren Energien den zusätzlichen Strombedarf durch autonomes Fahren ausgleichen könnten. Darüber hinaus könnten effiziente Ladeinfrastrukturen und intelligente Stromnetze dazu beitragen, den zusätzlichen Strombedarf durch autonome Fahrzeuge zu minimieren.

Ähnlich verhält es sich mit dem Ressourcenverbrauch. Autonome Fahrzeuge können die Geschwindigkeit, die Beschleunigung und die Bremsung präziser und vorhersehbarer steuern als menschliche Fahrer. Dies ermöglicht eine gleichmäßigere Fahrt und vermeidet abrupte Beschleunigungen oder Bremsungen, die zu einem höheren Kraftstoffverbrauch führen können.

Darüber hinaus können autonomes Fahren und vernetzte Fahrzeugtechnologien den Verkehrsfluss optimieren, indem sie den Abstand zwischen den Fahrzeugen reduzieren und so den Luftwiderstand verringern. Dies kann auch den Kraftstoffverbrauch reduzieren.

Es gibt jedoch auch Faktoren, die den Kraftstoffverbrauch beim autonomen Fahren erhöhen können, wie z.B. der Einsatz von leistungsstarken Rechnern und Sensoren, die Energie verbrauchen. Zudem können längere Staus oder unvorhergesehene Hindernisse dazu führen, dass das Fahrzeug länger im Leerlauf ist oder Umwege machen muss, was den Kraftstoffverbrauch erhöhen kann (Bhargava Srinivasulu 2020).

- Intelligente Verkehrsmanagementsysteme (IVMS):

IVMS sind Systeme, die Künstliche Intelligenz, Big Data und andere Technologien nutzen, um den Verkehr auf Straßen, Schienen und Wasserwegen zu optimieren. Diese Systeme erfassen, analysieren und verarbeiten Echtzeit-Verkehrsdaten, um Verkehrsprobleme zu erkennen und zu lösen. Zu den wichtigsten Elementen eines intelligenten Verkehrsmanagementsystems gehören (Chirine Etezadzadeh 2020):

- Verkehrsüberwachung: Sensoren und Kameras werden eingesetzt, um den Verkehr in Echtzeit zu überwachen und Daten über die Verkehrsbelastung, Verkehrsflüsse und Staus zu sammeln.
- Verkehrsinformationssysteme: Diese Systeme sammeln Informationen über den Verkehr und geben diese an Verkehrsteilnehmende weiter, um eine bessere Routenplanung und Vermeidung von Staus zu ermöglichen. Diese Informationen können in Echtzeit auf Verkehrsschildern, in Navigationssystemen oder in mobilen Anwendungen angezeigt werden.
- Verkehrssteuerung: Intelligente Verkehrsmanagementsysteme können Ampelsysteme und Verkehrsflussregelungen automatisch anpassen, um den Verkehrsfluss zu optimieren und Staus zu minimieren.
- Intelligente Transportsysteme (ITS): ITS-Technologien umfassen Systeme wie Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation, automatische Notfallbremsysteme und intelligente Navigationssysteme, die die Effizienz und Sicherheit im Straßenverkehr verbessern.
- Parkleitsysteme: Intelligente Parkleitsysteme können die Parkplatzsuche erleichtern, indem sie den Verkehr zu verfügbaren Parkplätzen leiten und so den Verkehr reduzieren.

Im Folgenden werden die Auswirkungen auf den Energie- und Ressourcenverbrauchs durch den Einsatz von KI im Verkehrssektor anhand eines Szenarios untersucht.

Eine mittelgroße Stadt, in der zu den Stoßzeiten viel Verkehr herrscht, betreibt ein intelligentes Verkehrsmanagementsystem, das auf künstlicher Intelligenz basiert. Dieses System verwendet Sensoren, Kameras, GPS und weitere Technologien, um den Verkehrsfluss zu überwachen und zu optimieren. Das System erkennt zum Beispiel, wenn sich Stau bildet und kann dann die Verkehrssignale so anpassen, dass der Verkehr schneller und effizienter fließen kann. Es kann auch die Routen von öffentlichen Verkehrsmitteln optimieren, um Verspätungen zu minimieren und eine bessere Koordination zu ermöglichen.

Durch diese Optimierungen kann das IVMS den Energie- und Ressourcenverbrauch reduzieren. Wenn der Verkehr reibungsloser fließt, müssen Fahrzeuge weniger beschleunigen und bremsen, was den Kraftstoffverbrauch reduziert. Wenn öffentliche Verkehrsmittel schneller und effizienter fahren, werden weniger Fahrzeuge benötigt. Aus der Anwendung von künstlicher Intelligenz im Verkehrssektor können sich auch negative Auswirkungen ergeben. Sollte das Verkehrssystem zu stark auf künstliche Intelligenz und Technologie angewiesen sein, kann dies zu Problemen führen, wenn dieses ausfällt oder nicht einwandfrei funktioniert. In diesem Fall könnte ein Verkehrsstau verschlimmert werden.

Mit Blick auf aktuelle Studien lässt sich festhalten, dass der Einsatz von künstlicher Intelligenz im Verkehrssektor den Energie- und Ressourcenverbrauch reduzieren kann. Es können Staus minimiert werden, sodass der Schadstoffausstoß und der Kraftstoffverbrauch von Fahrzeugen reduziert wird. Auch die Optimierung der Routen von öffentlichen Verkehrsmitteln und die Einführung von autonomen Fahrzeugen können zu einer effizienteren Nutzung von Energie und Ressourcen beitragen. Allerdings ist es wichtig zu beachten, dass der Einsatz von künstlicher Intelligenz auch negative Auswirkungen haben kann, wie beispielsweise die Abhängigkeit von Technologien. Es ist daher entscheidend, diese Faktoren sorgfältig zu berücksichtigen und zu adressieren, um sicherzustellen, dass der Einsatz von KI tatsächlich zu einem nachhaltigeren effizienteren Transportwesen führen kann. Die Veränderung hinsichtlich des Energieverbrauchs ist unklar (siehe Tabelle 26). Einige Studien gehen davon aus, dass der Stromverbrauch unter Einsatz von KI Technologien im Verkehrssektor steigen wird, da die Elektronik und Sensorik von autonomen Fahrzeugen mehr Energie benötigt. Gleichzeitig gibt es auch Argumente, die besagen, dass der Stromverbrauch von autonomen Fahrzeugen durch eine effizientere Fahrweise und eine optimierte Verkehrslenkung reduziert werden kann.

Landwirtschaft

	Ressourcenverbrauch	Energieverbrauch
Erwartete Veränderung durch die Anwendung von KI-Systemen in diesem Bereich verglichen mit dem Status Quo	Reduzierung	Unklar

Tabelle 27: Auswirkungen beim Einsatz von KI in der Landwirtschaft

Künstliche Intelligenz kann auch in der Landwirtschaft eingesetzt werden, um Erträge zu steigern, Kosten zu senken und die Effizienz der landwirtschaftlichen Produktion zu verbessern. Beispiele zum Einsatz von KI Anwendungen in der Landwirtschaft sind (Shaikh et al. 2022):

- Optimierung von Bewässerung und Düngemitteln: KI kann den Einsatz von Wasser und Düngemitteln optimieren, indem es Daten zu Bodenbeschaffenheit, Wetterbedingungen und Pflanzenwachstum analysiert und Empfehlungen zur Anpassung von Bewässerungs- und Düngemitteltechnik gibt.
- Schädlingsbekämpfung: KI kann zur Überwachung von Schädlingsbefall eingesetzt werden. Dies kann dazu beitragen den Schädlingsbefall frühzeitig zu erkennen und den Einsatz von Pestiziden zu verringern.
- Ernteprognosen: KI kann eingesetzt werden, um mithilfe von Datenanalysen und maschinellem Lernen Ertragsprognosen zu erstellen und somit Landwirt*innen zu helfen, ihre Anbauentscheidungen zu optimieren.
- Robotik in der Landwirtschaft: KI-basierte Roboter können eingesetzt werden, um verschiedene Aufgaben in der Landwirtschaft auszuführen, wie das Pflanzen, Ernten oder Beschneiden der Pflanzen.

In einer Studie von Prakash, Channa S. (Prakash et al. 2023) wird der Einsatz von technologischen Innovationen in der Landwirtschaft zur Erreichung einer nachhaltigeren landwirtschaftlichen Produktion untersucht. Die Autor*innen stellen fest, dass die traditionelle landwirtschaftliche Praxis oft nicht nachhaltig ist und zu Umweltproblemen führen kann. Durch den Einsatz von künstlicher Intelligenz können Umweltauswirkungen verringert und die Effizienz gesteigert werden. Durch den Einsatz von KI-Anwendungen können zum Beispiel Pflanzenkrankheiten und Schädlingsbefall frühzeitig erkannt werden, was den Einsatz von Pestiziden reduzieren kann. Darüber hinaus können KI-Systeme zur Optimierung von Düngemittel- und Wasseranwendungen eingesetzt werden, um Ressourcen zu sparen und die Umweltbelastung zu minimieren. Der Einsatz von KI kann den Energieverbrauch in der Landwirtschaft sowohl erhöhen als auch reduzieren, abhängig von den spezifischen Anwendungen und Technologien. Zum Beispiel kann der Einsatz von KI-Technologien wie Drohnen, autonomen Fahrzeugen und Robotern dazu beitragen, den Energieverbrauch bei der Ernte zu reduzieren. Darüber hinaus kann KI auch zur Optimierung von Düngemittel- und Wasseranwendungen eingesetzt werden, um Ressourcen zu sparen. Allerdings können einige KI-Anwendungen, wie z. B. der Einsatz von Hochleistungscomputern zur Verbreitung von Daten einen erhöhten Energieverbrauch verursachen. Das Gleiche gilt für den Einsatz von Robotik in der Landwirtschaft.

Abschließend lässt sich sagen, dass durch den Einsatz von KI-Systemen Ressourcen wie Wasser und Brennstoffe eingespart werden können. Außerdem kann der Einsatz von Pestiziden verringert werden, was sich positiv auf die Umwelt auswirkt. Der Einfluss auf den Stromverbrauch ist noch unklar (siehe Tabelle 27).

3 Arbeitspaket 2 – Herstellung von Geräten und Einrichtungen, Einkauf und Beschaffung

Im Bereich der Informations- und Kommunikationstechnologie (IKT) gewinnt nachhaltiges Lieferkettenmanagement sowie eine nachhaltige Beschaffung, Verwendung und Entsorgung von Ressourcen immer mehr an Bedeutung, da hier der Material- und Rohstoffverbrauch erheblich ist und auch die Energieeffizienz der Geräte eine große Rolle spielt. Durch die enorm hohen Beschaffungsvolumina von IKT-Hardware ist die öffentliche Verwaltung ein bedeutender Marktfaktor in der IKT-Industrie und trägt somit eine entsprechend große Verantwortung für die sozialen und ökologischen Bedingungen in den Lieferketten der eingekauften sowie entsorgten IKT-Produkte. Dabei stellt sich die Frage: Wie können Beschaffende im öffentlichen Dienst, die IKT-Hardware einkaufen, von den Anbietenden verlangen, dass sowohl Menschenrechte als auch Umweltschutzbestimmungen in allen beteiligten Gliedern der komplexen Lieferkette eingehalten werden? Vor allem Rechenzentren der öffentlichen Hand sollten sich dieser Frage stellen, um ihrer gesellschaftlichen und ökologischen Verantwortung in der Lieferkette nachkommen zu können und eine Vorreiterrolle zu übernehmen. Auch für Beschaffungen im High Performance Computing (HPC) wird nachhaltiges Lieferkettenmanagement immer wichtiger. Die öffentliche Hand kann über ihre Marktmacht die Hersteller für eine sozial und umweltgerechte Produktion sensibilisieren.

In Arbeitspaket 2 wird das folgende Thema behandelt – „Herstellung von Geräten und Einrichtungen, Einkauf und Beschaffung“.

Basierend auf den bereits vorhandenen Erfahrungen und Ergebnissen aus vorherigen und laufenden Projekten am HLRS wird der Fokus noch einmal schärfer in Richtung globale Betrachtung der nachhaltigen Beschaffung, Verwendung und Entsorgung von Ressourcen in Rechenzentren gelegt.

3.1 Arbeitspaket 2.1 – Beschaffung und Entsorgung von Hard- und Software und der Berücksichtigung von Nachhaltigkeitskriterien

Es wird erforscht, in welchem Umfang auch in Rechenzentren, die stark an neuen Technologien und den Ausbau der Kapazitäten ausgerichtet sind, Möglichkeiten bestehen eine Balance zwischen technischen Anforderungen und Nachhaltigkeit herzustellen.

Die Suche nach dieser Balance hat am HLRS deutlich früher angefangen als dieses Projekt ins Leben gerufen wurde. Bereits mit dem ersten Projekt „Nachhaltigkeit an HPC-Zentren I“ im Jahr 2014 stellte sich die Frage, wie die Beschaffung nachhaltiger gestaltet werden kann – unter welchen Bedingungen und unter Berücksichtigung welcher Kriterien. Bund, Länder und Kommunen beschaffen jährlich für ca. 500 Milliarden Euro Waren und Dienstleistungen (WEED e.V. 2022). Öffentliche europäische Einrichtungen beschaffen jedes Jahr Elektronikgeräte im Wert von 50 Milliarden Euro. Dabei handelt es sich um Computer, Server, Monitore, Workstations, Drucker oder Smartphones (ICLEI Europe 2020). Das Beschaffungsvolumen für IT-Geräte für die öffentliche Verwaltung beträgt jährlich circa 20 Milliarden Euro (Kompass Lieferkettenmanagement Teil 1 2021) und macht damit fast die Hälfte des europäischen Beschaffungsvolumens für IKT-Hardware aus. Im Jahr 2013 wurde jedes fünfte IT-Gerät in Deutschland von der öffentlichen Hand beschafft (DEAB & Werkstatt Ökonomie 2013). Die öffentliche Verwaltung ist damit ein bedeutender Marktfaktor und trägt eine große Verantwortung für die sozialen und ökologischen Bedingungen in den Lieferketten der eingekauften IKT-Produkte. Über ihre Marktmacht kann die öffentliche Hand die IT-Hersteller für eine sozial und umweltgerechte Produktion sensibilisieren und in die richtige Richtung lenken.

Der Begriff der Nachhaltigkeit wurde durch den Bericht der Weltkommission für Umwelt und Entwicklung (WCED) entscheidend geprägt. Nachhaltig ist danach eine Entwicklung, die die Lebensqualität in der gegenwärtigen Generation sichert und gleichzeitig zukünftigen Generationen die Wahlmöglichkeiten zur Gestaltung ihres Lebens ermöglicht. In der Definition des Rates für Nachhaltige Entwicklung

der von der Bundesregierung im April 2001 berufen wurde (Rat für Nachhaltige Entwicklung 2023), werden die drei Dimensionen der Nachhaltigkeit angesprochen: „*Nachhaltige Entwicklung heißt, Umweltgesichtspunkte gleichberechtigt mit sozialen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten zu berücksichtigen. Zukunftsfähig wirtschaften bedeutet also: Wir müssen unseren Kindern und Enkelkindern ein intaktes ökologisches, soziales und ökonomisches Gefüge hinterlassen. Das eine ist ohne das andere nicht zu haben*“ (Bär et al. 2016)(Rat für Nachhaltige Entwicklung 2019).

Der systemtheoretisch fundierte Ansatz betrachtet Wirtschaft, Umwelt und Gesellschaft als eigenständige, aber miteinander gekoppelte Subsysteme. Jedes dieser Systeme verfügt über eigene Dynamiken, Gesetzmäßigkeiten, Regeln sowie räumliche und zeitliche Strukturen. Nur durch die gleichzeitige Erhaltung der Funktionsdynamiken aller drei Einzelsysteme ist die Funktionsfähigkeit und Störungsresistenz des Gesamtsystems gewährleistet (Blazejczak und Edler 2004).

Die Nachhaltigkeitskriterien aus ökonomischer Perspektive spezifizieren die Bedingungen eines Systemerhalts für das ökonomische System, in dem natürliche Ressourcen als knappe Produktionsfaktoren angesehen werden, unter Berücksichtigung von inter- und intragenerativen Gerechtigkeitsüberlegungen. Das ökonomische System kann in physischen Dimensionen von Stoff- und Energieflüssen beschrieben werden, über die es mit dem ökologischen System verbunden ist. Die Entwicklung von Nachhaltigkeitskriterien aus sozialer Perspektive geht von einer „gemäßigten Anthropozentrik“ aus, die auf der Einzigartigkeit des Menschen (kognitiver und normativer Anthropozentrismus) und der Verpflichtung zur Erhaltung der Natur basiert (Knaus und Renn 1998). Der normative soziale Gehalt von Nachhaltigkeit kann danach mit folgenden vier Prinzipien beschrieben werden:

- ein Recht auf ein menschenwürdiges Leben für alle
- intergenerative und internationale Gerechtigkeit
- ein anderer, ressourcenärmerer Wohlstand in den Industrieländern (als Basis für Umverteilungspotentiale)
- eine Beteiligung aller gesellschaftlichen Akteursgruppen.

Heutzutage stehen uns viele Möglichkeiten und Wege zur Verfügung, Nachhaltigkeitskriterien in den Beschaffungsprozess zu integrieren. Basierend auf Kernprinzipien nachhaltiger Beschaffung können folgende Kriterien helfen, soziale und ökologische Aspekte im Beschaffungsprozess systematisch zu berücksichtigen (Kompass Nachhaltigkeit 2023a).

3.1.1 Bedarfsanalyse

In vielen Fällen werden dieselben Produkte aus einer Routine heraus gekauft und nicht notwendigerweise, weil sie die beste Lösung für ein Problem bieten. Durch die systematische Untersuchung ermöglicht die Bedarfsanalyse eine Lösung und das passende Produkt zu finden. Die Berücksichtigung folgender Nachhaltigkeitsaspekte erleichtern die Untersuchung:

- Ermittlung des Bedarfs
- Alternative Wege der Bedarfsdeckung
- Lebenszykluskosten (Umweltbundesamt 2023) des ausgewählten Produkts
- CSR Risiko-Check (Agentur für Wirtschaft und Entwicklung 2023) der relevanten sozialen und ökologischen Risiken des Produktes
- Abwägung von Ausstattungselementen sowie
- Gewichtung von einzelnen Funktionen des Produkts

3.1.2 Marktanalyse

Die Marktanalyse ermöglicht den Anbietenden die Chance, einen umfassenden Überblick über vorhandene Alternativen zu erhalten und gegebenenfalls mit dem Markt in einen Dialog zu treten, insbesondere bei komplexen Produkten oder Dienstleistungen. Dabei sind folgende Maßnahmen hilfreich:

- Sondierungsgespräche mit langjährigen Vertragspartnern
- Messebesuche und Informationsgespräche mit Anbietern
- Informationsveranstaltungen für Unternehmen zur Vergabepraxis allgemein und den anstehenden Vergabeverfahren
- Vergleich von Produkten mit Güterzeichen und Standards (Kompass Nachhaltigkeit 2023b)
- Veröffentlichung von Vorabinformationen mit den geforderten Nachhaltigkeitskriterien

3.1.3 Auftragsgegenstand

Anhand des Auftragsgegenstandes wird das gesuchte Produkt oder die zu erwerbende Dienstleistung über Zuschlagskriterien sowie Kriterien in der Leistungsbeschreibung näher definiert. Über die Auswahl des Gegenstandes besteht die Möglichkeit, Umweltaspekte und Sozialstandards in das Vergabeverfahren einfließen zu lassen.

3.1.4 Leistungsbeschreibung

Die Leistungsbeschreibung umfasst sämtliche Anforderungen an die zu erbringende Leistung, die von allen Unternehmen beachtet werden müssen und dient als Grundlage für die Erstellung der Angebote durch die Bietenden. In der Leistungsbeschreibung ist der Auftragsgegenstand so eindeutig und erschöpfend wie möglich zu beschreiben, damit er für alle Unternehmen im gleichen Sinn verständlich ist und die Angebote miteinander verglichen werden können.

Die Merkmale des Auftragsgegenstandes können die Anforderungen sowohl mit Umweltbezug als auch mit verpflichtender Berücksichtigung von Umweltaspekten beinhalten (Umweltbundesamt 2017a). Die Merkmale sollen einen Auftragsbezug aufweisen und im Verhältnis zum Beschaffungsziel des Auftrags stehen.

Im Oberschwellenbereich gilt laut Vergabeverordnung, dass *„die Merkmale auch Aspekte der Qualität und der Innovation sowie soziale und umweltbezogene Aspekte betreffen können. Sie können sich auch auf den Prozess oder die Methode zur Herstellung oder Erbringung der Leistung oder auf ein anderes Stadium im Lebenszyklus des Auftragsgegenstands einschließlich der Produktions- und Lieferkette beziehen, auch wenn derartige Faktoren keine materiellen Bestandteile der Leistung sind, sofern diese Merkmale in Verbindung mit dem Auftragsgegenstand stehen und zu dessen Wert und Beschaffungszielen verhältnismäßig sind“* (Vergabeverordnung § 31 Abs. 3 VgV, Leistungsbeschreibung 2016). Hierzu gehören auch Vorgaben zur Einhaltung der ILO-Kernarbeitsnormen (Internationale Arbeitsorganisation, International Labour Organization (ILO)) entlang der Produktionskette. Dasselbe gilt für die Bundesländer, welche diese bereits für anwendbar erklärt haben, im Unterschwellenbereich (Unterschwellenvergabeverordnung § 23 Abs. 2 UVgO, Leistungsbeschreibung 2021).

3.1.5 Ausschlusskriterien & Eignungsprüfung

In der Eignungsprüfung wird die Fähigkeit des Wirtschaftsteilnehmenden zur Auftragsausführung beurteilt. Ausschließlich werden die folgenden Eignungskriterien in Betracht gezogen:

- Befähigung und Erlaubnis zur Berufsausübung
- wirtschaftliche und finanzielle Leistungsfähigkeit
- technische und berufliche Leistungsfähigkeit (Gesetz gegen Wettbewerbsbeschränkungen 2016), (Vergabeverordnung § 44-46 VgV 2016)

In der Unterschwellenbereich sind diese Vorgaben nicht ganz so streng (Unterschwellenvergabeordnung, § 31 UVgO September 2021), da die Eignungsnachweise nicht aufgezählt werden. Außer o.g. klassischen Kriterien können im Rahmen der technischen und beruflichen Leistungsfähigkeit auch nachhaltigkeitsrelevante Aspekte überprüft werden.

Zu den Ausschlussgründen mit Nachhaltigkeitsbezug gehören zwingende und fakultative. Zwingende Ausschlussgründe führen zu einem Ausschluss eines Unternehmens von der Teilnahme am Vergabeverfahren zu jedem Augenblick des Vergabeverfahrens. Bei Vorliegen eines fakultativen Ausschlussgrunds steht der Ausschluss des Unternehmens im Ermessen des Auftraggebenden und unterliegt dem Gebot der Verhältnismäßigkeit.

3.1.6 Zuschlagskriterien

Durch die Bewertung jedes geeigneten Angebots anhand von Zuschlagskriterien können weitere Nachhaltigkeitsaspekte in die Vergabeentscheidung einfließen. Das Angebot mit dem besten Preis-Leistungsverhältnis erhält den Zuschlag. Bei dieser Wirtschaftlichkeitsprüfung können auch Nachhaltigkeitskriterien bewertet werden.

Bei der Definition der Zuschlagskriterien ist es wichtig, dass diese eine Verbindung zum Auftragsgegenstand aufweisen (Gesetz gegen Wettbewerbsbeschränkungen, § 127 GWB 2016) (Unterschwellenvergabeordnung, § 43 UVgO 2021).

Ein zu beschaffendes Produkt aus fairem Handel schneidet im Rahmen der Zuschlagswertung besser ab, als ein konventionell gehandeltes. Gütezeichen können als Nachweis für die Erfüllung der Zuschlagskriterien verwendet werden.

Eine weitere Möglichkeit der Berücksichtigung von Nachhaltigkeitsaspekten beim Zuschlag bietet der Ausschluss ungewöhnlich niedriger Angebote. Wenn eine Überprüfung ergibt, dass der niedrige Preis auf einen Verstoß gegen umwelt-, sozial- oder arbeitsrechtliche Vorschriften zurückzuführen ist, kann das Angebot abgelehnt werden (Vergabeverordnung, § 60 VgV) (Unterschwellenvergabeordnung, § 44 UVgO 2021).

3.1.7 Auftragsausführung

Der Vergabeprozess ist abgeschlossen, wenn der Auftrag vergeben wurde. Die Auftragsausführung fällt damit unter die Privatautonomie und unterliegt nicht den strengen Richtlinien der Vergabeverordnungen. Ab diesem Zeitpunkt bietet sich die Chance solche Nachhaltigkeitskriterien im Vertrag unterzubringen, die nicht im unmittelbaren Zusammenhang mit dem erworbenen Produkt stehen. Die Ausführungsbedingungen müssen allerdings bereits in den Vergabeunterlagen kenntlich gemacht werden.

Folgende Nachhaltigkeitsaspekte können für die Auftragsausführung im Vertrag berücksichtigt werden:

- Zahlung des gesetzlichen Mindestlohnes oder höhere Entlohnung
- Einhaltung der ILO-Kernarbeitsnormen entlang der Zulieferkette
- Kriterien des Fairen Handels
- Beibehaltung von vorhandenen Gütezeichen
- Anforderungen hinsichtlich der Einstellung von Langzeitarbeitslosen oder benachteiligten Bevölkerungsgruppen sowie Durchführung von Weiterbildungsmaßnahmen

3.1.8 Vertragsmanagement und –monitoring

Unter Vertragsmanagement und -monitoring werden Maßnahmen wie Überwachung, Steuerung und Dokumentation der vergebenen Aufträge über den gesamten Auftragszeitraum hinweg sowie die Planung von Vertragsverlängerungen und Anschlussverträgen verstanden. Dabei können folgende Hilfsmittel angewandt werden:

- Stichproben und zufällige Kontrollen der Produktionsstätten durch den Beschaffenden selbst oder andere Mitarbeiter*innen des öffentlichen Auftraggebers,
- Regelmäßige Überprüfung der Sozial- und Umweltvoraussetzungen durch externe Gutachter*innen,

- Fragenkatalog zur Verlaufskontrolle und Dokumentation der Produktion,
- Regelmäßiges Berichtswesen zu den Sozial- und Umweltstandards durch die Anbietenden,
- Evaluation der Ergebnisse von Dienstleistungen (z.B. Müllproduktion bei Gartenbaudienstleistungen),
- Überprüfung der Leistungsparameter für Lebenszykluskosten.

Somit stellen diese Schritte eine dauerhafte Qualität und Konformität mit der Leistungsbeschreibung und dem Vertragswerk sicher.

Ausschreibungen dienen der Vergabe von Verträgen für den Bezug von Waren oder Dienstleistungen. Seit 2014 lässt das Vergaberecht „*weitgehend die Berücksichtigung von Nachhaltigkeitsaspekten zu*“ (Ludin, Daniela und Wellbrock. Wanja 2019). Nachhaltige Beschaffungsvorgaben haben den Einzug in die Verwaltungsvorschriften zur Beschaffung der Bundesländer gefunden. Auch in den Grundsätzen der Beschaffung der Verwaltungsvorschrift (VwV) Beschaffung des Landes Baden-Württemberg vom 24. Juli 2018 wurde der Punkt „*Berücksichtigung nachhaltiger Ziele bei der Beschaffung*“ aufgeführt. (VwV Beschaffung 2018). Hierdurch wird ermöglicht, dass in Ausschreibungen verstärkt Green IT-Aspekte wie Energieeffizienz, Ressourceneffizienz und Recyclingfähigkeit berücksichtigt werden können.

Je nachdem, welche Höhe der Auftragswert einer Ausschreibung hat, sind unterschiedliche Regelungen maßgeblich. Die Rede ist von Vergaben im Unter- und Oberschwellenbereich.

Grundlage für das deutsche Vergaberecht ist die europäische Vergaberichtlinie (2014/24/EU). Diese Richtlinie wurde durch das Gesetz gegen Wettbewerbsbeschränkungen (GWB) und die Vergabeverordnung (VgV) in deutsches Recht umgesetzt. Neben dem GWB und VgV sind weitere Vorschriften zu beachten:

- die Vergabe- und Vertragsordnungen für Leistungen (VOL),
- die Sektorenverordnung (SektVO),
- die Konzessionsvergabeverordnung (KonzVgV),
- die Vergabeverordnung Verteidigung und Sicherheit (VSVgV) sowie
- die Unterschwellenvergabeordnung (UVgO).

Das „*Agreement on Government Procurement*“ (GPA) dient auch der Öffnung der Beschaffungsmärkte. Das Übereinkommen ist ein völkerrechtlicher Vertrag, den die EU mit anderen Mitgliedstaaten der Welthandelsorganisation (WTO) abgeschlossen hat. Ziel ist einen diskriminierungsfreien und transparenten Wettbewerb im öffentlichen Vergabewesen auf internationaler Ebene zu erschaffen. Diese völkerrechtlichen Vorgaben sind in den EU-Vergaberichtlinien zu finden. Insbesondere die Schwellenwerte der Richtlinien orientieren sich an den in diesem Abkommen festgelegten Schwellenwerten auf Grundlage von den Sonderziehungsrechten.

„Vorrangiges Ziel des Vergaberechts ist es, durch die wirtschaftliche und sparsame Verwendung von Haushaltsmitteln den Beschaffungsbedarf der öffentlichen Hand zu decken. Durch die Gebote der Gleichbehandlung, Nichtdiskriminierung und Transparenz soll es einen fairen Wettbewerb zwischen den bietenden Unternehmen sicherstellen und Korruption und Vetternwirtschaft wirksam verhindern. Durch die Einbeziehung von nachhaltigen, insbesondere umweltbezogenen, sozialen und innovativen Kriterien kann die Vergabe öffentlicher Aufträge auch der Verwirklichung strategischer Politikziele dienen“ (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie 2020).

Das geltende Vergaberecht bietet öffentlichen Auftraggebern viele Möglichkeiten, strategische und nachhaltige Aspekte im Vergabeverfahren zu berücksichtigen. Diese müssen mit dem Auftragsgegenstand in Verbindung stehen. Damit können Leistungen beschafft werden, die umweltbezogene, soziale und innovative Belange in besonderer Weise berücksichtigen (Gesetz gegen Wettbewerbsbeschränkungen; § 97 Abs. 3 GWB 2016 u. Unterschwellenvergabeordnung, § 2 Abs. 3 UVgO 2021).

Der öffentliche Auftraggeber darf Aufträge für Produkte und Dienstleistungen nur im Rahmen eines Vergabeverfahrens vergeben. Hierdurch soll gewährleistet werden,

- dass Mittel sparsam verwendet und
- Korruption sowie Vetternwirtschaft bekämpft werden;
- dass alle Unternehmen einen fairen und diskriminierungsfreien Zugang zu staatlichen Beschaffungsmärkten haben und
- dass innerhalb der EU Auftragnehmer auch Zugang zu staatlichen Aufträgen der anderen Mitgliedstaaten erhalten.

Durch die EU-Vergaberichtlinien wird unterschieden, ob die Vergabe oberhalb oder unterhalb der EU-Schwellenwerte erfolgen soll. Die EU-Kommission gibt für Aufträge im Oberschwellenbereich Standardformulare vor. Diese Aufträge müssen europaweit bekannt gemacht werden.

Ab dem 01. Januar 2020 gelten folgende EU-Schwellenwerte:

- für Liefer- und Dienstleistungsaufträge im Bereich der sog. „klassischen“ öffentlichen Auftraggeber liegt die Grenze bei 214.000 €¹,
- im Bereich der Sektorenauftraggeber² bei 428.000 €¹
- für oberste, obere Bundesbehörden und vergleichbare Einrichtungen bei 139.000 €¹
- für verteidigungs- und sicherheitsrelevante Verteidigungs- und Dienstleistungsaufträge bei 428.000 €¹

In der Vergabe- und Vertragsordnung für Leistungen (VOL) werden Ausschreibungen und die Vergabe von Aufträgen der öffentlichen Hand geregelt. Hierin werden die verschiedenen Vergabearten beschrieben.

Die öffentliche Ausschreibung wird bei Vergaben oberhalb der EU-Schwelle als offenes Verfahren bezeichnet. Die Beschaffungsabsicht muss hierbei öffentlich bekannt gemacht werden und jeder Interessierte kann ein Angebot abgeben. Wenn besondere Gründe vorliegen, kann vom öffentlichen Auftraggeber ein anderes Verfahren gewählt werden: das Verfahren der beschränkten Ausschreibung. Hierbei wird von Anfang an nur ein beschränkter Kreis von Unternehmen dazu aufgefordert, ein Angebot abzugeben. Bei Vergaben oberhalb der EU-Schwelle wird dieses Verfahren auch als nichtoffenes Verfahren bezeichnet (Deutsches Ausschreibungsblatt GmbH 2019).

Ein weiteres Verfahren ist das der freihändigen Vergabe. Sie ist unter anderem dann zulässig, wenn nach Aufhebung einer öffentlichen oder beschränkten Ausschreibung eine Wiederholung kein wirtschaftliches Ergebnis verspricht oder im Anschluss an Entwicklungsleistungen Aufträge in angemessenem Umfang und für angemessene Zeit an Unternehmen, die an der Entwicklung beteiligt waren, vergeben werden müssen. Weitere Gründe für die Zulässigkeit der freihändigen Vergabe sind in der Vergabe- und Vertragsordnung für Leistungen aufgeführt (§ 3 Abs. 5 VOL/A, Arten der Vergabe 2009).

In den meisten Bundesländern müssen Sie sich bei Vergaben im *Unterschwellenbereich* nach der Unterschwellenvergabeordnung (UVgO) richten. In einigen Bundesländern ist noch die VOL/A 1. Abschnitt maßgeblich. In diesem Zusammenhang müssen sie die haushaltsrechtlichen Bestimmungen der einzelnen Landesgesetze beachten (Kompass Nachhaltigkeit 2023c).

Eine nachhaltige Beschaffung ist im Rahmen der Betrachtung des Lebenswegs der Produkte und Dienstleistungen wichtig. Das Umweltmanagementsystem EMAS (Eco Management and Audit Scheme) legte in seiner Verordnung (Europäische Kommission, EMAS, Verordnung (EG) Nr.1221/2009) eine

¹ ohne Umsatzsteuer (USt.)

² Sektorenauftraggeber: Auftraggeber, die auf dem Gebiet der Trinkwasser-, Energieversorgung oder des Verkehrs tätig sind (zum Beispiel kommunale Versorgungswirtschaft).

der wichtigsten Forderungen fest, produktlebenszyklusbezogene Aspekte im Rahmen der Bewertung der indirekten Umweltaspekte zu betrachten (Europäische Kommission, EMAS 2017). Organisationen müssen demzufolge die Abschnitte des Lebenswegs (Abbildung 16: Stufen des Lebenswegs von Produkten und Dienstleistungen) sorgfältig prüfen, auf die sie direkt oder indirekt Einfluss nehmen können.

Hinsichtlich von Nachhaltigkeitsaspekten ist es möglich im Bereich des HPCs, vor allem bei der Beschaffung und Auftragsvergabe sowie der Nutzung einen gewissen Einfluss zu nehmen. Im Bereich der Nachhaltigkeit entlang der Lieferkette besteht im IT-Bereich noch großes Entwicklungspotential.

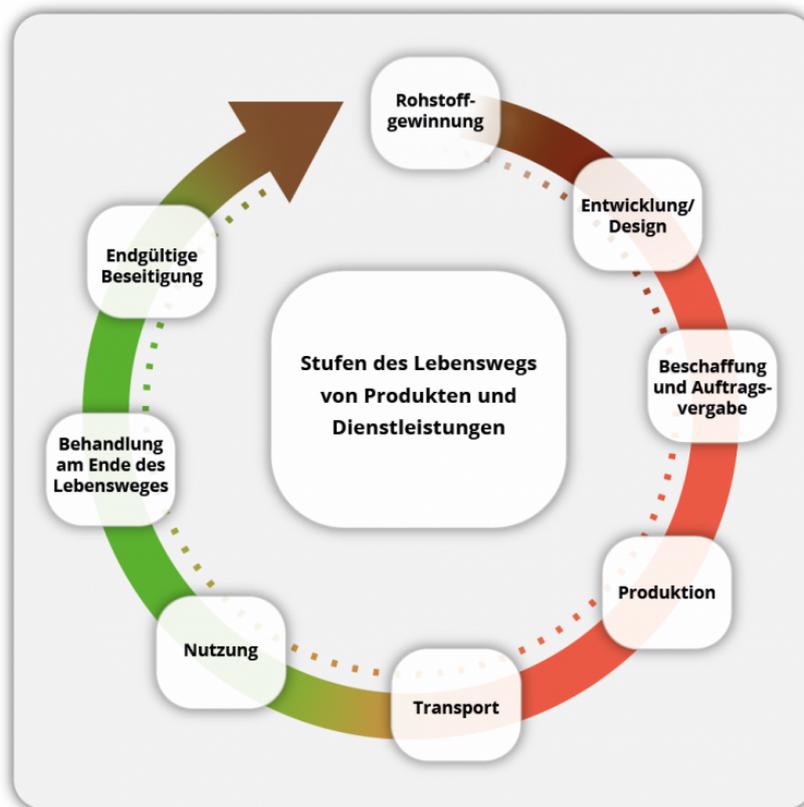


Abbildung 16: Stufen des Lebenswegs von Produkten und Dienstleistungen

Bei der Beschaffung von IT-Geräten und IT-Dienstleistungen ist es wichtig, neben dem Umweltschutz auch die sozialen Aspekte zu betrachten und bei der Auftragsvergabe die Einhaltung der ILO-Kernarbeitsnormen zu berücksichtigen.

Die Internationale Arbeitsorganisation International Labour Organization (ILO) wurde 1919 gegründet und ist eine Sonderorganisation der Vereinten Nationen. Sie ist damit beauftragt, soziale Gerechtigkeit sowie Menschen- und Arbeitsrechte zu fördern. Sie entwickelt zusammen mit ihren 187 Mitgliedsstaaten (darunter auch Deutschland) und ihren Sozialpartnern internationale Mindestarbeitsstandards. Dazu arbeitet sie rechtsverbindliche Übereinkommen (Konventionen) sowie Empfehlungen an ihre Mitgliedsstaaten aus (ILO 2021a; ILO 2021b). Insgesamt hat die ILO seit ihrem hundertjährigen Bestehen fast 200 solcher Übereinkommen ausgearbeitet. Als völkerrechtlich bindende Verträge haben die ILO-Normen unmittelbare Verbindlichkeit für die Staaten, sobald diese die Normen ratifiziert haben. Die Ratifikation ist jedoch freiwillig. Das bedeutet, dass kein Mitgliedsstaat zur Ratifikation der Übereinkommen gezwungen werden kann und damit auch die ILO-Arbeitsnormen nicht rechtsverbindlich einhalten muss (ILO 2021c). So hat beispielsweise Deutschland nicht alle ILO-Übereinkommen ratifiziert und dies oft damit begründet, dass die geforderten Normen sich schon in nationalem Recht widerspiegeln oder sogar übertroffen werden (ILO 2021d). Anders sieht dies bei den acht sogenannten

„Kernarbeitsnormen“ aus (siehe Abb. 17). In der ILO-Erklärung aus dem Jahr 1998 über grundlegende Rechte bei der Arbeit wurden diese acht ILO-Übereinkommen politisch aufgewertet. Sie besitzen den Status als Menschenrechte und haben daher für alle 187 Mitgliedsstaaten universelle Gültigkeit, unabhängig davon ob sie ratifiziert wurden oder nicht (ILO 2021c).

Länder, welche die ILO-Kernarbeitsnormen nicht ratifiziert haben, müssen sich einer regelmäßigen Untersuchung unterziehen und werden aufgefordert zu erklären, warum eine Ratifizierung nicht möglich ist und wie die Norm trotzdem eingehalten werden können (ILO 2021e). Bisher haben insgesamt 146 Mitgliedsstaaten, darunter auch Deutschland, alle 8 Kernarbeitsnormen ratifiziert. China hat nur 4 von 8 Kernarbeitsnormen ratifiziert, nämlich die Übereinkommen zur Diskriminierung und zur Kinderarbeit. Die USA schneidet mit der Ratifizierung von 2 von 8 Kernarbeitsnormen noch schlechter ab (ILO 2021f). Das im Jahr 1999 verabschiedete Übereinkommen zur Kinderarbeit (Ü 182) haben allerdings alle 187 Mitgliedsstaaten ratifiziert (ILO 2021b).

Durch international verbindliche Arbeits- und Sozialnormen sollen die Rechte der Arbeitnehmenden weiterentwickelt, menschenwürdige Arbeit gefördert, der Sozialschutz verbessert und Arbeitsbeziehungen gestärkt werden. Dies sind laut ILO zentrale Voraussetzungen für die Beseitigung von Armut.

Die ILO formulierte acht Kernarbeitsnormen, zu denen sich seit 1998 durchschnittlich alle 175 Mitgliedsstaaten (ILO 2021f) bekennen:

ILO Kernarbeitsnorm	
Übereinkommen 87	Vereinigungsfreiheit und Schutz des Vereinigungsrechtes (1948)
Übereinkommen 98	Vereinigungsrecht und Recht zu Kollektivverhandlungen (1949)
Übereinkommen 29	Zwangsarbeit (1930) und Protokoll von 2014 zum Übereinkommen zur Zwangsarbeit
Übereinkommen 105	Abschaffung der Zwangsarbeit (1957)
Übereinkommen 100	Gleichheit des Entgelts (1951)
Übereinkommen III	Diskriminierung in Beschäftigung und Beruf (1958)
Übereinkommen 138	Mindestalter (1973)
Übereinkommen 182	Verbot und unverzügliche Maßnahmen zur Beseitigung der schlimmsten Formen der Kinderarbeit (1999)

Tabelle 28: Die acht ILO-Kernarbeitsnormen

Weitere ILO-Abkommen zielen auf die Sicherheit und Gesundheit am Arbeitsplatz (Nr. 155) und die Rechte indigener Völker (Nr. 169) ab.

Inzwischen gibt es im Bereich der Informations- und Kommunikationstechnik verschiedene Gütezeichen mit unterschiedlichen Ansprüchen, die neben Umwelt- und Energiestandards auch Arbeits- und Menschenrechte berücksichtigen. Die Gewinnung von Rohstoffen, z.B. aus Konfliktgebieten, wird ebenfalls hinterfragt.

Mittels Gütezeichen kann der Nachweis geführt werden, dass bestimmte Umwelt- und Sozialstandards eingehalten werden. Wichtige Umweltzeichen aus diesem Bereich sind der „Blaue Engel“ des Bundesumweltministeriums, „TCO-certified“ des Dachverbands der schwedischen Angestelltengewerkschaften sowie der „Energy Star“ der amerikanischen Umweltbehörde EPA (Ministerium für Umwelt 2017).

Weitere bekannte Siegel sind das EPEAT-Siegel sowie das EU-Eco-Label.



Abbildung 17: Umweltzeichen in den Bereichen der Informations- und Kommunikationstechnik (Kompass Lieferkettenmanagement Teil 1 2021)

Die Kriterien der Gütezeichen werden regelmäßig weiterentwickelt. Auf der Internetseite zur Siegelklarheit des Bundesministeriums für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung gibt es Möglichkeit Siegel in Bezug auf Glaubwürdigkeit, Umweltfreundlichkeit und Sozialverträglichkeit zu vergleichen (Siegelklarheit 2023).

Seit der letzten Aktualisierung der Vergaberechtsreform ist es möglich einen Nachweis durch Gütezeichen ist für alle Wertungsstufen (Leistungsmerkmale, Zuschlagskriterien, Auftragsausführungsbestimmungen) im Ober- und Unterschwellenbereich über die §§ 34, 58 Abs. 4 und 61 VgV und § 24, 43 Abs. 7 und 45 Abs. 3 zu führen (Kompetenzstelle für nachhaltige Beschaffung 2023).

Detaillierte Informationen und Arbeitshilfen rund um die nachhaltige Beschaffung sind unter den folgenden Quellen zu finden:

- Beschaffungsamt des BMI,
- Zentrale Stelle für IT-Beschaffung,
- Kompetenzstelle für nachhaltige Beschaffung,
- Umwelt Bundesamt,
- Kompass Nachhaltigkeit,
- Rat für nachhaltige Entwicklung.

Im Rahmen des vorherigen internen Projekts zu Lieferkettenmanagement am HLRS wurden ein paar wichtige Dokumente entworfen. Eins der Dokumente, ist der *Kompass Lieferkettenmanagement „Nachhaltige Beschaffung“*. Für die Beschaffung von Hoch- und Höchstleistungsrechnern wurden zuerst Nachhaltigkeitskriterien ausgearbeitet, welche in Mustertexte für die Leistungsbeschreibung der Ausschreibung formuliert wurden.

HPC-Cluster werden in der Regel individuell konfiguriert. Aus dem Grund sind klare Überlegungen notwendig, was genau benötigt oder gewollt wird. Dabei spielen die nötige Rechenleistung und die Datenmengen die wichtigste Rolle. Auch das Wachstum dieser Größen während der geplanten Lebensdauer sollte nicht vergessen werden. Diese Werte sollten quantitativ festgehalten werden, beispielsweise als Entwurf der Leistungsbeschreibung. Der nächste Schritt wäre es sich nach möglichen Anbietern umschauen und mit mehreren Anbietern – gegebenenfalls mit allen – Vorgespräche führen. In diesen Sizing-Dialogen wird in Erfahrung gebracht, was die Anbieter liefern können. Die Ergebnisse dieser Vorgespräche müssen geheim gehalten werden. Danach wird empfohlen die Leistungsbeschreibung, in der die zu beschaffende Leistung mit einem Kriterienkatalog charakterisiert wird, zu erstellen. In diese Beschreibung sollten auch Nachhaltigkeitskriterien aufgenommen werden (Kompass Lieferkettenmanagement Teil 1 2021).

Nr.	Frage zur Nachhaltigkeit	ja/ nein
1	Hat Ihr Unternehmen/Rechenzentrum strategische Ziele für die nachhaltige Beschaffung von IT-Geräten bzw. HPC-Cluster formuliert?	
2	Gibt es in Ihrem Unternehmen ein Nachhaltigkeits- oder Umweltprogramm, in dem Ziele und Maßnahmen für die nachhaltige Beschaffung von IT-Geräten bzw. HPC-Clustern formuliert wurden? (z.B. im Rahmen eines Umweltmanagementsystems)	
3	Bewerten Sie regelmäßig Ihre Lieferanten nach transparenten Nachhaltigkeitskriterien? (z.B. Lieferant hat Umweltzertifizierungen, veröffentlicht regelmäßig Nachhaltigkeitsberichte)	
4	Haben Sie Mindestkriterien bzw. Soll-Kriterien für IT-Geräte bzw. HPC-Cluster festgelegt, die bei der Auswahl der Produkte in die Bewertung einfließen? (z.B. Energieeffizienz, Umweltsiegel oder Einhaltung von ILO-Kernarbeitsnormen)	
5	Wird auf gefährliche Materialien über die ROHS-Richtlinie ³ hinaus verzichtet?	
6	Gibt es Vereinbarungen mit Ihrem Lieferanten bezüglich der Rücknahme der IT-Geräte bzw. HPC-Cluster nach Ende der Lebensdauer?	
7	Haben Sie einen Verhaltenskodex (Code of Conduct) in Bezug auf Nachhaltigkeitskriterien an die Sie sich als Unternehmen halten?	
8	Haben Sie einen Verhaltenskodex (Code of Conduct) für Ihre Lieferanten?	
9	Für die Beschaffung von HPC-Clustern: Wird die Höhe der Rücklauftemperatur des Kühlsystems abgefragt, damit die Abwärme möglichst z.B. als Wärmeenergie genutzt werden kann?	
10	Werden die IT-Geräte bzw. wird das HPC-Cluster umweltfreundlich geliefert? (z.B. effiziente Streckenführung, geringe CO ₂ -Emissionen, wiederverwendbares Transportverpackungsmaterial wie Holzkisten)	
11	Falls das Verpackungsmaterial nicht wiederverwendbar ist: Ist die Verpackung umweltfreundlich, kann sie dem Wertstoffkreislauf wiederzugeführt werden, werden die Verpackungen durch den Zulieferer zurückgenommen?	

Tabelle 29: Fragen zur nachhaltigen Beschaffung von IT-Geräten bzw. HPC-Clustern (Kompass Lieferkettenmanagement Teil 1 2021)

In dieser Tabelle ist eine beispielhafte Liste mit möglichen Kriterien und Fragen zu Ihren Beschaffungsprozessen zu finden, den Produkten und Lieferanten bezüglich Nachhaltigkeit. Beschaffungskriterien können als Mindestkriterien und Soll-Kriterien formuliert werden.

Wenn es sich um einen öffentlichen Beschaffungsprozess handelt, müssen Sie beachten, dass nach dem Vergaberecht die Kriterien, wie beispielsweise Qualität, Preis, technischer Wert, Umwelteigenschaften, Betriebskosten und Lebenszykluskosten durch den Auftragsgegenstand gerechtfertigt sein müssen (Vergabe- und Vertragsordnung für Leistungen Teil A § 19 Abs. 9 EG 2009).

³ Richtlinie zur Beschränkung der Verwendung bestimmter gefährlicher Stoffe in Elektro- und Elektronikgeräten (wie z.B. Blei, Cadmium, Polybromierte Biphenyle).

Zudem müssen Sie die Beschaffungsvorgaben Ihres Unternehmens oder Rechenzentrums beachten.

Die *Mustertexte* umfassen technische Anforderungen an das ausgeschriebene Produkt sowie soziale und ökologische Anforderungen an das bietende Unternehmen sowie dessen Lieferkettenmanagement. Die technischen Anforderungen sind dabei als Mindestanforderungen zu betrachten, da bei Hoch- und Höchstleistungsrechnern der technische Stand und die technische Performance von zentraler Bedeutung sind.

Die technischen Anforderungen wurden aus bereits durchgeführten Ausschreibungen entnommen und mit den Anforderungen an Server, externe Speichersysteme und aktive Netzkomponenten des „Blauen Engel Effizienter Rechenzentrumsbetrieb DE-UZ 161“ erweitert.

Die sozialen und ökologischen Anforderungen wurden hauptsächlich durch umfassende Literaturrecherche erarbeitet. Eine erst im letzten Jahr erschienene Studie im Rahmen des europäischen „Make ICT Fair“ Projekts (ICLEI Europe 2020) wurde als zentrales Dokument für die Erarbeitung der sozialen Mustertexte herangezogen. Die Ergebnisse der Studie sind eine Reihe von Ausschluss- und Bewertungskriterien, die öffentliche Beschaffer bei der fairen und sozialen Beschaffung von IKTHardware unterstützen sollen. Diese Kriterien sind in die Mustertexte für das HLRS eingeflossen.

Die Ausarbeitung der ökologischen Nachhaltigkeitskriterien basiert vor allem auf den aktuellen Umwelt- und Nachhaltigkeitsberichten von vier großen Elektronikherstellern, welche ebenfalls Lieferanten des HLRS sind. Aus den Informationen der Umwelt- und Nachhaltigkeitsberichte wurden die entsprechenden ökologischen Kriterien herausgearbeitet (Kompass Lieferkettenmanagement Teil 1 2021).

Es ist wichtig zu erwähnen, dass gesetzliche Anforderungen an die Elektronikhersteller, wie beispielsweise durch die RoHS Verordnung oder durch das europäische Abfallverbringungsgesetz, explizit nicht in die Nachhaltigkeitskriterien eingeflossen sind. Grund dafür ist, dass Unternehmen sich ohnehin an die gesetzlichen Vorgaben halten müssen und diese nicht extra in den Mustertexten⁴ abgefragt werden müssen (in diesem Fall wäre die einzig richtige Antwort auf alle gesetzlichen Anforderungen „ja“). Stattdessen kann die Einhaltung der gesetzlichen Anforderungen in einer Eigenerklärung abgefragt werden, wie beispielsweise die fachgerechte Entsorgung von Elektronikaltgeräten in einem OECD-Mitgliedsstaat nach der europäischen Abfallverbringungsverordnung.⁵

Der Auftrag und damit die Existenzberechtigung des HLRS ist, Supercomputer der internationalen Spitzenklasse für Wissenschaft und Industrie bereitzustellen. Große und schnelle Rechner brauchen viel Strom. Doppelt so schnell – doppelt so großer Stromverbrauch. Unter diesen Bedingungen findet das HLRS zwischen technischen Anforderungen und Nachhaltigkeit die Balance in einem doppelten Ansatz: Zum einen schon bei der Auswahl jedes Rechners auf die höchstmögliche Effizienz zu achten, zum anderen den Betrieb des Rechners und der zugehörigen Infrastruktur so effizient wie irgend möglich zu gestalten. Dass das Rechenzentrum damit erfolgreich ist, zeigen unter anderem seine Zertifizierung nach EMAS und der Blaue Engel für energieeffizienten Rechenzentrumsbetrieb.⁶

3.2 Arbeitspaket 2.2 – Lieferketten beispielhafter Hardwarekomponenten HPC

Das HLRS stellt sich seiner gesellschaftlichen Verantwortung in der Lieferkette seiner eingekauften IKT-Hardware und möchte sich dem Thema des nachhaltigen Lieferkettenmanagements widmen. Dabei

⁴ Tabelle im Anhang #1 zeigt einen Auszug aus den ausgearbeiteten Mustertexten für die nachhaltige Beschaffung von IKT-Hardware am HLRS, Kompass Lieferkettenmanagement „Nachhaltige Beschaffung“, 2021.

⁵ Übersicht über die relevanten Gesetze für Elektronikhersteller befindet sich im Anhang #2 „Relevante Gesetze für die Elektronikunternehmen“, Kompass Lieferkettenmanagement Teil 1 „Nachhaltige Beschaffung“, 2021.

⁶ Interview mit Dr. Norbert Conrad, Vorstandsmitglied HLRS.

versteht das HLRS unter nachhaltigem Lieferkettenmanagement, „[...] dass Unternehmen ihrer sozialen und ökologischen Sorgfaltspflicht entlang der gesamten Lieferkette nachkommen (CSR-Politik 2023).“

Der Code of Conduct für Lieferanten ist das nächste Dokument, was im Rahmen des internen Lieferkettenmanagement Projekts ausarbeitet wurde. Das HLRS bekennt sich ausdrücklich zu den zehn Prinzipien des Global Compact der Vereinten Nationen. Damit unterstützt das HLRS die grundlegenden Prinzipien in den Bereichen Menschenrechte, Arbeitsnormen und Umweltschutzstandards sowie die Anwendung hoher ethischer und moralischer Geschäftsstandards. Auch bei seinen Mitarbeitenden setzt das HLRS voraus, dass die Grundsätze ökologischen, sozialen und ethischen Verhaltens beachtet und in die Unternehmenskultur integriert werden. Das Rechenzentrum bestrebt, laufend sein Handeln und seine Dienstleistungen im Sinne der Nachhaltigkeit zu optimieren und erwartet von seinen Lieferanten (einschließlich ihrer Organe, Mitarbeitenden, Repräsentant*innen, Subunternehmer und Vertriebspartner), alle anwendbaren inländischen und ausländischen Rechtsvorschriften einzuhalten.

Die in diesem Code of Conduct formulierten Grundsätze bilden einen wichtigen Bestandteil der Lieferantenauswahl und -bewertung. Lieferanten müssen die zum Nachweis der Konformität mit dem Code of Conduct erforderliche Dokumentation führen. Das HLRS hat bei begründeten Zweifeln, dass der Code of Conduct nicht eingehalten wird, das Recht jederzeit aktuelle Unterlagen zur Glaubhaftmachung vom Lieferanten anzufordern. Zudem erwartet das HLRS von seinen Lieferanten, dass sie diese Standards auch in der vorgeschalteten Lieferkette umsetzen (HLRS 2021).

Das Sorgfaltspflichtengesetz, auch als Lieferkettengesetz bekannt, soll der Verbesserung der internationalen Menschenrechtslage dienen, indem es Anforderungen an ein verantwortliches Management von Lieferketten für bestimmte Unternehmen festlegt. Unternehmen erhalten einen klaren, verhältnismäßigen und zumutbaren gesetzlichen Rahmen zur Erfüllung der menschenrechtlichen Sorgfaltspflichten. Die Anforderungen sind international anschlussfähig und orientieren sich am Sorgfaltsstandard ("due diligence standard") der VN-Leitprinzipien, auf dem der Nationale Aktionsplan (Auswärtiges Amt im Namen des Interministeriellen Ausschusses Wirtschaft und Menschenrechte 2017) basiert.

Am 11. Juni 2021 wurde das Lieferkettengesetz vom Bundestag verabschiedet und somit nimmt das Gesetz große Unternehmen für Zustände bei ihren weltweiten Zulieferern stärker als bisher in die Pflicht. Die deutsche Wirtschaft sowie die deutsche Bevölkerung profitieren davon, dass Menschen weltweit unter verheerenden Bedingungen zu geringen Löhnen arbeiten. Und dass, obwohl schon vor über 70 Jahren mit der Allgemeinen Erklärung der Menschenrechte der UN-Vollversammlung im Jahr 1948 der Grundstein für Menschenrechte gelegt wurde. Darin heißt es in Artikel 1: „Alle Menschen sind frei und gleich an Würde und Rechten geboren“. Artikel 23 sichert jedem Arbeitenden ein Recht auf faire und befriedigende Entlohnung zu.

Einige Jahre später formulierte die UN im Jahr 1989 mit der Kinderrechtskonvention das Recht von Kindern auf Schutz vor Ausbeutung. Zehn Jahre später im Jahr 1999 ratifizierten 182 Staaten weltweit die verbindlichen ILO-Kernarbeitsnormen zum internationalen Schutz von Kindern. Im Juni 2011 definierte die UN Leitprinzipien für Wirtschaft und Menschenrechte (UNLP), mit denen die Verletzung von Menschenrechten durch Wirtschaftsunternehmen verhindert werden sollen. Kurz darauf verpflichteten sich die UN-Mitgliedsstaaten im Jahr 2015 im Rahmen der UN-Agenda 2030 zur Abschaffung von Kinder- und Zwangsarbeit (Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung 2020). Die Vorgaben in der Agenda 2030 gelten jedoch eher als Leitlinien als ein verbindliches Übereinkommen:

„Die im September 2015 verabschiedete Agenda 2030 und die Ziele für nachhaltige Entwicklung (SDGs) sind rechtlich nicht verbindlich, ihre Umsetzung soll jedoch überprüft werden. Dafür sollen freiwillige Verfahren sorgen (Beisheim 2015).“

Im Jahr 2016 verabschiedete die deutsche Bundesregierung den Nationalen Aktionsplan Wirtschaft (NAP) zur Umsetzung der UNLP von 2011. Im Rahmen des NAP wurde in den Jahren 2016 bis 2020 untersucht, wie stark sich deutsche Unternehmen auf freiwilliger Basis für die Einhaltung von Menschenrechten und Umweltschutz in ihren Lieferketten einsetzen. Nur ungefähr 400 von mehr als 2.000

angeschriebenen Firmen haben an der Umfrage teilgenommen. Das Ergebnis des Monitorings, welches im Oktober 2020 vorgestellt wurde, ergab, dass nur jedes fünfte Unternehmen die NAP-Anforderungen zur Erfüllung der Sorgfaltspflicht in der Lieferkette erfüllt. Damit wurde der von der Bundesregierung gesetzte Zielwert von mindestens 50 Prozent „NAP-Erfüllern“ verfehlt. Dies zeigt, dass eine freiwillige Einhaltung der Sorgfaltspflicht in Unternehmen nicht ausreicht und ein gesetzlicher Rahmen notwendig ist (Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung 2020).

Bundesentwicklungsminister Gerd Müller betonte bei der Vorstellung der Umfrageergebnisse zur Umsetzung des NAPs: *„Die Ausbeutung von Mensch und Natur sowie Kinderarbeit darf nicht zur Grundlage einer globalen Wirtschaft und unseres Wohlstandes werden (Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung 2017).“*

Im NAP sowie im Koalitionsvertrag wurde vereinbart, dass eine gesetzliche Regelung auf den Weg gebracht werden soll, wenn die freiwillige Selbstverpflichtung der Unternehmen nicht ausreicht: *„Falls die wirksame und umfassende Überprüfung des NAP 2020 zu dem Ergebnis kommt, dass die freiwillige Selbstverpflichtung der Unternehmen nicht ausreicht, werden wir national gesetzlich tätig und uns für eine EU-weite Regelung einsetzen (Bundesregierung 2018).“*

Ein solches Instrument ist das am 11. Juni 2021 verabschiedete Lieferkettengesetz, das nach Abschluss des parlamentarischen Verfahrens am 22. Juli 2021 im Bundesgesetzblatt (Bundesgesetzblatt 2021) veröffentlicht wurde und am 1. Januar 2023 in Kraft getreten ist.

- Das Lieferkettensorgfaltspflichtengesetz (LkSG) verpflichtet Unternehmen mit Hauptverwaltung, Hauptniederlassung, Verwaltungssitz, satzungsmäßigem Sitz oder Zweigniederlassung in Deutschland zur Achtung von Menschenrechten durch die Umsetzung definierter Sorgfaltspflichten.
- Die Sorgfaltspflichten beziehen sich auf den eigenen Geschäftsbereich, auf das Handeln eines Vertragspartners und das Handeln weiterer (mittelbarer) Zulieferer. Damit besteht die Verantwortung der Unternehmen entlang der gesamten Lieferkette.
- Ab 1. Januar 2023 gilt es für Unternehmen mit mehr als 3.000 Mitarbeitende – das betrifft rund 900 Unternehmen in Deutschland. Ab 1. Januar 2024 für Unternehmen mit mehr als 1.000 Mitarbeitende – das betrifft rund 4.800 Unternehmen in Deutschland.
- Das Lieferkettengesetz enthält einen abschließenden Katalog von elf international anerkannten Menschenrechtsübereinkommen. Aus den dort geschützten Rechtsgütern werden Verhaltensvorgaben bzw. Verbote für unternehmerisches Handeln abgeleitet, um eine Verletzung geschützter Rechtspositionen zu verhindern. Dazu zählen insbesondere die Verbote von Kinderarbeit, Sklaverei und Zwangsarbeit, die Missachtung des Arbeits- und Gesundheitsschutzes, die Vorenthaltung eines angemessenen Lohns, die Missachtung des Rechts, Gewerkschaften bzw. Mitarbeitervertretungen zu bilden, die Verwehrung des Zugangs zu Nahrung und Wasser sowie der widerrechtliche Entzug von Land und Lebensgrundlagen.
- Kommen Unternehmen ihren gesetzlichen Pflichten nicht nach, können Bußgelder verhängt werden. Diese können bis zu 8 Millionen Euro oder bis zu 2 Prozent des weltweiten Jahresumsatzes betragen. Der umsatzbezogene Bußgeldrahmen gilt nur für Unternehmen mit mehr als 400 Millionen Euro Jahresumsatz. Außerdem ist es bei einem verhängten Bußgeld ab einer bestimmten Mindesthöhe möglich, von der Vergabe öffentlicher Aufträge ausgeschlossen zu werden.
- Seit dem 1. Januar 2023 liegt die Prüfung der Einhaltung und Überwachung des LkSG im Zuständigkeitsbereich des Bundesamtes für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA) in seiner neuen Außenstelle in Borna. Für die Überwachung des Lieferkettenmanagements der Unternehmen ist die Behörde mit effektiven Durchsetzungsinstrumenten ausgestattet. So hat das BAFA weitgehende Kontrollbefugnisse. Das Gesetz begründet eine Bemühenspflicht, aber weder eine Erfolgspflicht noch eine Garantiehaftung. Das Sorgfaltspflichtengesetz soll an einer

künftigen europäischen Regelung angepasst werden mit dem Ziel, Wettbewerbsnachteile für deutsche Unternehmen zu verhindern (CSR Wirtschaft und Menschenrechte 2023a).

- Um die Unternehmen bei der Umsetzung ihrer Sorgfaltspflichten zu unterstützen, entwickelt und veröffentlicht das BAFA Handreichungen. Diese sind auf seiner eigenen Webseite zu finden (Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle).
- Es fordert Unternehmen auf, ein angemessenes und wirksames Risikomanagement zu etablieren, das in alle maßgeblichen Geschäftsabläufe integriert ist. Die fünf Kernelemente des Nationalen Aktionsplans Wirtschaft und Menschenrechte (NAP) bilden die Grundlage für die im Gesetz benannten Sorgfaltspflichten. Diese Sorgfaltspflichten adressieren
 - die Einrichtung eines Risikomanagements
 - die Festlegung einer betriebsinternen Zuständigkeit
 - die Durchführung regelmäßiger Risikoanalysen
 - die Abgabe einer Grundsatzerklärung
 - die Verankerung von Präventionsmaßnahmen im eigenen Geschäftsbereich, gegenüber unmittelbaren Zulieferern sowie – bei Anhaltspunkten für mögliche Verletzungen – bei mittelbaren Zulieferern
 - das Ergreifen von Abhilfemaßnahmen
 - die Einrichtung eines Beschwerdeverfahrens
 - die Dokumentation und die Berichterstattung (Auswärtiges Amt im Namen des Interministeriellen Ausschusses Wirtschaft und Menschenrechte 2017).

Die Wirkung des Gesetzes wird 2026 evaluiert. Angesichts einer möglichen EU-Gesetzgebung wird dann geprüft, ob Anpassungen notwendig sind. Dabei wird auch untersucht, ob eine Ausweitung des Anwendungsbereichs auf weitere Unternehmen vorgenommen werden soll (CSR Wirtschaft und Menschenrechte 2023b).

Im Rahmen des einjährigen Projekts „Nachhaltiges Lieferkettenmanagement am HLRS“ wurde beschlossen, die Lieferkette einer einfachen IT-Komponente zu untersuchen, nämlich eines passiven InfiniBand-Kupferkabels, und dementsprechend auch eine Anfrage bei einem beteiligten Unternehmen zu stellen. Um diese Lieferkette eingehender zu betrachten, hat die Projektlaufzeit jedoch nicht ausgereicht. Es wurde geplant, dieses Thema im Rahmen von weiteren Projekten wie dem Projekt ENRICH zu untersuchen.

Nach der kurzen Projektzeit wurde aufgrund unzureichender Informationen beschlossen von einem passiven InfiniBand-Kupferkabel auf eine SSD zu wechseln. Ein *Solid-State-Drive* oder eine *Solid-State-Disk*, kurz *SSD*, seltener auch Halbleiterlaufwerk oder Festkörperspeicher genannt, ist ein nichtflüchtiger Datenspeicher der Computertechnik (siehe Abb. 18). Die Bezeichnung *Drive* (englisch für Laufwerk) bezieht sich auf die ursprüngliche und übliche Definition für dieses Medium von Computern. Die Bauform und die elektrischen Anschlüsse können den Normen für Laufwerke mit magnetischen oder optischen Speicherplatten entsprechen, müssen dies aber nicht. Sie können beispielsweise auch als *PCIe-Steckkarte*⁷ (LACIE 2023) ausgeführt sein. Wird eine magnetische Festplatte, kurz *HDD* (Hard Disk Drive), mit einem Solid-State-Speicher zu einem Gerät kombiniert, spricht man von einer Hybridfestplatte – *HHD* (Hybrid Hard Drive) oder *SSHD* (Solid State Hybrid Drive).

⁷ Peripheral Component Interconnect oder PCI ist eine häufige Methode zum Anschließen von Zusatz-Controller-Karten und anderen Geräten an ein Computer-Motherboard.



Abbildung 18: SSD-Festplatte (iStock 2021)

Solid-State-Drives wurden im Verlauf der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts entwickelt, bis sie über Einzelanwendungen hinaus zum massenhaften Einsatz fähig wurden. Ihre Kosten waren anfangs im Verhältnis zur Speicherkapazität sehr hoch, verminderten sich aber ebenso wie die Baugrößen bei gleicher Leistung schnell entsprechend dem *Moore'schen Gesetz*⁸, so dass sie um die Jahrtausendwende für spezielle Verwendungen auch wirtschaftlich rentabel wurden. Dennoch lagen die Preise für SSDs (in Euro pro Gigabyte) im Juli 2018 noch bei einem Mehrfachen des Preises eines herkömmlichen Magnet Speicher-Laufwerks. Anfang 2021 war der Preis noch rund das Vierfache gegenüber einer handelsüblichen Festplatte gleicher Kapazität.

Die SSD-Festplatte beinhaltet das Wort *Drive* im Namen, was zur Annahme führen könnte, dass die SSD-Festplatte der HDD-Festplatte ähnlich ist. Das ist jedoch nicht der Fall. Die beiden Speichermedien unterscheiden sich stark voneinander.

SSDs haben keine beweglichen Teile (keine drehenden Scheiben und Leseköpfe) (ComputerWeekly.de 2023) und sind daher unempfindlich gegen Stöße, Erschütterungen und Vibrationen. Sie beinhalten nur noch eine Platine, einen Controller und Speicherblöcke, die beschrieben werden. Sie haben außerdem kürzere Zugriffszeiten und arbeiten geräuschlos sowie stromsparend. Im Gegensatz zu Festplatten braucht eine SSD nach dem Start keine Anlaufzeit. Sie benötigt weniger Strom und produziert weniger Abwärme. SSDs können deutlich kleiner als entsprechende Speicher mit Magnetplatten gebaut werden. Ausfälle und Fehler von SSDs sind häufig verursacht durch Mängel in der Firmware, die immer wieder unausgereift auf den Markt kommt und erst später durch Updates nachgebessert wird. SSD-Speicherzellen haben außerdem eine beschränkte Anzahl von Schreibzyklen.

⁸ Das Mooresche Gesetz (engl. Moore's law) von 1965 besagt, dass sich die Komplexität integrierter Schaltkreise mit minimalen Komponentenkosten regelmäßig verdoppelt; je nach Quelle werden 12, 18 oder 24 Monate als Zeitraum genannt.

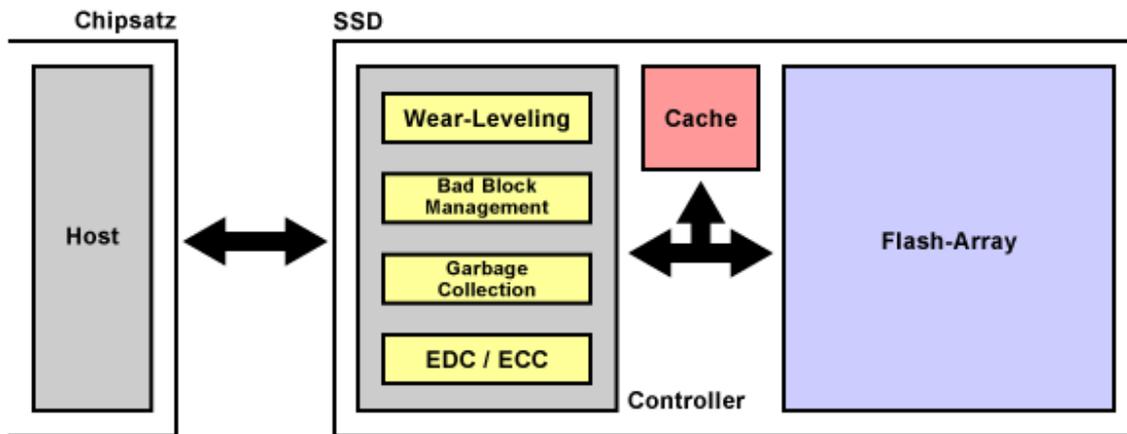


Abbildung 19: SSD-Festplatte (iStock 2021)

Die wichtigsten Bauteile einer SSD (SSD-info.NET 2013) sind die folgenden:

1. Speichereinheit (Flash-Speicher)
2. Controller (Dateiverwaltung)
3. Interface/Schnittstelle

Eine Speichereinheit besteht aus mehreren (Flash-)Speicherblöcken. Die Schreibzyklen werden bei jeder einzelnen Speicherzelle vom Counter gezählt. Beim Löschen von Daten wird genauso ein Schreibvorgang ausgeführt. Da jede Zelle nur eine gewisse Anzahl von Schreibzyklen vertragen kann, ist diese Zählung sehr wichtig. Es gibt vier Haupttypen von Speichern, die bei SSDs verwendet werden – nämlich Single-, Multi-, Triple- und Quadruple-Level Cells. Einstufige Zellen können jeweils ein Datenbit auf einmal aufnehmen – eins oder null.

Der Controller ist das wichtigste Bauteil einer SSD. Ein Flash-Laufwerk kann immer nur so gut wie der zugehörige Controller sein. Seine Aufgabe besteht darin, die Informationen zu organisieren und zu verwalten. Zusätzlich erfüllt er die Aufgabe des „Wear Leveling“ (WL),⁹ der einen Algorithmus verwendet, um die Daten so anzuordnen, dass die Schreib- und Löschzyklen gleichmäßig auf alle Blöcke im Gerät verteilt werden (siehe Abb. 19). Es wird zwischen den dynamischen und den statischen WL unterschieden. Beim dynamischen WL vergleicht der Controller alle leeren Counter vor dem Schreiben und speichert neue Daten in den Zellen mit dem niedrigsten Counter. Dieses Verfahren hat keinen Einfluss auf die Schreibgeschwindigkeit und erhöht die Lebensdauer ca. um den Faktor 25. Beim statischen WL werden alle Counter miteinander verglichen. Neue Daten werden ebenfalls in Speicherzellen mit dem niedrigsten Wert geschrieben. Dieses Verfahren beeinflusst die Schreibgeschwindigkeit, erhöht dafür aber die Lebensdauer der Zellen bis zu Faktor 100.

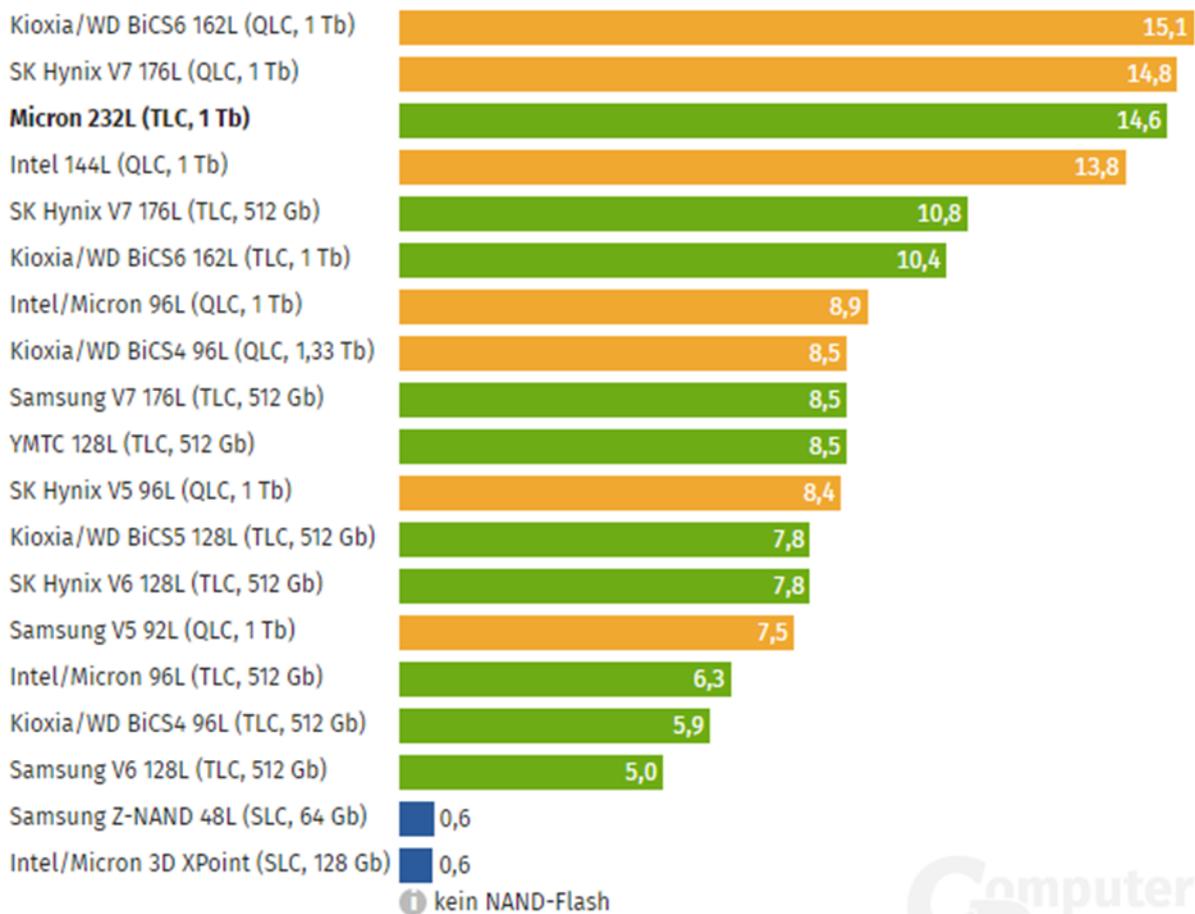
Die Kommunikation mit dem Prozessor, Arbeitsspeicher (RAM) und anderen Komponenten des Computers findet über die Schnittstelle statt. Die gängigen SSDs bei einem Computer oder Laptop nutzen die S-ATA II/III Schnittstelle. Aber auch die PCIe-Schnittstelle (normalerweise für Grafikkarten) kann genutzt werden.

Eine sich drehende Festplatte liest und schreibt Daten magnetisch und ist eines der ältesten Speichermedien im Dauerbetrieb. Die magnetischen Eigenschaften können jedoch zu mechanischen Ausfällen führen. Eine SSD hingegen liest und schreibt die Daten auf ein Substrat aus miteinander verbundenen

⁹ Wear Leveling – WL, eine Technik zur Verlängerung der Lebensdauer einiger Arten von Computerspeichermedien.

Flash-Speicherchips, die aus **Silizium** hergestellt sind. SSDs werden gebaut, indem sie die Chips in einem Gitter stapeln, um unterschiedliche Dichten zu erreichen. Die Halbleiterhersteller entwickeln weiterhin immer kleinere Chipsätze, die hochdichte SSDs ermöglichen. Intel, Micron, Samsung und Western Digital boten SSDs an, die auf 64-Schicht-NAND-Flash basieren. Im Juli 2022 hat Micron den 3D-NAND v6 den Flash-Speicher mit 232 Schichten vorgestellt (siehe Abb. 20) (Micron 2022). Er weist die derzeit höchste Dichte auf und ist dank neuem Design auch schneller als der 3D-NAND der Konkurrenz.

Speicherichte von 3D-NAND (grün: TLC, orange: QLC, blau: SLC)



Einheit: Gigabit pro mm²

Abbildung 20: Übersicht Speicherdichte von 3D-NAND (Computer Base 2022)

Bauelemente mit Floating-Gate-Transistoren (FGR), die elektrische Ladung halten, wurden entworfen, um Volatilität¹⁰ zu vermeiden. Die gespeicherten Daten werden dadurch von einer SSD auch dann gespeichert, wenn sie nicht an eine Stromquelle angeschlossen ist. Jeder FGR enthält ein einzelnes Datenbit, das entweder als 1 für eine geladene Zelle oder als 0 bezeichnet wird, wenn die Zelle keine elektrische Ladung hat.

¹⁰ Flüchtigkeit des Speichers.

Aus der beschriebenen Funktionsweise können folgende Vorteile einer SSD gegenüber einer Festplatte abgeleitet werden:

- sehr kurze Zugriffszeiten
- energieeffizient
- erhöhte Stoßfestigkeit
- größere Temperaturtoleranz
- keine Geräusentwicklung aufgrund mechanischer Bauteile
- geringeres Gewicht
- mechanische Robustheit

Nachteile:

- Geringere Lebensdauer
- Höherer Preis

Die Leistung und Langlebigkeit einer SSD wird wesentlich von der Speicherzellen-Technik (QLC, TLC, MLC oder SLC), dem SSD-Controller und der Firmware beeinflusst. Derzeit bestimmen die Techniken wie PCIe 4.0, NVMe die neue SSD-Generation (Computer Base 2023).

SSDs sind im Vergleich zu herkömmlichen, magnetischen Festplatten relativ teuer. Während Festplatten pro Gigabyte billiger werden, ist das bei SSDs nicht immer der Fall. Je nach Flächendichte, Performance und Technik ergeben sich unterschiedliche Preise.

Heutzutage ist der Büroalltag ohne IKT-Ausstattung so gut wie unvorstellbar und vor allem arbeitsunfähig (Umweltbundesamt 2021b). Öffentliche Beschaffungsstellen sind aufgrund ihres hohen Auftragsvolumens ein Akteur mit großem Potenzial die IT-Industrie weiterhin in Richtung Nachhaltigkeit zu bewegen. Dabei stecken in den Geräten zahlreiche Rohstoffe, dessen Wiederverwertung zu einer Reduktion des globalen Rohstoffabbaus und somit zum Schutz der Umwelt beitragen könnte. In Zusammenhang mit dem Abbau kommt es darüber hinaus immer wieder zu Verletzungen von Arbeits- und Menschenrechten. Dies gilt auch für die Produktion von IKT-Hardware in weitverzweigten Lieferketten.

Die Lieferkette (Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle) (siehe Abb. 21) im Sinne des Gesetzes bezieht sich auf alle Produkte und Dienstleistungen eines Unternehmens. Sie umfasst alle Schritte im In- und Ausland, die zur Herstellung der Produkte und zur Erbringung der Dienstleistungen erforderlich sind, angefangen bei der Gewinnung der Rohstoffe bis hin zu der Lieferung an den Endkunden, und erfasst

- das Handeln eines Unternehmens im eigenen Geschäftsbereich,
- das Handeln eines unmittelbaren Zulieferers und
- das Handeln eines mittelbaren Zulieferers.
- dazu gehört auch die Inanspruchnahme von notwendigen Dienstleistungen, wie zum Beispiel der Transport oder die Zwischenlagerung von Waren.



Abbildung 21: Lieferkette im Detail (Kompass Nachhaltigkeit 2023d)

3.2.1 Rohstoffgewinnung

Die Herstellung eines IKT-Gerätes wie Arbeitsrechners benötigt sehr viele verschiedene Rohstoffe (AK Rohstoffe 2020). Außer Glas, Keramik und diversen Kunststoffen für Gehäuse werden zahlreiche Metalle wie Gold, Kobalt und Lithium für die Akkus, Platin für die Festplatten und Seltene Erden für Elektromagneten eingesetzt. Die Gewinnung dieser und anderer Rohstoffe ist mit zahlreichen Risiken verbunden (PowerShift 2017).

Einerseits handelt sich um die ökologischen Risiken:

- Flächenverlust, zunehmende Entwaldung und Sprengung von Bergen
- Negative Auswirkungen auf Biodiversität
- Verschmutzung von Luft, Böden und Wasser durch Abfälle, Gift- und Reststoffe
- Freisetzung von radioaktiven Substanzen beim Abbau seltener Erden
- Treibhausgasemissionen
- Hoher Energieverbrauch
- Hoher Wasserverbrauch

- Überschwemmungen durch Damm- oder Deichbrüche

Andererseits geht es aber auch um die sozialen und menschenrechtlichen Risiken (WEED e.V. 2022):

- Finanzierung von Konflikten durch den Abbau von und Handel „Konfliktmineralien“
- Korruption und Steuerhinterziehung
- Zwangsaussiedlung von Menschen von ihren Wohn-, Acker- und Viehflächen
- Lärm und Vibration durch Betrieb der industriellen Anlagen
- Gewaltsame Unterdrückung von Protesten
- Menschenhandel, Zwangsarbeit und Kinderarbeit
- Verletzung des Rechts auf Versammlungsfreiheit und des Rechts auf kollektive Tarifverhandlung
- Mangelnder Arbeitsschutz und zu niedrige Sicherheitsstandards

3.2.2 Verarbeitung

Nach der Rohstoffgewinnung folgt die Rohstoffverarbeitung. Aus Erzen werden Metalle, aus Erdöl wird Kunststoff. Metalle, Kunststoffe und andere Bestandteile werden zu den „Zwischenprodukten“ und „Halbfertigwaren“ weiterverarbeitet. Dazu gehören Kabel ebenso wie Leiterplatten oder Prozessoren. Bei vielen Prozessschritten werden gesundheitsgefährdende Stoffe eingesetzt, darunter krebserregende Lösungsmittel wie Benzol. Oder die Schwermetalle Kadmium und Blei. Insbesondere in der Halbleiterindustrie finden zwischen 500 und 1.000 unterschiedliche Chemikalien Anwendung, von denen zahlreiche sehr gesundheitsschädlich sind (Electronicswatch 2014).

Auch der zweite Schritt der Wertschöpfungskette trägt mit sich viele ökologischen:

- Verschmutzung von Luft, Böden und Wasser durch Abfälle, Gift- und Reststoffe
- Treibhausgasemissionen und Emissionen von Schwefeldioxid
- Hoher Energieverbrauch
- Hoher Wasserverbrauch

und sozialen Risiken:

- Zwangsaussiedlung von Menschen von ihren Wohn-, Acker- und Viehflächen
- Lärm und Vibration durch Betrieb der industriellen Anlagen sowie Aufwirbeln von Staub durch intensiven Lkw-Verkehr
- Korruption und Steuerhinterziehung
- Verletzung des Rechts auf Versammlungsfreiheit und des Rechts auf kollektive Tarifverhandlung
- Zu niedrige Löhne für Arbeiter*innen
- Mangelnder Arbeitsschutz und zu niedrige Sicherheitsstandards
- Negative gesundheitliche Folgen durch Einsatz von Schadstoffen (Heinrich-Boll-Stiftung 2019)

3.2.3 Endfertigung

Die Herstellung von IKT-Geräten profitiert erheblich von der Auslagerung der Produktion in Regionen mit niedrigen menschenrechtlichen, sozialen und ökologischen Standards, insbesondere in Ostasien und Südostasien. Äußerst prekäre Beschäftigungsverhältnisse und „flexible Produktionsanforderungen“ zeichnen das Geschäftsmodell der IKT- Industriebranche aus, dass zur Missachtung von ohnehin schon geringen ökologischen und sozialen Auflagen beiträgt (Electronicswatch 2023).

Ökologische Risiken:

- Hoher Energieverbrauch
- Hoher Materialverbrauch
- Hoher Wasser- und Landverbrauch
- Unzureichende Reinigung des Abwassers
- Bildung und Verbreitung von gefährlichen sowie nicht-gefährlichen Abfällen
- Verschmutzung von Luft, Böden und Wasser durch Gift- und Reststoffe sowie Partikel- und Staubbildung

Soziale Risiken:

- Verletzung des Rechts auf Versammlungsfreiheit und des Rechts auf kollektive Tarifverhandlung
- Zu niedrige Löhne für Arbeiter*innen; Kurzzeitverträge; Leiharbeit; mangelnder Urlaubsanspruch; unvorstellbar lange Arbeitszeiten (bis zu 80 Stunden pro Woche); unbezahlte Überstunden
- Kinder- und Zwangsarbeit
- „Schuldklaverei“ von Wanderarbeiter*innen
- Mangelnder Arbeitsschutz und zu niedrige Sicherheitsstandards
- Gesundheitsschäden (Electronicswatch 2014) durch mangelnde Beleuchtung und Belüftung oder fehlende Ventilation in Produktionsräumen
- Gesundheitsschäden durch Kontakt mit giftigen Chemikalien
- Erschöpfungszustände und Überbeanspruchung durch monotone Fließbandarbeit in fixierter Körperhaltung
- Inkonsequente oder vom Unternehmen aktiv behinderte Überprüfung („Monitoring“) der ökologischen und sozialen Standards

3.2.4 Nutzung

Obwohl der größte Anteil des Energie- und Ressourcenverbrauchs von IKT-Geräten während der Produktion anfällt, erweist sich auch die Nutzungsphase als energieintensiv. Im Jahr 2017 lag der Stromverbrauch durch IT in Deutschland insgesamt bei zwei Prozent des gesamten Stromverbrauchs. Die Tendenz ist aufgrund der zunehmenden Anzahl von Rechenzentren, Serverinfrastruktur sowie allen mobilen und stationären Endgeräten und deren Leistung steigend. Die Energieeffizienzkriterien, die Reparierbarkeit und die Garantie langjähriger Software-Updates sollen bei der Beschaffung sowohl von Hardware als auch von Software (Umweltbundesamt 2019) mitberücksichtigt werden. Software beeinflusst den Energiebedarf und kann dazu beitragen, dass Hardware vorzeitig ausgetauscht werden muss (Umweltbundesamt 2017b).

Zu den typischen ökologischen Risiken in der Nutzungsphase gehören folgende:

- Energieverbrauch
- Ressourcenverbrauch insbesondere durch unnötiges Verpackungsmaterial
- Ressourcenverschwendung durch vorzeitigen Verkauf und Verschrottung anstatt Reparatur von IT-Hardware

Der Datenschutz stellt das größte soziale Risiko während der Nutzung von IKT-Geräten dar, weil dadurch die negativen langjährigen Folgen entstehen können.

3.2.5 Recycling & Entsorgung

Deutschland produziert jährlich fast 2 Millionen Tonnen Elektromüll, weltweit sind es mehr als 44 Millionen Tonnen, und die Tendenz ist steigend. Das sind in Deutschland statistisch gesehen jährlich knapp 23 kg Elektroschrott pro Person. Elektro- und Elektronikgeräte sowie IT-Hardware werden viel zu schnell entsorgt, doch die Recyclingquoten sind äußerst gering. Große Mengen des europäischen Elektroschrotts landen in Ländern wie beispielsweise Ghana, Nigeria, Pakistan, Tansania oder Thailand, die unter mangelnden ökologischen und sozialen Standards demontiert werden (WEED e.V. 2020). In den genannten Ländern gibt es aber kaum professionelle Recyclingstrukturen. Junge Menschen versuchen aus den nicht mehr funktionsfähigen Geräten einige wenige masserelevante Wertstoffe wie Kupfer, Aluminium und Gold zu gewinnen. Dabei riskieren sie ihre Gesundheit und die Umwelt wird stark belastet (Umweltbundesamt 2022).

Heutzutage bringen „Urban Mining“ und „anthropogenes Lager“ mit sich noch immer die ökologischen und sozialen Risiken, da im Vordergrund in der ersten Linie ökonomisch motivierte Ansätze des Recyclings stehen.

Ökologische Risiken:

- Emissionen und Kontaminationen bei der Müllverbrennung und Deponierung von nicht recycelbaren Teilen und Verpackungsmaterial
- Umweltgefahren durch unsachgemäße Entsorgung von Blei aus Batterien
- Dauerhafter Verlust von Kunststoffen und Metallen, darunter Seltene Erden, durch unzulängliches Recycling
- Hoher Energiebedarf des Recyclingverfahrens
- Export von entsorgter IT-Hardware von Europa auf den afrikanischen Kontinent; dort gelangen etwa Gifte in die Umwelt bei der Anzündung von Geräten, um die Metalle herauszulösen
- unsachgemäße Entsorgung von Produkten mit Quecksilber, Kadmium, Chrom, Fluorkohlenwasserstoffe und anderen gesundheitsgefährdenden Giften verschmutzt Luft, Boden und Wasser

Soziale Risiken:

- Kinderarbeit bei der Demontage von Altgeräten in afrikanischen Staaten
- Gesundheitliche Risiken durch Abbrennen von Kabelummantelungen und Plastikverkleidungen, wobei krebserregende Gifte freigesetzt und eingeatmet werden

3.2.6 Transport

Von der Gewinnung der Rohstoffe bis zum fertigen Endprodukt werden meist lange Transportwege per Schiff, LKW und Zug zurückgelegt. Treibstoffverbrauch und Abgase sorgen für Umwelt- und Klimabelastungen, die auch für die Gesundheit des Menschen schädlich sind. Für den Transport mit schweren Nutzfahrzeugen wie LKW gilt die Abgasnorm Euro VI (Umweltbundesamt 2021a), die von Beschaffungsstellen für den Transport verlangt werden sollte.

Wie bereits am Anfang des Kapitels erwähnt, fiel die Entscheidung auf die Untersuchung einer einfacheren Hardwarekomponente – SSD. Zunächst wurde versucht Kontakt zu den führenden SSD-Produzenten wie Dell, Hewlett Packard Enterprise (HPE), Fujitsu, Micron, Samsung herzustellen. Bereits nach kurzer Zeit wurde festgestellt, dass die meisten Anfragen unbeantwortet blieben.

Eine präzise Darstellung von der bestimmten Lieferkette basiert auf Informationen, die Einblicke in die internen Prozesse verschaffen. Dazu gehören alle Schritte im In- und Ausland, die zur Herstellung der Produkte und zur Erbringung der Dienstleistungen erforderlich sind. Sogar eine grobe Erfassung der sechs o.g. Stufen – von der Gewinnung der Rohstoffe bis hin zu der Lieferung an den Endkunden – erweist sich als zeitaufwändig und benötigt viel Unterstützung von den Fachleuten und den Fachabteilungen eines oder anderen Unternehmen.

Unsere Untersuchung beruht auf den Internetrecherchen sowie Interviews mit Fachexpert*innen von diversen Organisationen wie Electronics Watch, Fachzeitschriften wie Computer Base, Crucial by Micron und ComputerWeekly.de, Unternehmen wie HPE, IT-Dienstleistern wie DataPort.

Solid State Drives nutzen Flash-Memory-Chips, um Informationen zu speichern. Eine SSD besteht aus mehreren Speicherchips, die auf einer Leiterplatte installiert sind. Die Flash-Memory-Chips werden aus Silizium-Wafern hergestellt, ähnlich wie Arbeitsspeicher.

Zunächst werden die Silizium-Wafer durch einen Prozess mit etwa 800 Arbeitsvorgängen von Robotern geführt, um die Verunreinigungen zu beseitigen. Dabei werden ihnen viele Materialschichten hinzugefügt. Diese beinhalten leitende Materialien wie Kupfer und nichtleitende Materialien wie Siliziumdioxid. Danach wird der Wafer mit einer lichtempfindlichen Flüssigkeit beschichtet und mit ultraviolettem Licht durch eine Glasschablone des Schaltkreismusters bestrahlt. Anschließend werden sämtliche Reststoffe in einem chemischen Bad entfernt.

Aus einem 30 cm dicken Silizium-Wafer werden hunderte von Chips auseinandergeschnitten und gleich danach in ein Schutzgehäuse aus Kunststoff eingefügt. Die Speicherchips sowie andere Bauteile befestigt ein Roboter an den großen Leiterplatten, die mit einer dünnen Lötlegierungspaste bedeckt sind. Anschließend werden die Bauteile an der Platine in einem Ofen angeschweißt (Crucial by Micron 2019).

Micron behauptet, dass sie zu den wenigen Herstellern gehören, die Solid State Drives aus Silizium von Grund auf entwickeln. Durch eine umfassende Qualitätskontrolle vom ersten bis zum letzten Schritt bieten die Laufwerke garantierte Leistung. Unsere Anfrage bei Sustainability Team von Micron bezüglich eines Interviews oder Informationsaustausches zur Lieferkette einer SSD blieb unbeantwortet. Die theoretische Darstellung von der Lieferkette einer innerbetrieblich hergestellten SSD ist beinahe zu ideal, um wahr zu sein. Wenn die Produktion tatsächlich in einer Hand und an Silizium reichen Orten wie in den USA oder China (Jana Lippelt, Jennifer Steigmeier, Anita Wölf 2021) liegt, wäre es durchaus vorstellbar, dass die Transportwege relativ kurz und die sozialen Risiken in den ersten drei Lieferkettenstufen (siehe Abb. 24) klein bleiben. Sobald es sich um diverse Komponentenhersteller und verschiedene Standorte weltweit handelt, sieht es ganz anders aus.

Die Deutsche Rohstoffagentur ordnet Silizium in die Gruppe der Rohstoffe mit den höchsten Preis- und Lieferrisiken ein (Deutsche Rohstoffagentur (DERA) 2019). Bei den aktuellen Strukturen kann es also auch in Zukunft immer wieder zu Engpässen kommen. Ein Grund dafür ist die starke regionale Konzentration der Siliziumproduktion und damit die weltweite Abhängigkeit von nur wenigen Produzenten. Wenn die Rohstoffgewinnung in China stattfindet, die Fertigstellung in Taiwan und Endfertigung in Tschechien, um die SSDs in Europa unter deutschem Namen zu verkaufen, liegen Hunderttausende Kilometer dazwischen sowie enorm viele Überstunden der unterbezahlten (womöglich auch Kinder-) Arbeit unter prekären Bedingungen.

Eine ähnliche Lieferkette für die Herstellung einer SSD ist vorstellbar für den weltberühmten Produzenten – Hewlett-Packard Enterprise. Im Interview mit Andreas Vater¹¹ stellte sich heraus, dass die HP-SSDs nicht vom HPE produziert werden, sondern im Auftrag für das Unternehmen von den anderen Herstellern. Das macht in diesem konkreten Fall, die Aufgabe eine Lieferkette nachzustellen so gut wie unmöglich, vor allem wenn das Unternehmen selbst wenige Informationen dazu hat oder genauer ge-

¹¹ Manager Sales & Marketing HPE EMEA for remanufactured products & factory express.

sagt kaum bereit ist diese offenzulegen. Der Markenträger sowie der Endfertigungshersteller sind bekannt. Woher kommen Silizium, Kupfer, Kunststoffe? Wo werden diese verarbeitet? Woher kommen die fertigen Komponenten? Woher kommen die fossilen Brennstoffe für die Stromproduktion? Für die Antworten auf all diese Fragen werden Einblicke in die internen Prozesse über viele Abteilungen benötigt sowohl im eigenen Unternehmen als auch außerhalb. Die Darstellung einer Lieferkette für so eine kleine Komponente wie die SSD braucht die Bereitschaft der halben Welt, um zusammenzuarbeiten und zu kooperieren.

Der hohe Energieverbrauch ist das größte ökologische Risiko, das sich über alle sechs Stufen einer Lieferkette bemerkbar macht. Für die Produktion von Siliziumlegierungen werden in Lichtbogenöfen hohe Temperaturen von über 2000°C benötigt, daher zeichnet sich der Reduktionsprozess durch einen enormen Energieverbrauch aus. Dieser Stromverbrauch beläuft sich auf ca. 10,5 kWh/kg Rohsilizium (Dubey, S., N. Y. Jadhav und B. Zakirova 2013).

Durch den Energieaufwand, der für die Stromproduktion zum Betrieb der Anlagen nötig ist, fallen erhebliche Mengen von Kohlendioxid an. Dadurch werden während der Siliziumreduktion ca. 5 kg CO₂ pro kg Silizium frei (Alsema, E. A. und M. J. Wild-Scholten 2006). Die Menge an Kohlendioxid steigt dabei einerseits mit einem zunehmenden Siliziumanteil des Ausgangsmaterials, andererseits ist die Menge von der Art der Legierung und dem erwünschten Reinheitsgrad abhängig, was jeweils wiederum einen höheren Energieaufwand bedeutet. Vor allem der Energiemix des für die Produktion verwendeten Stroms ist für die Höhe der Emissionen ausschlaggebend. Demnach fallen die Emissionen in Ländern wie China, in denen häufig Strom aus Kohlekraft eingesetzt wird, deutlich höher aus als in Ländern, die den Strom unter anderem durch erneuerbare Energien ersetzen. So konnten die CO₂-Emissionen in Norwegen durch den Einsatz von Wasserkraft um bis zu 50% reduziert werden (Dubey, S., N. Y. Jadhav und B. Zakirova 2013). Neben den Emissionen aus dem Strombedarf hängt die emittierte CO₂-Menge zudem von den Reduktionsmaterialien sowie den Eigenschaften der Öfen ab. Als Reduktionsmaterial wird dabei Kohlenstoff aus Kohle, Holzstücken, Holzkohle und Koks genutzt.

Zusätzlich zu Kohlendioxid fallen bei der Siliziumproduktion weitere Emissionen in Form von Stickoxiden (NO_x) und Feinstaub an. Stickoxide entstehen dabei hauptsächlich im Verlauf der Siliziumreduktion im Ofen.

In den Lithografischen Grundlagen und Abläufen der Herstellung bestehen zwischen NAND-Flash, DRAM CPUs, GPUs usw. keine signifikanten Unterschiede. Allerdings bestehen CPUs (Central Processing Unit, Hauptprozessor) und GPUs (Graphics Processing Unit, Grafikprozessor) aus mittlerweile etwa 60 und mehr Metallisierungsschichten verschiedener Größe, während das 3D-Stacking der NAND-Chips neben der in ähnlicher Größenordnung befindlichen Steuerlogik auch durch die Anzahl der gestapelten Schichten pro Chip enorm zunimmt. Das bedeutet, dass das benötigte Material (an und für sich sehr wenig) kaum Einfluss hat (bis auf Art, Beschaffung usw.), aber die Lithografischen Herstellungsprozesse müssen mit all ihrem Aufwand weiterhin Schicht für Schicht arbeiten, was die Produktion verkompliziert und die Nutzung von Wasser, Chemikalien und Strom weiter in die Höhe treibt.

Zusammengefasst wird der große Einfluss der NAND-Fertigung auf den Schadstoffausstoß eher in der Entwicklung dieser Komponenten selbst als ausschlaggebend angesehen und weniger über die benötigten Rohstoffe. Mit Sicherheit spielt dort ebenfalls eine Vielzahl seltener Erden, Lanthanoide und Elemente der Platingruppe eine Rolle. Zudem kommen in fast allen hier genannten Produkten neben Silizium auch Wolfram, Kupfer und Halbmetalle wie Tantal vor (jedenfalls war das mal so, da Tantalnitrid als Diffusionsbarriere gegen Kupfer zum Schutz des Siliziums eingesetzt wurde). Als High-k Material für die Gate-kondensatoren wurde beispielsweise lange (poröses) Hafniumoxid verwendet. Dies sind nur einige Beispiele aus der ganzen Kette für Elemente, die hier zum Einsatz kommen.¹²

¹² Interview mit Dr. Philipp Spreer.

Insgesamt lässt sich aber sagen, dass die verwendeten Mengen an Rohstoffen, die für die Herstellung nötig sind, sehr gering sind. Je nach Element kann ein Kilogramm für viele Millionen Chips reichen, was an der sehr präzisen Fertigung, den dünnen benötigten Schichten und der Art der Beschichtungen liegt. Dieses gilt grundsätzlich für alle auf diese Weise gefertigten Halbleiterprodukte. Dass, was energetisch und umwelttechnisch den größten Einfluss hat, ist die eigentliche Fertigung, wie oben beschrieben, und weniger die benötigten Ressourcen.

3.3 Arbeitspaket 2.3 – Effiziente Nutzung bestimmter Hardwarekomponenten

Das letzte Kapitel stellt deutlich dar, dass die Herstellung von IKT-Geräten mit einem hohen Ressourcenaufwand verbunden ist und die Geräte sowie ihre Komponente wertvolle Rohstoffe wie Edelmetalle und seltene Erden enthalten.

Produkte beschreiben von ihrer Herstellung bis zu ihrer Entsorgung einen Lebensweg. Jeder einzelne Schritt wirkt sich abhängig vom Produkt unterschiedlich stark auf den Menschen und die Umwelt aus. IKT- und Elektronikprodukte müssen in Bezug auf ihre Umweltauswirkungen besonders kritisch betrachtet werden.

Das End-of-Life Management erweitert die Betrachtung auf den gesamten Lebenszyklus eines Elektronik-Produktes mit dem systematischen Ansatz eines Managementsystems. Das Recycling des Produkts soll bereits bei der Entwicklung und Produktion berücksichtigt werden, um Ressourcen effizienter zu nutzen und den Umweltschutz bei der Entsorgung zu garantieren. Im Bereich des Höchstleistungsrechnens ist auch das Thema Datensicherheit relevant. Die unwiderrufliche Löschung aller Daten der Massenspeicher ist ein wichtiger Teil des End-of-Life Managements.

Die folgenden Eigenschaften eines IKT-Gerätes spielen eine wichtige Rolle in der Nutzungs- und Entsorgungsphase:

- Lange Lebensdauer
- Leichte Reparierbarkeit
- Hohe Recyclingfähigkeit der Materialien
- Leichte Demontage (Kompass Lieferkettenmanagement Teil 2 2021)

Nicht nur die Herstellung der Produkte verschlingt große Mengen an Energie. Vom Rechenzentrum über die Serverinfrastruktur bis hin zu sämtlichen mobilen und stationären Endgeräten steigt der Energiebedarf weiterhin an, auch wenn in einigen Bereichen Effizienzsteigerungen erreicht werden konnten, zum Beispiel durch die Green-IT-Initiative Deutschland oder die Europäische Ökodesign-Richtlinie. Nichtsdestotrotz bestehen bei der Verbesserung der Ressourcen- und Energieeffizienz erhebliche Potenziale, um die Umwelt im Bereich IKT zu entlasten. Hier gilt es, den Herstellungsaufwand zu reduzieren, weitere Stromeinsparungen bei der Nutzung zu erzielen sowie seltene Rohstoffe unter sachgerechten Bedingungen zurückzugewinnen.

Optimales Produkt-Design, der Ersatz kritischer Metalle, die Harmonisierung der methodologischen Grundlagen zur Ermittlung der lebenszyklusbezogenen Treibhausgasemissionen sowie Maßnahmen zur Verlängerung der Lebensdauer von Produkten und die Sicherstellung sozialer und ökologischer Standards bei der Primärgewinnung der Materialien sind dabei die entscheidenden Themen (Öko-Institut e.V. 2016).

Aus Gesamtsicht von Herstellung, Nutzung und Entsorgung stellt sich die Frage, wann sich der Austausch beispielsweise eines alten Notebooks durch ein neues, energieeffizienteres Gerät wirklich lohnt. Laut einer Studie vom Umweltbundesamt (UBA) ist der Umweltaufwand bei der Herstellung eines Notebooks so hoch, dass er sich auch durch eine erhöhte Energieeffizienz in der Nutzung nicht in wirklichkeitsnahen Zeiträumen ausgleichen lässt. Eine (unrealistische) Effizienzsteigerung von 70 Prozent zwischen zwei Notebook-Generationen an, lohnt sich der Ersatz eines Altgeräts aus Umweltsicht

erst nach 13 Jahren. Ist ein neuer Laptop zehn Prozent energieeffizienter, rechnet sich ein vorzeitiger Austausch sogar erst nach mehreren Jahrzehnten (Umweltbundesamt 2012).

Der Einfluss von Software auf den Energieverbrauch und auf die mögliche Nutzungsdauer von Hardware ist enorm. Ein ineffizientes Textverarbeitungsprogramm benötigt viermal so viel Strom wie das effizienteste untersuchte Programm; ein ineffizienter Browser beansprucht den Prozessor zwölfmal so stark wie ein effizienter (Umweltbundesamt 2018).

Der Kriterienkatalog mit insgesamt 25 Kriterien und 76 Indikatoren kann Software-Unternehmen zur Entwicklung energie- und ressourceneffizienter Software dienen. Zudem könnte er zu einem Anforderungskatalog für das Umweltzeichen Blauer Engel zusammengeführt werden, so dass dieses zukünftig auch Softwareprodukte umfasst (Öko-Institut e.V. und Hochschule Trier und Universität Zürich 2017).

Im Jahr 2019 wurden in Deutschland etwa 947.067 Tonnen Elektroaltgeräte gesammelt. Der weit überwiegende Teil waren Altgeräte aus privaten Haushalten im Sinne des Elektro- und Elektronikgerätegesetzes (ca. 835.131 Tonnen). Das entspricht 10,06 Kilogramm pro Einwohner und Jahr. Die restlichen Mengen (ca. 111.936 Tonnen) kamen von anderen Nutzenden als privaten Haushalten (Umweltbundesamt 2022). Eine sachgemäße Entsorgung stellt die Grundlage für die Wiederverwendung eines Produkts oder einzelner Komponenten beziehungsweise für das Recycling der enthaltenen Rohstoffe dar. Den wohl größten Vorteil des Recyclings stellt die hohe Wertstoffdichte von Elektroschrott im Vergleich zum abgebauten Erz dar. So enthält eine Tonne Erz lediglich rund ein Gramm Gold, wohingegen eine Tonne Elektroschrott rund ein Kilogramm Gold enthält. Als weitere Vorteile einer sachgemäßen Entsorgung sind die abnehmende Unabhängigkeit von Rohstoffimporten und die Vermeidung der bereits beschriebenen Auswirkungen auf den Menschen und die Umwelt beim Abbau und der Verarbeitung der Rohstoffe hervorzuheben. Insbesondere bei Geräten mit Massenspeichern wird durch die sachgemäße Entsorgung ein sicherer Umgang mit sensiblen Daten gemäß den geltenden Datenschutzvorschriften gewährleistet.

An die Hersteller bzw. deren Produkte werden mehrere Erwartungen gestellt, die sich aus technischer Sicht nicht alle gleichermaßen erfüllen lassen oder gar widersprechen. So sollen Geräte einerseits langlebig sein, das heißt unter anderem ein robustes Äußeres besitzen und gleichzeitig soll die Demontage möglichst leicht sein. Ein robustes Gehäuse zeichnet sich während der Nutzung aber besonders dadurch aus, dass es sich nicht leicht öffnen lässt. Dieser Konflikt tritt an vielen Stellen des Produktdesigns auf und führt stets zu einer wirtschaftlich-technischen Abwägung, wobei die Entsorgung nur einen Aspekt von vielen darstellt.

Aus wirtschaftlichen Gründen versuchen die Hersteller möglichst wenig teure Edel- und Sondermetalle zu verwenden. Dies gelingt ihnen, führt aber im Umkehrschluss auch zu geringeren Erlösen in der Recyclingkette. Das Verhältnis von Aufwand zu Gewinn verschlechtert sich für die Recyclingunternehmen hierdurch weiter, da größere Mengen an Material entsorgt werden, das in Summe weniger wert ist. Der Trend hin zu immer kleineren und kompakteren Geräten, die sogenannte Miniaturisierung und das Verlöten von Bauteilen wie Prozessoren, Grafikkarten, Arbeitsspeicher und Massenspeicher erschweren die Zerlegung der Altgeräte in ihre Einzelteile sowie das Herauslösen besonders wertvoller Materialien. Der Aufwand der Entsorgung nimmt auch durch diese – eine aus Sicht der Nutzenden positive Entwicklung – weiter zu.

Schließlich spielt auch die fehlende Akzeptanz von Rezyklatkunststoffen bei Elektronikherstellern eine Rolle in Bezug auf die Frage, warum das Schließen von Stoffkreisläufen so schwierig ist. Argumentiert wird häufig mit den speziellen und hohen Anforderungen an das Produkt und dementsprechend an seine Materialien (Clemm, Christian und Lang, Klaus-Dieter 2018). Die folgende Abfallhierarchie beschreibt den Kern des Kreislaufwirtschaftsgesetzes und verpflichtet gesetzlich dazu, dass die eingesetzten Rohstoffe wiedergewonnen und erneut eingesetzt werden, sofern dies technisch möglich und ökonomisch vertretbar ist. Oberstes Ziel stellt die *Vermeidung (1)* von Abfällen dar, sodass eine Entsorgung gar nicht erst notwendig wird. Eine *Wiederverwendung* ist im Sinne des Kreislaufwirtschaftsgesetzes

dann gegeben, wenn ein Produkt anstatt zu Abfall zu werden, für den Zweck weiterbenutzt wird, für den es geschaffen wurde.

Vorbereitung zur Wiederverwertung (2) ist ein Verfahren, das Produkte, die bereits Abfall sind, prüft und reinigt oder repariert, sodass sie wieder für denselben Zweck verwendet werden können, für den sie ursprünglich bestimmt waren. Als *Verwertung* wird jedes Verfahren bezeichnet, das die in Produkten, die bereits Abfall sind, enthaltenen Ressourcen wieder nutzbar macht. Es kann sich dabei um *Recyclingverfahren (3)* oder eine *sonstige Verwertung (4)* handeln. *Recycling* im Sinne des Kreislaufwirtschaftsgesetzes ist jedes Verfahren, das die in Produkten enthaltenen Ressourcen wieder zur Produktion neuer Produkte nutzbar macht. Eine *sonstige Verwertung* beschreibt dasselbe Verfahren. Allerdings werden die gewonnenen Ressourcen nicht zur Produktion neuer Produkte, sondern zur Verfügung, beispielsweise von Straßen, oder zur Verbrennung und Energiegewinnung genutzt. Die *Beseitigung (5)* stellt in den meisten Fällen eine Ablagerung von Abfällen auf Deponien dar, ohne dass Ressourcen oder Energie zurückgewonnen werden (Kompass Lieferkettenmanagement Teil 2 2021).

Ein effektives *End-of-Life Management* kann dazu beitragen, dass weniger neue Produkte produziert und weniger Primärressourcen verbraucht werden. Außerdem können die unvermeidbaren Auswirkungen auf ein Minimum reduziert werden, da eine sachgemäße Entsorgung Sekundärrohstoffe bereitstellt und Mensch und Umwelt nicht durch Schad- und Giftstoffe gefährdet. Ein Produkt länger als üblich zu benutzen entspricht in der Abfallhierarchie des *Kreislaufwirtschaftsgesetzes* dem höchsten Ziel – der Vermeidung von Abfällen. Sofern die Performance nicht an oberster Stelle steht, kann der Kauf eines gebrauchten Rechners in Betracht gezogen werden. Wird ein neuer Rechner angeschafft, kann der alte Rechner auch weiterverkauft werden, anstatt ihn vom Hersteller entsorgen zu lassen. Werden Geräte vor dem Weiterverkauf professionell gereinigt und auf ihre Funktionsfähigkeit getestet, bezeichnet man sie als „Refurbished IT“. Hierfür besteht mittlerweile ein großer Markt mit ausreichend Nachfrage. Reicht die aktuelle Rechenleistung nicht mehr aus, kann über die Erneuerung einzelner Komponenten nachgedacht werden oder ein neuer Rechner mit noch funktionsfähigen Komponenten aus dem alten Rechner bestückt werden. Allerdings müssen im Bereich des HPC für einen leistungsfähigen und effizienten Rechnerbetrieb alle Einzelteile gut aufeinander abgestimmt sein. Wird eine Komponente wie der Prozessor durch einen schnelleren ersetzt, wird die Gesamtleistung durch eine andere ältere Komponente wie den Hauptspeicher ausgebremst. Aus diesem Grund sind die oben genannten Möglichkeiten im HPC Bereich in der Regel nicht darstellbar. Defekte Komponenten sollten bei einem akzeptablen Verhältnis vom Aufwand zum Wert der Komponente repariert anstatt ersetzt werden.

Zur sicheren Löschung von Daten auf Massenspeichern wie Festplatten und Flashspeichern werden diese in den meisten Fällen mechanisch zerstört. Eine Weiterverwendung ist dann nicht möglich. In manchen Fällen ist eine Löschung der Datenträger auch mit einer Software machbar. Allerdings kann die Zuverlässigkeit dieser Software vom Hersteller nicht garantiert werden. Um im juristischen Sinne auf der sicheren Seite zu sein, entscheiden sich daher die meisten Entsorgungsunternehmen für die Zerstörung der Massenspeicher und eine anschließende stoffliche Verwertung. Die Entwicklung der zerstörungsfreien Software-Variante sollte regelmäßig überprüft und mit den Herstellern der Datenträger diskutiert werden.

Eine bedarfsgerechte Auslegung der Rechenleistung reduziert den Ressourcenverbrauch und die damit einhergehenden unvermeidbaren Umweltauswirkungen sowie den Entsorgungsaufwand auf ein notwendiges Minimum. Muss der alte Rechner schließlich doch entsorgt werden, muss dies unbedingt durch einen akkreditierten Entsorgungsfachbetrieb mit entsprechenden Entsorgungsnachweisen geschehen, sofern der Hersteller die Entsorgung nicht selbst übernimmt (Kompass Lieferkettenmanagement Teil 2 2021).

Durch die gemeinsame Beschaffung mit großen Ausschreibungsvolumina und Forderungen zu Umwelt- und Sozialstandards steigt der Druck auf die Hersteller und den Handel. Die Einhaltung von Umwelt- und Sozialstandards kann durch die Aufnahme von Nachhaltigkeitskriterien und Anforderungen an das Lieferkettenmanagement in die Ausschreibungen in den meisten Fällen sichergestellt werden Kompass

Lieferkettenmanagement Teil 1 2021). Einige Labels beinhalten die Recyclingfähigkeit als Bewertungskriterium und garantieren, dass Ersatzteillieferungen mindestens 3 Jahre (Blauer Engel 5 Jahre) möglich sind. Diese sind der Blaue Engel, EU Ecolabel, TCO Certified und EPEAT. TCO Certified hat die ILO-Kernarbeitsnorm in die Vergabekriterien aufgenommen, womit nicht nur Umwelt- sondern auch Sozialstandards etabliert wurden. Die Kontrolle dieser Sozialstandards ist momentan sehr schwierig und obliegt in der Regel den Herstellern selbst. Neue Kontrollmechanismen und -systeme werden sich aber in naher Zukunft etablieren (Lübberstedt 2015).

Bei kleinen Elektronikprodukten wie Laptops, Desktop Computern oder Druckern ist das Geräteleasing ebenfalls eine Möglichkeit für ein effizientes End-of-Life Management. Dabei übernimmt der Dienstleister die Verantwortung für die fachgerechte Entsorgung. Noch funktionsfähige Geräte werden auf dem Secondhand Markt als „Refurbished IT“ angeboten und werden somit in der Regel weiterverwendet (DEAB & Werkstatt Ökonomie 2013). Beim Geräteleasing darf nicht außer Acht gelassen werden, dass die geleasten Geräte noch vor Ende ihrer technisch möglichen Lebensdauer durch neue Geräte ersetzt werden.

Die Untersuchung zur effizienten Nutzung bestimmter Hardwarekomponenten am HLRS hat sich durch die langjährige praktische Erfahrung bestätigt, dass es eine wirkliche *Wiederverwendung* im großen Stil nicht gibt, da sich die Hersteller sowie Lieferanten in der Regel nicht darauf einlassen. Sie wollen keine Verantwortung für Kompatibilität, Funktionalität und Hardwareersatz bei Defekten übernehmen. Komponente, die aus den alten Rechensystemen vor der Verschrottung ausgebaut werden, sind meistens Netzwerk-Switches und -karten sowie Festplatten und SSDs. Diese werden aber erfahrungsgemäß nicht in das Nachfolgesystem eingebaut, sondern dienen als Reserve für Hardware, die länger als üblich betrieben wird, oder wenn Server von der ursprünglichen Verwendung abgezogen und für etwas Neues verwendet werden. Oder um noch ältere Hardware der Infrastruktur zu ersetzen.¹³

Praxisbeispiel – Entsorgung des Supercomputers Hazel Hen



Abbildung 22: CRAY XC40 – Hazel Hen (Boris Lehner für HLRS)

Im Jahr 2020 wurde der Supercomputer Hazel Hen (siehe Abb. 22) abgebaut und über die Firma Cray Inc. bei dem zertifizierten Entsorgungsfachbetrieb CR Recycling entsorgt. Es wurden insgesamt 2.820 kg Leiterplatten und 7.760 kg Bauteile entsorgt. Die fachgerechte Verwertung und Entsorgung des Materials der Bauteile wurden dem HLRS vom Entsorgungsfachbetrieb bestätigt. Diese wurden gemäß

¹³ Interview mit Uwe Sauter, Abteilung High-Performance Computing Network – Production, HLRS.

dem Elektroaltgerätegesetz verwertet, eventuelle Reststoffe wurden entsorgt. Hierbei wurden die Verwertungsquoten gemäß ElektroG eingehalten.

Für die Vernichtung der Festplatten, Magnetbänder und sonstigen Datenträgern wurde vom Entsorger Folgendes bestätigt:

Diese ist gemäß Bundesdatenschutzgesetz (BDSG) über die Bestimmungen zur datenschutz-konformen Löschung (Vernichtung) von Daten erfolgt unter Beachtung

- der Sicherheitsstufen nach DIN 66 399, H 5,
- der entsprechenden Schutzklasse 3 Nr. 5/Materialkategorie D nach DIN EN 15 713 sowie
- der Technischen Leitlinie TL 03420 des Bundesamtes für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI).

Die Vernichtung der Datenträger und die prozessbegleitende Dokumentation sind, wie vorgeschrieben, nur durch Mitarbeitende erfolgt, die gemäß § 5 BDSG auf das Datengeheimnis verpflichtet sind.

Die vernichteten Materialien wurden gemäß Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) sowie nach dem Elektroaltgerätegesetz verwertet und auftretende Reststoffe endgültig entsorgt. Die Verwertungsquoten gemäß ElektroG wurden nach Angabe des Entsorgers eingehalten. Das Entsorgungsunternehmen gibt an, dass es jährlich die Einhaltung der datenschutzrechtlichen Bestimmungen bei der Vernichtung von Datenträgern und die Bestimmungen der Prüf- und Überwachungsgesellschaft überprüft (Kompass Lieferkettenmanagement Teil 2 2021).

3.4 Arbeitspaket 2.4 – Beschaffungsmaßnahmen Büro-IT

Die Arbeiten in Arbeitspaket 3.4 haben klar gezeigt, dass Beschaffungsmaßnahmen im Büro-Umfeld einen relevanten Einfluss auf den Energieverbrauch und die CO₂-Produktion haben. Es liegt daher nahe, einige Anschaffungskriterien beim Kauf neuer IT-Geräte zu berücksichtigen. Dabei müssen jedoch Nutzungskriterien im jeweiligen Umfeld berücksichtigt werden. Ein essenzieller Faktor ist, wieviel Rechenleistung für die Verrichtung der Dienstarbeiten wirklich notwendig ist. In der Untersuchung waren viele Rechner überproportioniert oder zumindest nicht optimal auf den Arbeitskontext ausgelegt. Ein zweiter Kontext, der zu berücksichtigen ist, ist die Dimension der internen Server-Umgebung, sofern vorhanden. Auslagerungen auf den IT-Server machen nur Sinn, wenn dieser den Anforderungen an die Arbeiten erfüllt, wofür typischerweise höher dimensionierte Server notwendig sind. Auch die zunehmende Arbeit von zuhause stellt neue Anforderungen an die IT-Umgebung.

In Zusammenarbeit mit Arbeitspaket 4 hat sich dabei rausgestellt, dass die Nutzerakzeptanz primär vom Komfort und sekundär von der Leistung bestimmt wurde; wobei die wahrgenommene Leistung (speziell bei Datenzugriff) deutlich höher stand als die tatsächliche Systemleistung. Komfort bedeutet dabei insbesondere, dass der Bildschirm und die Tastatur der Arbeitsumgebung angepasst sein sollten.

Generell lassen sich die folgenden Aussagen machen:

Desktop PC-Umgebungen verbrauchen mehr Energie (48 kg CO₂/Jahr) als Laptop-Umgebungen (27 kg CO₂/Jahr). Dies liegt aber auch daran, dass der Monitor essenziell zum CO₂-Fußabdruck beitragen (ca. 10 kg CO₂/Jahr).

Ein größerer Anteil tragen allerdings die Herstellung von PCs bei, der bei mehreren 100 kg CO₂ (pro Einheit) liegt. Dabei ist der Unterschied zwischen Laptop und PC relativ gering.

Dabei muss allerdings berücksichtigt werden, dass die Lebensdauer eines Laptops bei ungefähr der Hälfte eines Desktop PCs liegt. Sollten also keine hohen Leistungsanforderungen an den Rechner gestellt werden, kann ein Desktop PC bis zu 10 Jahre betrieben werden, was den relativen CO₂-Anteil weiter reduziert. Aufrüstungen gehen dabei aber wieder mit mehreren Dutzend Kilogramm CO₂ einher (je nach Bauteil bis zu 200), so dass sich Aufrüstung eines Desktop PCs nur dann lohnt, wenn kein Laptop für die generelle Arbeitsanforderung gefunden werden kann.

Viele Büro-Umgebungen haben insbesondere zu Beginn der Corona Pandemie zusätzliche Laptops für ihre Mitarbeitende besorgt, was zur Verdoppelung der Infrastruktur geführt hat. Während sich dies im Kontext kaum vermeiden ließ, ist eine generelle Ausrüstung mit Laptops stark zu empfehlen. Diese können dann sowohl in der Büroumgebung, als auch im Homeoffice verwendet werden. Anstelle eines externen Monitors für den Laptop, lohnt es sich aus Energie-/CO₂-Perspektive, den Laptop als primären (einzigen) Monitor zu benutzen und diesen durch ein Podest auf ergonomische Höhe zu setzen. Um Ergonomie sicherzustellen, können externe Maus und Keyboard genutzt werden, die eine lange Haltbarkeit und einen relativ geringen CO₂-Fußabdruck haben.

Ein wichtiger Unterschied zwischen Home- und Büro-Umgebung stellt sich allerdings in Bezug auf die Datenkommunikation über das Internet. Prinzipiell kann der CO₂-Fußabdruck für 1 GB Daten über das Internet auf 10–30 g CO₂ geschätzt werden – demgegenüber ist der Anteil im Intranet bei ungefähr 1/10. Sollten die Büro-Daten also bereits im Internet gehostet werden, stellt sich kein Unterschied zwischen Büro- und Home-Umgebung. Sollten die Daten jedoch im Intranet gespeichert sein, erhöhen sich die Datenzugriffskosten um Faktor 10.

Ähnlich verhält es sich für die virtuelle Umgebungen. Thin clients können den CO₂-Fußabdruck gegenüber einem Laptop um ca. 1/3 weiter reduzieren, erfordern dafür aber bessere Server-Leistung. Da eine virtuelle Desktop-Umgebung zudem eine streaming connection erfordert, lohnt sich die thin client Umgebung nur innerhalb der Büro-Umgebung mit guter Intranet Anbindung. Damit geht allerdings auch die Möglichkeit des Homeoffices verloren. In logischer Konsequenz, Online-Meetings mit Video werden im Homeoffice gerne als Alternative zu physischen Meetings verwendet. Im Schnitt produzieren solche Meetings für 10 Mitarbeitende ca. 3 kg CO₂/Jahr. Während dies verhältnismäßig gering ist, kann dieser Fußabdruck drastisch durch kürzere, weniger Meetings ohne Video reduziert werden.

Zusammenfassend lässt sich damit folgende Aussage treffen: prinzipiell ist bei einer Beschaffung das Alter der PC Umgebung zu berücksichtigen. Zukünftige Umgebungen sollten einer Homeoffice Ausstattung gerecht werden und durch die Verwendung von Laptops für einen geringeren CO₂-Verbrauch sorgen. Meetings per Zoom sind auf ein Minimum zu beschränken und sollten idealerweise ohne Video stattfinden (oder mit geringer Qualität) – in den meisten Fällen ist das Telefon eine bessere Option. Daten sollten idealerweise auf dem Rechner vorgehalten werden und im Büro abgeglichen werden.

4 Arbeitspaket 3 – Betrieb digitaler Infrastrukturen – HPC

Im Folgenden werden die Ergebnisse zu Arbeitspaket 3 dargestellt. Zuerst wird die verwendete Messinfrastruktur des CPU-Systems und des GPU-Systems beschrieben. Anschließend werden die Ergebnisse der Arbeitspakete 3.1 bis 3.3 dargestellt.

4.1 Messinfrastruktur – CPU-System

Einem Großteil der in diesem Bericht dargestellten Ergebnisse liegen Experimente auf dem Supercomputer HAWK am HLRS zugrunde. HAWK nutzt AMD EPYC CPUs für die Durchführung der Berechnungen. Das System ist im Detail auf der Webseite des HLRS (Höchstleistungsrechenzentrum Stuttgart) beschrieben.

Der Anschluss von HAWK an das Stromnetz ist im Prinzip wie bei einem gewöhnlichen PC mit dem Unterschied, dass mehrere Netzteile im Verbund arbeiten und mehrerer Mainboards gleichzeitig mit Spannung versorgen. Im Detail arbeiten jeweils 10 Netzteile im Verbund und versorgen 32 Rechenknoten. Diese 32 Rechenknoten bilden die Einheit „Chassis“ von der wiederum vier Stück einen kompletten Serverschrank füllen.

Die elektrische Leistung wird alle zwei bis drei Sekunden für jeden Rechenknoten gemessen und aufgezeichnet. Der Messpunkt liegt zwischen dem Verbund aus Netzteilen und dem Rechenknoten auf der Seite der Gleichspannung. Die auf der Seite der Wechsellspannung abgenommene Leistung, beziehungsweise die elektrische Leistung am Stromzähler, liegt ca. 10 % höher, da die Effizienz der verbauten Netzteile zwischen 90 % und 94 % liegt.

4.2 Messinfrastruktur – GPU System

Die Leistungsmessungen für GPU Programme wurde am GPU Teil von HAWK durchgeführt. In diesem System wird jeder Rechenknoten von vier Netzteilen versorgt, die im Verbund arbeiten. Die elektrische Leistung wird jede Minute gemessen und gespeichert. Im Unterschied zum CPU-System liegt der Messpunkt auf der Seite der Wechsellspannung also zwischen den Netzteil und dem Stromnetz. Der von den Netzteilen verursachte Leistungsverlust ist in dieser Messung also enthalten und führt beim Vergleich mit dem CPU-System zu einer systematischen Benachteiligung des GPU-Systems. Die Netzteile haben die gleiche Effizienz wie im CPU System, also liegt auch hier die elektrische Leistung auf der Seite der Wechsellspannung cirka 10 % über der Leistung auf der Seite der Gleichspannung.

4.3 Leistungsbegrenzung – CPU System

Die in HAWK verbauten CPUs besitzen eine Schnittstelle, die es ermöglicht die maximal von der CPU aufgenommene elektrische Leistung zu begrenzen (WikiChip LLC 2023). Der Funktionsumfang der CPU wird dadurch nicht verändert, ein ausgeführtes Programm kommt also zum gleichen Ergebnis. Es ist aber möglich, dass die Ausführung eines Programms durch die Absenkung der maximal erlaubten Leistungsaufnahme gebremst wird. Um die elektrische Leistung von der Rechenleistung des Programms zu unterscheiden, wird die Rechenleistung im Folgenden als „Performance“ bezeichnet. Was genau die CPU macht, um die eingestellte maximale Leistung einzuhalten, ist nicht bekannt. Durch die Leistungsbegrenzung (LG) der CPU kann auch die Leistungsaufnahme anderer Komponenten wie Speicher und Netzwerk beeinflusst werden. Die Änderung in der elektrischen Leistungsaufnahme eines Rechenknotens muss also nicht unbedingt der Änderung im eingestellten Wert für die Leistungsbegrenzung entsprechen. Die für einen Knoten gemessene elektrische Leistung ist die Summe der elektrischen Leistung aller Einzelkomponenten wie CPU, Speicher, Netzwerkkarte, Spannungswandler und so weiter.

4.4 Arbeitspaket 3.1 – Performance optimierter HPC Rechenbetrieb

4.4.1 Einleitung

Die im Antrag beschriebene Steuerungssoftware zur automatischen Leistungsbegrenzung konnte während der Laufzeit des ENRICH Projekts nicht in Betrieb genommen werden.

Um den Einfluss der Leistungsbegrenzung auf typische Anwendungen zu untersuchen, wurden auf einem kleinen Teil von Hawk, bestehend aus acht Rechenknoten, Experimente durchgeführt. Die untersuchten Anwendungen werden mit „A“, „B“, „C“, „D“ und „E“ bezeichnet. Jede dieser Anwendungen wurde für einen einzigen Datensatz untersucht. Die hier gesammelten Ergebnisse sind also nur eine kleine Stichprobe der auf HAWK verwendeten Anwendungen und Datensätze. Trotzdem ist es möglich verschiedene Muster im Verhalten der Anwendungen zu erkennen.

In diesem Experiment wurden zwei Einstellungen variiert: Die Leistungsbegrenzung wurde zwischen 515W und 695W pro Knoten eingestellt und der CC6 Energiesparmodus wurde an- und ausgeschaltet. Bei dem Durchlauf der Anwendungen wurden die Größen Laufzeit, mittlere elektrische Leistungsaufnahme der Knoten und die verbrauchte Energie (Energy-to-solution) gemessen.

4.4.2 Ergebnisse der Experimente

In den folgenden Darstellungen sind alle Messwerte auf die Einstellung Leistungsbegrenzung = 615W und CC6 = aus bezogen. Die X-Achse zeigt den Wert der Leistungsbegrenzung in Watt und die Y-Achse zeigt den relativen Wert. Die Symbole Kreis und Dreieck unterscheiden CC6 = an (Kreis) und CC6 = aus (Dreieck).

Abbildung 23 zeigt den Einfluss der Leistungsbegrenzung auf das Programm „A“. Die Laufzeit ist unabhängig von der Leistungsbegrenzung. Energy-to-solution und elektrische Leistung sind näherungsweise proportional zu der Leistungsbegrenzung.

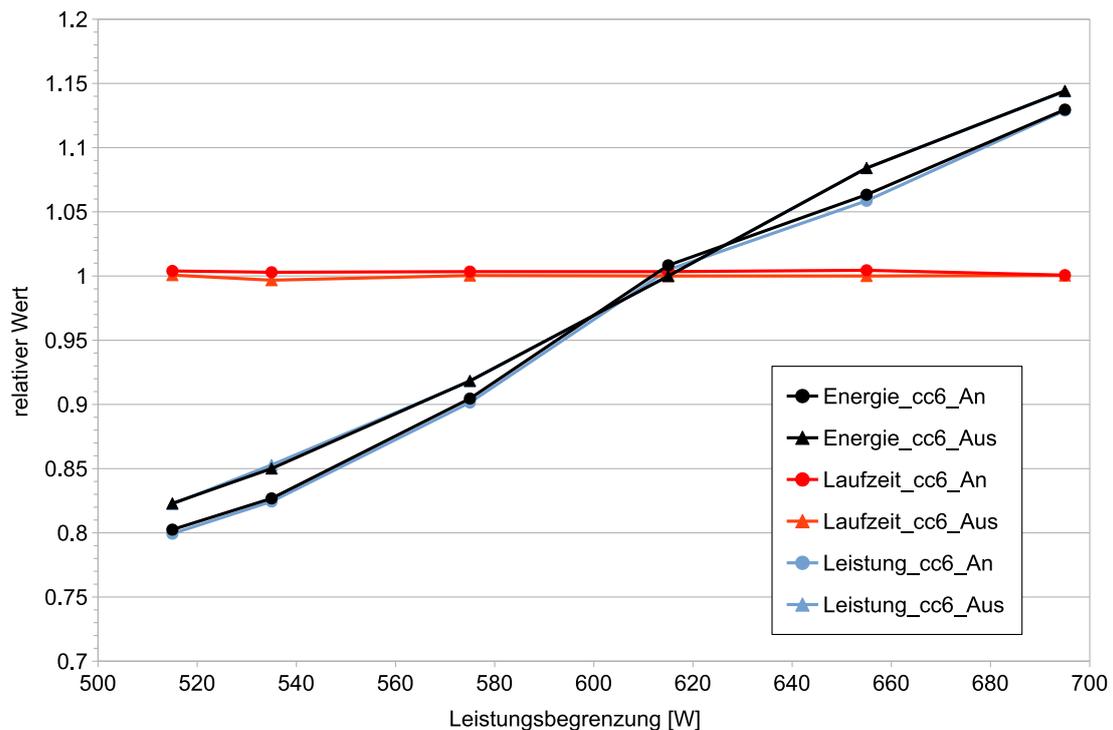


Abbildung 23: Einfluss der Leistungsbegrenzung auf Anwendung "A"

Ähnlich zu „A“ verhält sich Anwendung „D“ in Abbildung 24. Hier fällt die Laufzeit bis zu einem gewissen Punkt mit zunehmender Leistungsbegrenzung und bleibt dann konstant während Energy-to-solution und Leistung weiter steigen.

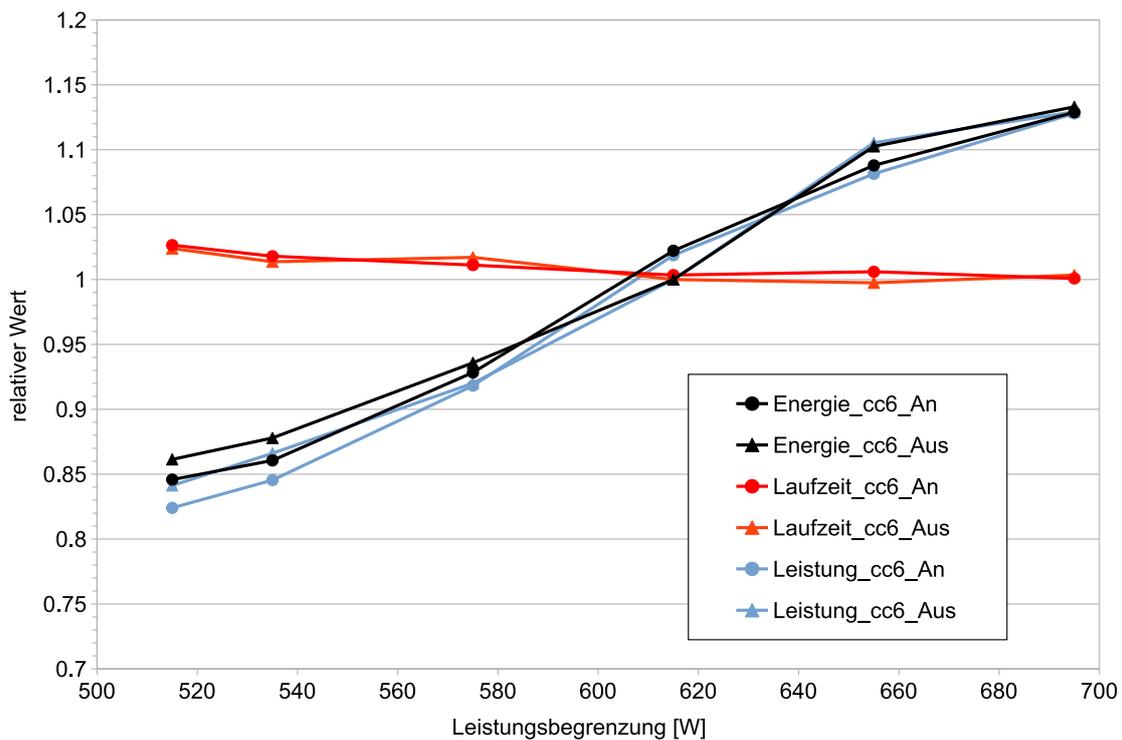


Abbildung 24: Einfluss der Leistungsbegrenzung auf Anwendung "D"

Abbildung 25 zeigt den Einfluss der Leistungsbegrenzung auf das Programm „B“. Die elektrische Leistung ist proportional zur Leistungsbegrenzung. Die Laufzeit fällt mit steigender Leistungsbegrenzung, der Zusammenhang ist nicht linear. Für kleine Werte der Leistungsbegrenzung steigt die Laufzeit steil an. Die Energy-to-solution fällt zunächst mit steigender Leistungsbegrenzung und steigt dann wieder. Es gibt also ein Minimum an dem das Programm mit minimalem Energieaufwand läuft.

Die Anwendung „C“ zeigt in Abbildung 26 das gleiche Verhalten wie „B“ in Abbildung 25. Das Minimum in der Energie ist zu kleineren Werten der Leistungsbegrenzung verschoben. Der Abfall der Laufzeit mit steigender Leistungsbegrenzung ist weniger steil. Die Leistung zeigt das gleiche Verhalten mit mehr Welligkeit.

Für alle hier gemachten Experimente gilt, dass die elektrische Leistung nahezu proportional zur Leistungsbegrenzung ist. Die elektrische Leistung des Gesamtsystems lässt sich also über die Leistungsbegrenzung regeln. Die Laufzeit ist entweder unabhängig von der Leistungsbegrenzung oder sinkt mit steigender Leistungsbegrenzung.

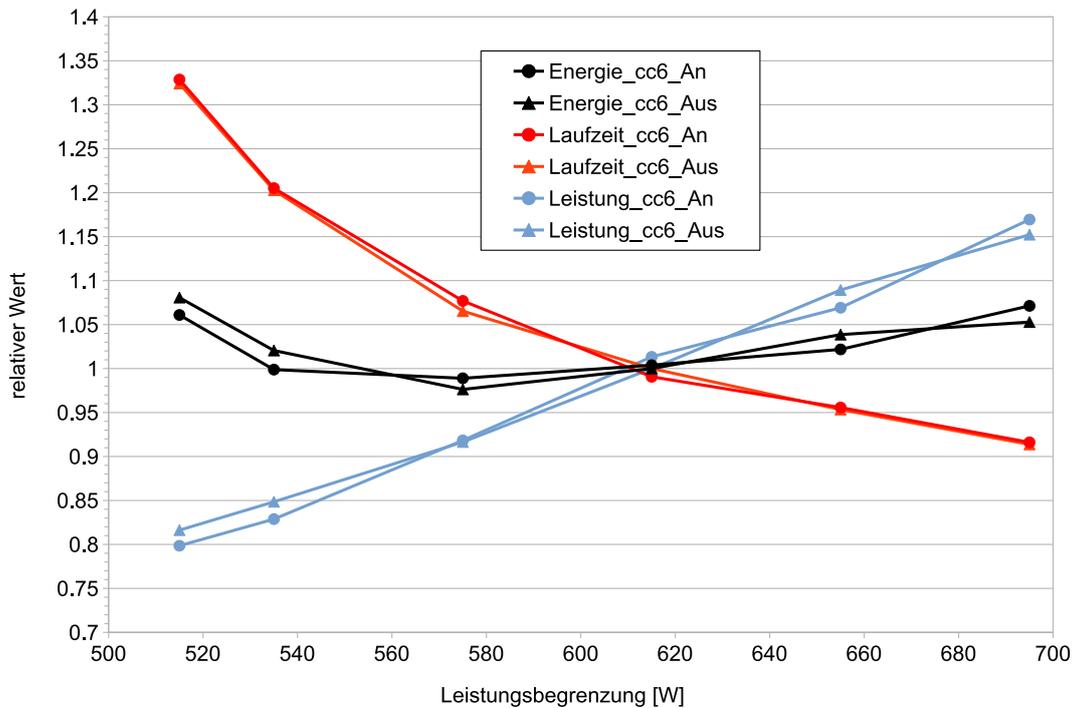


Abbildung 25: Einfluss der Leistungsbegrenzung auf Anwendung "B"

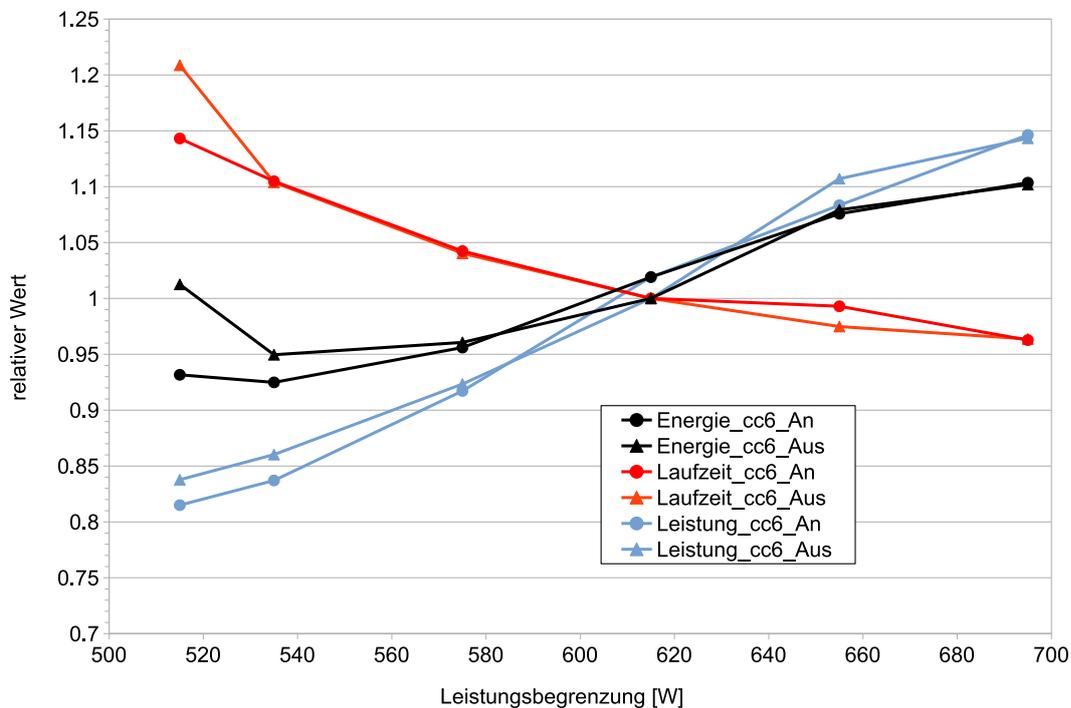


Abbildung 26: Einfluss der Leistungsbegrenzung auf Anwendung "C"

Die Einstellung CC6 zeigt in den bis hier dargestellten Experimenten keinen Einfluss. Im Gegensatz dazu zeigt Anwendung „E“ in Abbildung 27 deutlich schlechtere Werte für CC6 = an als für CC6 = aus. Die elektrische Leistung sinkt wie erwartet, wenn CC6 = an ist. Gleichzeitig steigt die Laufzeit aber deutlich was zu einem Anstieg der Energy-to-solution führt. Der Abfall der Laufzeit bei LG = 535W und CC6 = an kann nicht erklärt werden. Mit dem Verhalten von Anwendung „E“ wird deutlich, dass Einstellungen, welche das Power Management der CPU betreffen, deutliche negative Effekte haben können.

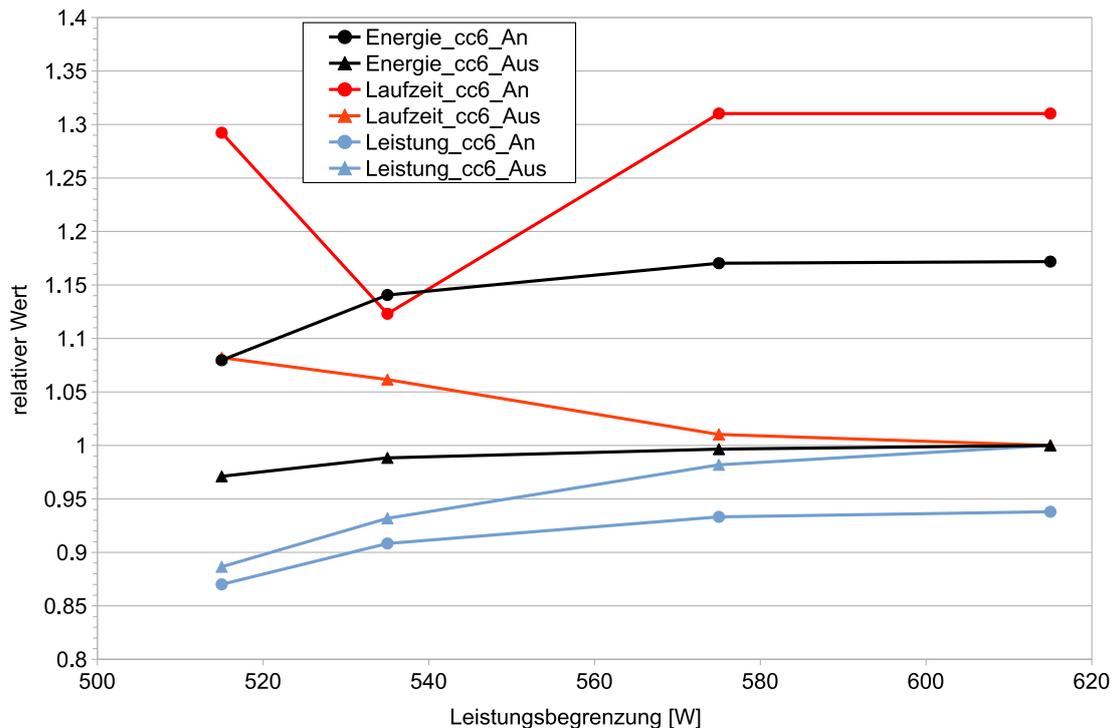


Abbildung 27: Einfluss der Leistungsbegrenzung auf Anwendung "E"

4.4.3 Auswertung und Interpretation

Wegen der kleinen Zahl von Experimenten ist eine Ableitung von Klassen durch eine Gruppierung von Experimenten wie im Antrag beschrieben nicht möglich. Die Experimente zeigen aber, dass die verschiedenen Anwendungen verschiedene Optimierungsmöglichkeiten bieten. Diese sollen im Folgenden erläutert werden:

Für die Anwendung „A“ ist die Laufzeit unabhängig von der Leistungsbegrenzung, die Leistungsbegrenzung kann also unabhängig vom Optimierungsziel immer auf den kleinsten Wert gestellt bleiben. Für die verbleibenden drei Anwendungen können verschiedene Optimierungsziele definiert werden.

Optimierungsziel minimale Laufzeit: Diese Optimierung liefert die maximale Menge von abgeschlossenen Berechnungen und damit die maximale Menge an Ergebnissen. Die Laufzeit der Anwendung „D“ in Abbildung 25 nimmt zuerst mit steigender Leistungsbegrenzung ab und bleibt dann konstant. Der Punkt an dem die Laufzeit in das Plateau übergeht ist also der optimale Wert für die Leistungsbegrenzung. Ein höherer Wert der LG bringt keine weiteren Vorteile. Die Anwendungen „B“ in Abbildung 26 und „C“ in Abbildung 27 zeigen eine Abnahme der Laufzeit mit steigender Leistungsbegrenzung. Die minimale Laufzeit wird bei maximaler LG erreicht. Das Maximum der Laufzeit liegt in allen Fällen bei minimaler Leistungsbegrenzung.

Optimierungsziel elektrische Leistung: Hier wird versucht eine vorgegebene elektrische Leistung des Gesamtsystems nicht zu überschreiten. Alle untersuchten Programme zeigen einen nahezu linearen Zusammenhang zwischen elektrischer Leistung und eingestellter Leistungsbegrenzung. Die elektrische Leistung des Gesamtsystems kann also über das Einstellen der Leistungsbegrenzung limitiert werden.

Optimierungsziel höchste Energieeffizienz: Das Ziel ist hierbei das Ergebnis einer Berechnung mit dem kleinsten möglichen Energieeinsatz zu erhalten. Anwendung „D“ in Abbildung 25 zeigt das Minimum der Energy-to-solution beim kleinsten Wert von Leistungsbegrenzung. Gleichzeitig ist beim kleinsten Wert von Leistungsbegrenzung die Laufzeit maximal. Die Anwendungen „B“ in Abbildung 25 und „C“

in Abbildung 27 zeigen ein Minimum in der Energy-to-solution. Das Minimum liegt für beide Programme bei unterschiedlichen Werten der Leistungsbegrenzung. Die Laufzeit ist an den Minima größer aber nicht am Maximum.

4.5 Arbeitspaket 3.2 – Effiziente Programmierung von Algorithmen

4.5.1 Abschätzung der Effizienzsteigerung durch effizientere Programmierung

In diesem Teil werden zwei mögliche Ansätze zur Effizienzsteigerung von Programmen durch effiziente Programmierung dargestellt. Für beide Ansätze wird die mögliche Einsparung an Energie abgeschätzt. Der erste Ansatz ist die Verbesserung der rechnerischen Lastverteilung und der zweite Ansatz ist die Portierung von Algorithmen auf GPU Systeme.

Effizienzsteigerung durch Verbesserung der rechnerischen Lastverteilung

Die rechnerische Lastverteilung (LV) lässt sich für jedes Programm, das auf mehreren CPU-Kernen läuft, bestimmen. Die LV nimmt Werte zwischen 0 und 1 an und ist definiert als das Verhältnis zwischen der mittleren Rechenzeit und der maximalen Rechenzeit. Die Rechenzeit kann hier auf eine Routine in einem Programm oder auf das ganze Programm bezogen sein.

Die Abschätzung der Effizienzsteigerung durch die Verbesserung der LV erfolgt in drei Schritten: Zuerst wird untersucht, wie sich die LV auf die Leistungsaufnahme eines Rechenknotens auswirkt. Im zweiten Schritt wird die Verteilung der LV über die Programme bestimmt. Im letzten Schritt wird berechnet, wie die benötigte Energie mit steigender LV abnimmt. Eine Verbesserung der LV führt zu einer Effizienzsteigerung, unabhängig von der Einstellung der Leistungsbegrenzung aus dem vorhergehenden Kapitel.

Einfluss der Lastverteilung auf den Energieverbrauch

In Folgenden wird der Einfluss der LV auf die Leistungsaufnahme untersucht. Als Versuchsobjekt dient ein synthetisches Benchmark, das in einer Schleife eine Berechnung durchführt. Mehrere Instanzen dieses Programms arbeiten im Verbund und kommunizieren mittels MPI (Message Passing Interface). Nach jedem Schleifendurchlauf werden Daten mit den benachbarten MPI-Prozessen ausgetauscht. Erst nachdem die MPI-Kommunikation mit den Nachbarn abgeschlossen ist, kann die nächste Iteration beginnen. Dies ist ein typisches Muster in HPC Anwendungen. Die Instanzen, die mehr Rechenzeit benötigen, um eine Iteration zu durchlaufen, verzögern also den Beginn der nächsten Iteration und führen so zu einer längeren Laufzeit. Die LV kann über die Anzahl der zu berechnenden Objekte in jeder Instanz eingestellt werden.

Es gibt zwei Varianten der Berechnung, eine ist durch den Zugriff auf den Hauptspeicher beschränkt, die zweite ist durch die Geschwindigkeit der CPU beschränkt. Diese beiden Varianten werden im Folgenden mit „MEM-Variante“ und „CPU-Variante“ bezeichnet. Eine reale Anwendung besteht in der Regel sowohl aus Teilen, die sich wie die CPU-Variante verhalten als auch aus Teilen, die sich wie die MEM-Variante verhalten. Die Rechenleistung der im Verbund laufenden Instanzen wird in der Einheit „prozessierte Elemente pro Sekunde“ gemessen. Der Verbund aus Instanzen hat seine Aufgabe erledigt, wenn eine gewisse Anzahl von Elementen berechnet wurden. Dabei kommt es nicht darauf an wie viele Elemente von jeder einzelnen Instanz bearbeitet werden. Im Idealfall von $LV=1$ erledigen alle Instanzen gleich viel Arbeit während im Fall $LV=0$ eine Instanz die ganze Arbeit allein erledigt.

Auf einem Knoten von HAWK wurden 32 Instanzen des zuvor beschriebenen Programmes gestartet und dabei die Rechenleistung sowie die elektrische Leistung des Knotens gemessen. Die Ergebnisse dieses Experiments sind in Abbildung 28 gezeigt. Die roten Symbole gehören zur CPU-Variante und die blauen Symbole gehören zur MEM-Variante. Die Kreise zeigen die elektrische Leistung auf der linken Achse und die Sterne zeigen die Rechenleistung auf der rechten Achse. Die X-Achse zeigt die LV. Die

Rechenleistung der CPU-Variante steigt linear mit der LV, die elektrische Leistung fällt linear mit steigender LV. Die MEM-Variante verhält sich weniger linear als die CPU-Variante. Die Rechenleistung fällt mit abnehmender LV zunächst leicht und dann stärker. Die elektrische Leistung fällt ebenfalls mit abnehmender LV und verhält sich genau umgekehrt wie die elektrische Leistung der CPU-Variante.

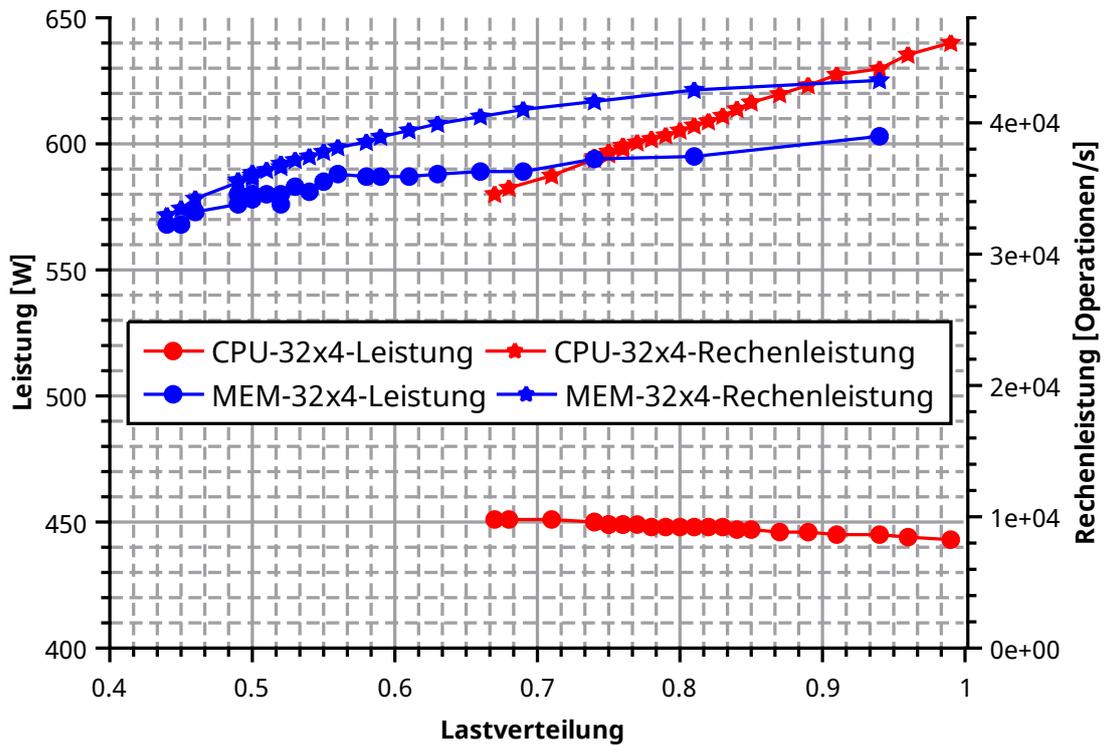


Abbildung 28: Elektrische Leistung und Rechenleistung in Abhängigkeit der rechnerischen Lastverteilung

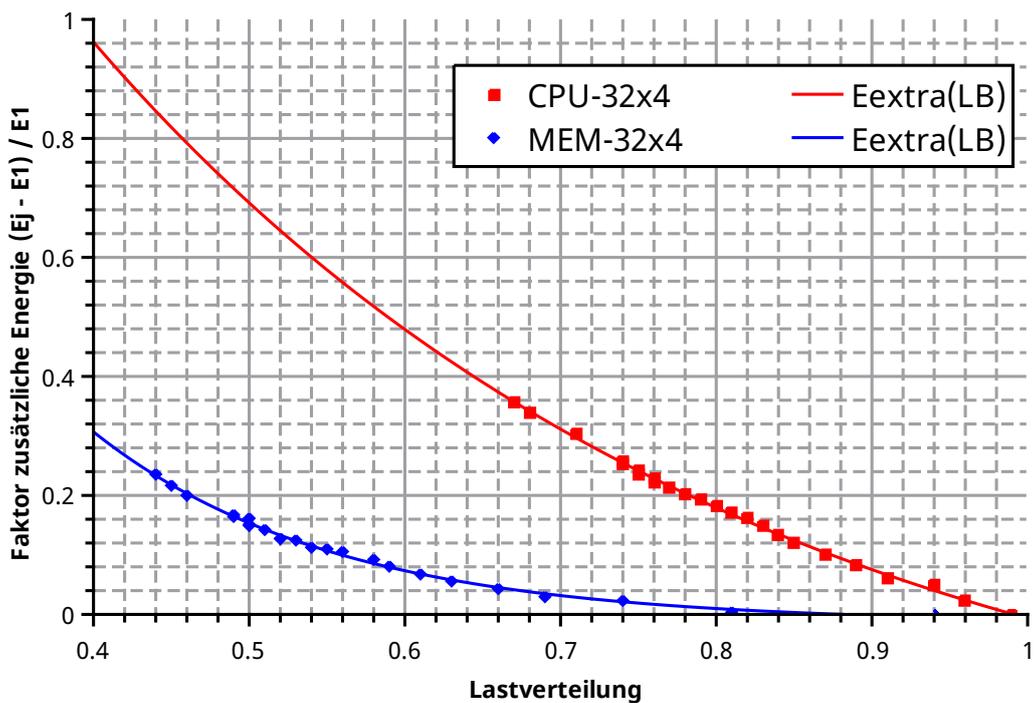


Abbildung 29: Zusätzlich benötigte Energie pro Operation als Funktion der Lastverteilung

Aus den gewonnenen Daten wird die pro Operation benötigte Energie berechnet. Der Wert bei LV=1 ist der optimale Wert und wird mit E_{opt} bezeichnet. Anschließend wird für jeden Wert der LV der

Unterschied zu E_{opt} berechnet und durch E_{opt} geteilt. Die resultierende Größe ist der Faktor an zusätzlicher Energie pro Operation, die im Folgenden mit E_{extra} bezeichnet wird. E_{extra} gibt an um welchen Faktor der Energieverbrauch pro Operation wegen nicht perfekter LV erhöht ist. Der Verlauf von E_{extra} als Funktion der LV ist in Abbildung 29 gezeigt. Es wird deutlich, dass sich die CPU-Variante und die MEM-Variante unterschiedlich verhalten. Der Anstieg von E_{extra} mit abnehmender LV ist für die CPU-Variante stärker als für die MEM-Variante. Die MEM-Variante zeigt für Abweichungen bis 0,1 vom Idealwert $LV=1$ keinen Anstieg in E_{extra} .

Der Verlauf von E_{extra} wird mit folgender Gleichung beschrieben:

$$E_{extra} = A + B * e^{-LV/C}$$

Die Werte der Parameter A, B und C sind in Tabelle 30 für die CPU-Variante und die MEM-Variante aufgelistet. In weiterführenden Experimenten wäre es sinnvoll E_{extra} für reale Anwendungen zu bestimmen und mit der CPU-Variante und der MEM-Variante zu vergleichen.

Parameter	CPU-Variante	MEM-Variante
A	-0,310576	-0,013913
B	3,304743	4,319171
C	0,419101	0,153815

Tabelle 30: Modell-Parameter für die CPU- und MEM-Variante

An diesem Punkt ist klar, dass ein Verbund von Programmen mit einer nicht perfekten Lastverteilung zusätzlich Energie verbraucht. Mit dem hier vorgestellten Modell lässt sich die zusätzlich benötigte Energie für einen Programmverbund abschätzen, wenn die rechnerische Lastverteilung bekannt ist.

Verteilung der rechnerischen Lastverteilung

Die rechnerische Lastverteilung ist eine Größe, die sich für jedes Programm bestimmen lässt, das auf mehreren CPU-Kernen läuft. In den meisten Fällen hängt die rechnerische Lastverteilung nicht nur vom Programm selber ab, sondern auch vom bearbeiteten Datensatz. In jedem Rechenzentrum läuft ein eigener Mix von verschiedenen Programmen, jedes Programm bearbeitet verschiedene Datensätze. Zusätzlich ändert sich der Mix von Programmen und die damit bearbeiteten Datensätze alle paar Monate. Um die mögliche Effizienzsteigerung abzuschätzen, muss also untersucht werden wie viele Programme welche Lastverteilung besitzen.

Die Lastverteilung eines Programms ist eine Größe, die sich mit vorhandenen Analysewerkzeugen relativ leicht bestimmen lässt. Die Analyse erfordert aber die Mitarbeit der Benutzenden und kann daher längere Zeit in Anspruch nehmen. Die Bestimmung der Lastverteilung aller an einem Rechenzentrum laufenden Programme wäre eine zeitaufwendige Aufgabe. Die Verteilung der Lastverteilung wäre nur eine Momentaufnahme für ein Rechenzentrum wegen der Veränderungen im Programmmix. Um ein genaues Bild der Verteilung der Lastverteilung zu erhalten, müsste die Lastverteilung aller Programme in allen Rechenzentren bestimmt werden. Der Aufwand wäre enorm.

Im POP2 Projekt (Performance Optimisation and Productivity A Centre of Excellence in HPC) wurde in einem Zeitraum von drei Jahren von ca. zehn Wissenschaftler*innen die Lastverteilung von 115 Programmen bestimmt. Die analysierten Programme stammen aus verschiedenen Rechenzentren in Europa und wurden von den Benutzenden für die Analyse ausgewählt. Abbildung 30 zeigt die Verteilung der in POP2 bestimmten Lastverteilung. Die Breite der Balken beträgt 2,5 %. Die Y-Achse zeigt den Anteil der Codes mit einer LV im Wertebereich des Balkens. Aus diesem Histogramm wird deutlich, dass nur sehr wenige Programme sehr schlechte LV besitzen und nur sehr wenige Programme eine Lastverteilung über 97,5 % erreichen. Das Maximum der Verteilung liegt in dem Wertebereich 95–97,5 %. Abbildung 31 zeigt den kumulierten Anteil von Programmen in einem Wertebereich. Diese Darstellung

erlaubt es den Anteil aller Programme zu bestimmen, die eine Lastverteilung unterhalb eines bestimmten Wertes besitzen. Zum Beispiel besitzen 30 % aller untersuchten Programme eine Lastverteilung kleiner 80 %.

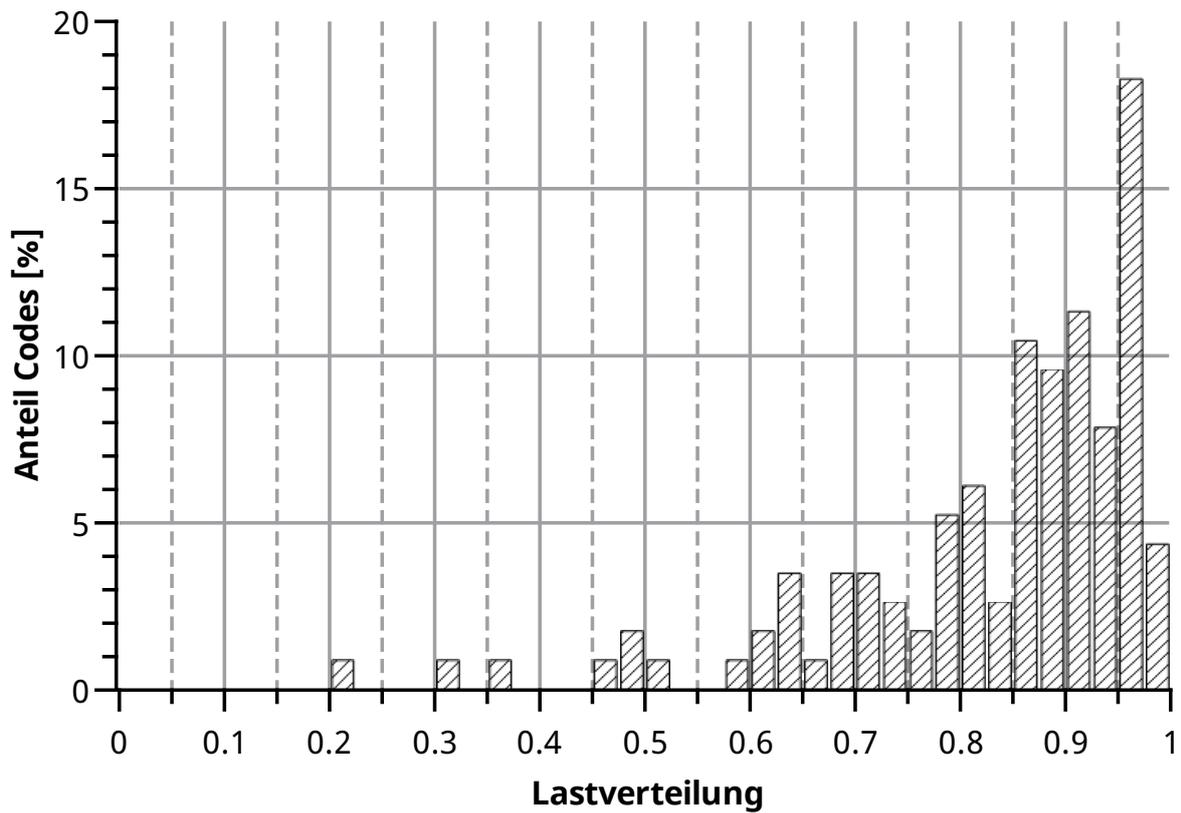


Abbildung 30: Verteilung der rechnerischen Lastenverteilung aus POP2

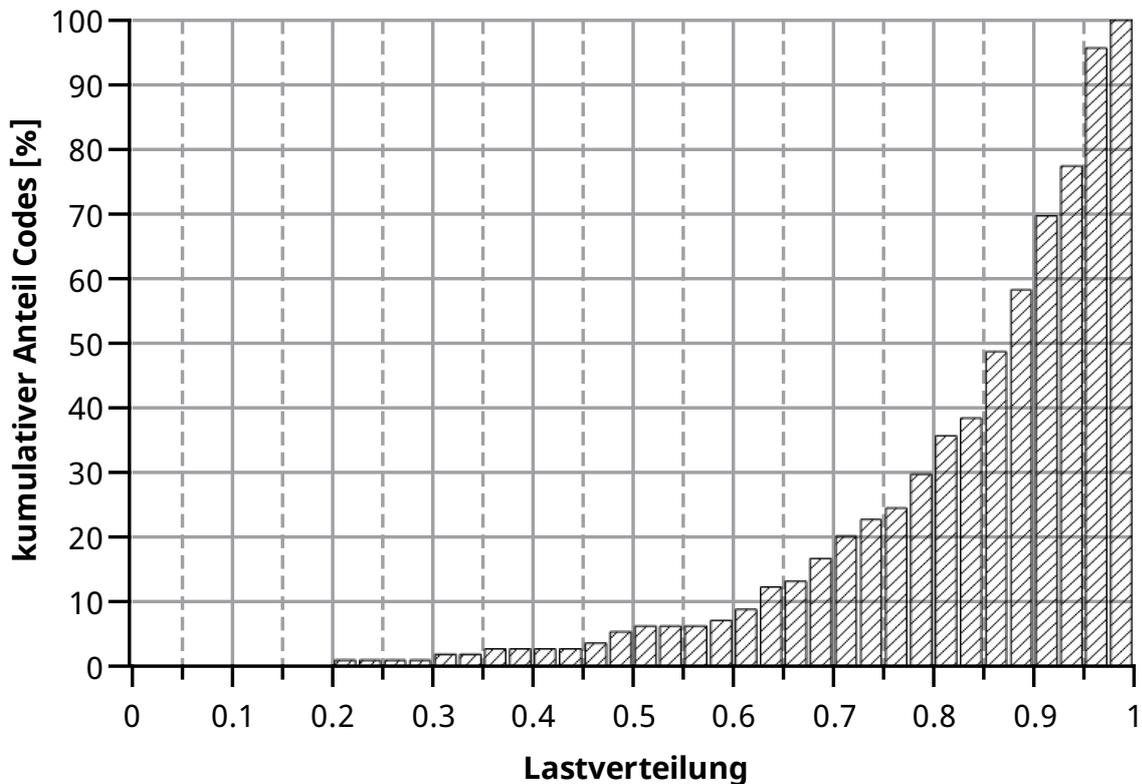


Abbildung 31: Kumulative Verteilung der rechnerischen Lastenverteilung aus POP2

Ein möglicher Ansatz zur Effizienzsteigerung ist die Verbesserung der Lastverteilung eines Programms. Die Ursache für eine reduzierte Lastverteilung ist entweder eine ungleichmäßige Verteilung von Instruktionen oder eine ungleichmäßige Geschwindigkeit, mit der Instruktionen abgearbeitet werden. Beides lässt sich in der Regel verbessern.

Um eine Effizienzsteigerung zu erreichen wird zunächst eine minimale Lastverteilung (LVmin) festgelegt. Programme mit einer Lastverteilung kleiner LVmin werden optimiert bis sie eine Lastverteilung von mindestens LVmin erreichen. Programme mit einer Lastverteilung größer LVmin werden nicht verändert. Mit der Optimierung der Lastverteilung verändert sich die Verteilung der Lastverteilung und damit die Energieaufnahme des Rechenzentrums. Abbildung 32 zeigt die Verteilung der Lastverteilung, nachdem alle Programme mit einer Lastverteilung kleiner 70% (LVmin = 70%) optimiert wurden. Theoretisch könnte die Optimierung eines Programms auch eine Lastverteilung größer LVmin liefern aber es wird hier angenommen, dass eine Optimierung zu einer Lastverteilung knapp über LVmin führt.

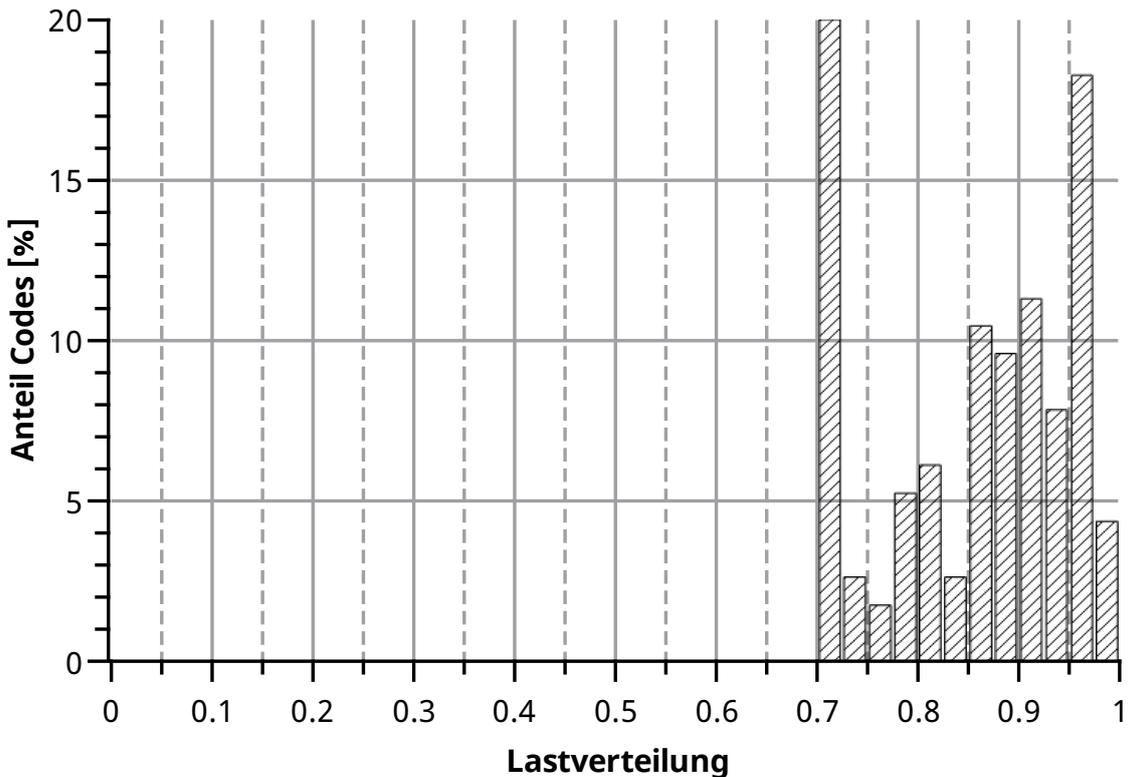


Abbildung 32: Verteilung der Lastverteilung nach der Optimierung mit $LV_{min} = 70\%$

Berechnung der Effizienzsteigerung durch Verbesserung der Lastverteilung

Der letzte Schritt in dieser Abschätzung ist die Berechnung der möglichen Effizienzsteigerung. Dazu werden folgende Annahmen gemacht:

1. Programme, die sich wie die CPU-Variante verhalten und Programme, die sich wie die MEM-Variante verhalten, sind gleich häufig. Die Anzahl aller Programme sei N .
2. Jeder Code nutzt gleich viel CPU-Zeit in einem Rechenzentrum.
3. Jeder Code nutzt im Idealfall bei Lastverteilung = 1 gleich viel Energie. Diese wird im Folgenden mit E_0 bezeichnet
4. Jeder Code mit einer Lastverteilung kleiner LV_{min} lässt sich so verbessern, dass die Lastverteilung größer LV_{min} wird.

Wenn die LV für alle Programme 1 ist, beträgt die zur Abarbeitung aller Programme benötigte Energie:

$$E_{opt} = N * E_0$$

Wenn die LV eine Verteilung ist, beträgt die zusätzlich benötigte Energie zur Abarbeitung aller Programme:

$$E_{extra_LV} = \sum_{i=1}^S E_0 * N_i * E_{extra}(LV_i)$$

S ist die Anzahl der Intervalle im Histogramm, LV_i ist die Lastverteilung in Intervall i und N_i ist die Anzahl von Programmen in Intervall i .

Die Gesamtenergie, die benötigt wird um N Programme mit einer gegebenen Lastverteilung abzuarbeiten ist die Summe aus E_{opt} und E_{extra_LV} :

$$E_{tot} = E_{opt} + E_{extra_LV}$$

Teilt man E_{tot} durch E_{opt} erhält man eine geeignete Größe um die Effizienzsteigerung durch Verbesserung der Lastverteilung darzustellen:

$$H_{LV} = \frac{E_{tot}}{E_{opt}}$$

Mit den vorliegenden Modellen ist es möglich H_{LV} für verschiedene Optimierungsziele zu bestimmen. Tabelle 31 zeigt H_{LV} für die MEM-Variante und die CPU-Variante für verschiedene Optimierungsziele. Die Referenz für die Bestimmung der Effizienzsteigerung bildet die Verteilung der Lastverteilung aus POP2. In Klammern ist der Unterschied zur Referenz angegeben. Dieser Wert entspricht der möglichen Energieeinsparung. Die rechte Spalte gibt an, welcher Anteil der Codes optimiert werden muss.

Lastverteilung	MEM-Variante H_LV	CPU-Variante H_LV	Anteil Codes optimiert
POP2	1,032 (Referenz)	1,181 (Referenz)	0 %
LVmin >= 60%	1,013 (-1,8 %)	1,148 (-2,8 %)	7 %
LVmin >= 70%	1,008 (-2,3 %)	1,128 (-4,5 %)	17 %
LVmin >= 80%	1,003 (-2,8 %)	1,097 (-7,1 %)	29 %
LVmin >= 90%	1,000 (-3,1 %)	1,052 (-11 %)	58 %
LVmin >= 95%	1,000 (-3,1 %)	1,021 (-13,5 %)	77 %

Tabelle 31: Energieeffizienz für die Ausgangssituation und verschiedene Optimierungsziele für CPU- und MEM-Variante

Effizienzsteigerung durch Portierung

Eine andere Möglichkeit zur Steigerung der Energieeffizienz ist die Portierung von Codes. Portierung kann dabei mehrere Bedeutungen haben. Die einfachste Form der Portierung ist das Ausführen eines Programms auf einem CPU-Systemen das mit der für die Anwendung optimalen CPU bestückt ist. Nach der Installation eines Computersystems kann die CPU aber nicht getauscht werden, der Ansatz bietet also wenig Spielraum. Der Aufwand für die Portierung auf ein anderes CPU-System mit gleicher Architektur ist gering. Der Aufwand steigt, wenn ein Code auf ein CPU-System mit anderer Architektur (z.B. ARM oder IBM Power) portiert wird.

Die Portierung auf eine andere Architektur (hier GPU) ist die aufwendigste Form der Portierung. Der Aufwand lässt sich nicht pauschal bestimmen, er ergibt sich durch die Lesbarkeit des Codes, die Erfahrung der programmierenden Person, die Komplexität des Algorithmus und so weiter. Oft ist es aber so, dass Teilprogramme zur Erstellung des Datensatzes oder zur Auswertung weiter genutzt werden können und nur der eigentliche Löser portiert werden muss. Im Löser fallen die aufwendigsten Berechnungen an.

Zur Bestimmung der Effizienzsteigerung durch Portierung auf GPUs muss ein Programm in der CPU-Version und in der GPU-Version vorliegen. Um einen fairen Vergleich anzustellen, muss darauf geachtet werden, dass beide Programme den gleichen Algorithmus implementieren und den gleichen Datensatz bearbeiten. In diesem Arbeitspaket werden die zwei Programme „sparta“ (stanmoore1 2022) und „PI-DSMC“ (PI-DSMC) verglichen. Beide Programme implementieren die DSMC-Methode (WikiChip LLC 2023) und berechnen den Testfall eines ruhenden Gases in einer Box. Natürlich können aus dem Vergleich zweier Programme keine allgemeingültigen Aussagen abgeleitet werden aber es zeigt das Potential der Methode.

Die CPU-Variante wurde auf dem CPU-Teil von HAWK ausgeführt und die GPU-Variante auf dem GPU-Teil von HAWK. Bei der Ausführung der Programme wurden die elektrische Leistung und die Rechenleistung gemessen. Die Rechenleistung ist hier eine anwendungsspezifische Metrik mit der Einheit „Operationen pro Sekunde“, je höher desto besser. Die CPU-Variante wurde auf 4, 8, 16, 32 und 64 Rechenknoten ausgeführt und die GPU-Variante auf 1 oder 2 Rechenknoten.

Die Ergebnisse dieses Experiments sind in Abbildung 35 dargestellt. Die schwarzen Symbole gehören zur CPU-Version und die roten Symbole gehören zur GPU-Version. Die X-Achse zeigt die Rechenleistung in der Einheit „Operationen pro Sekunde“ und die Y-Achse zeigt die benötigte Energie pro Operation. Die Symbole repräsentieren die Datenpunkte, die Linien zwischen den Symbolen erlauben einen Vergleich der CPU-Version und der GPU-Version. Die Zahlen neben den Symbolen geben die Zahl der verwendeten Rechenknoten an. Für die CPU-Version ist die Zahl der Rechenknoten von links nach rechts immer 4, 8, 16, 32 und 64. Bei der GPU-Version sind es von links nach rechts 1 oder 2 Rechenknoten. Es wurde 4 Datensätze untersucht, die mit *c*, *d*, *e* und *f* gekennzeichnet sind. Die Größe der Datensätze steigt von einem Datensatz zum nächsten jeweils um den Faktor 4.

Die Kurven in Abbildung 33 haben alle die gleiche Form, aber sie zeigen unterschiedliche Ausschnitte. Die Energie pro Operation (EPO) nimmt zuerst mit steigender Zahl von Rechenknoten ab bis die EPO ein Plateau erreicht, siehe Kurve *d-CPU*. Wenn die Zahl der Rechenknoten weiter erhöht wird, steigt EPO immer steiler während die Rechenleistung immer langsamer steigt, siehe Kurve *c-CPU*. Die Kurven *c-CPU* und *d-CPU* deuten darauf hin, dass das Plateau bei der gleichen EPO liegt. Der Vergleich der CPU-Kurven und der GPU-Kurven für alle Datensätze zeigt, dass die CPU-Version nur für den Datensatz *c* effizienter ist als die GPU-Version. Für alle größeren Datensätze ist die GPU-Version effizienter als die CPU-Version. Für den nächstgrößten Datensatz *d* ist die EPO für beide Versionen ungefähr gleich. Mit steigender Größe des Datensatzes steigt der Abstand zwischen CPU-Version und GPU-Version in Y-Richtung. Für Datensatz *e* liefert die GPU-Version eine Rechenleistung $1,93e10$ Operationen/s mit 2 Rechenknoten bei einer EPO von zirka $2,5e-7J$. Bei der gleichen Rechenleistung erreicht die CPU-Version eine EPO von zirka $5,8e-7J$. Der Energieverbrauch der GPU-Version liegt um 57 % unter dem Energieverbrauch der CPU-Version. Für den Datensatz *f* liefert die GPU-Version eine Rechenleistung von $2,1e10$ Operationen/s mit 2 Rechenknoten bei einer EOP von $2,3e-7J$. Die CPU-Version erreicht bei dieser Rechenleistung eine EPO von $7,6e-7J$. Für den Datensatz *f* liegt der Energieverbrauch der GPU-Version also um 70% unter dem der CPU-Version.

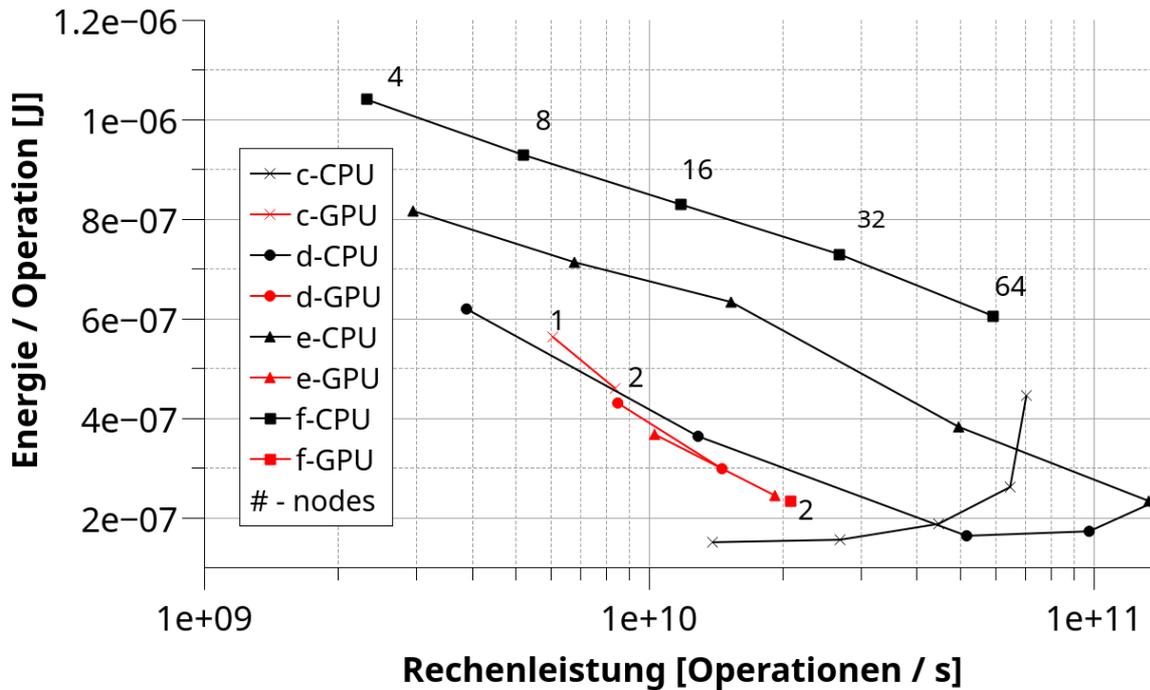


Abbildung 33: Energiebedarf für CPU- und GPU-Variante als Funktion der Rechenleistung

4.5.2 Abschätzung des nötigen Personalaufwands zur Umsetzung

Eine seriöse Abschätzung des benötigten Personalaufwands ist nicht möglich, da jeder einzelne Faktor, der zum Personalaufwand beiträgt, mit großen Fehlerbalken verbunden ist. Die einzelnen Faktoren werden im Folgenden erläutert:

- Die Anzahl der zu optimierenden Programme ist unbekannt. Aus den Energiemessungen lassen sich zwar die Nutzenden, die einen Großteil der Energie verbrauchen, bestimmen, aber aus einer kleinen Zahl von Nutzenden folgt nicht automatisch eine kleine Zahl von Programmen.
- Die Nutzungsdauer der Programme und damit deren Beitrag zum Energieverbrauch ist unterschiedlich. Wenn eine Optimierung also gelingt könnte daraus trotzdem nur eine kleine Einsparung an Energie resultieren.
- Die Verteilung der Lastverteilung ist nur für eine große Zahl von Programmen über einen großen Zeitraum bekannt. Für ein einzelnes Rechenzentrum ist die Verteilung der Lastverteilung unbekannt. Es ist also nicht klar, welche Verbesserung der Lastverteilung für ein Rechenzentrum zu einem gegebenen Zeitpunkt möglich ist.
- Der Zeitaufwand für die Verbesserung der Lastverteilung eines einzelnen Programms ist nicht vorhersehbar. Es ist sicher einfach eine niedrige Lastverteilung zu verbessern als eine hohe Lastverteilung. Der Zeitaufwand ergibt sich aus der Komplexität des Programms, der Lesbarkeit des Quellcodes und der Erfahrung des Programmierenden.
- Es gibt Programme, die eine zeitlich veränderliche Lastverteilung haben. Diese Programme sind komplex und daher besonders schwer zu optimieren.
- Die Zeit, die bereits in die Optimierung von Programmen geflossen ist, unterscheidet sich von Programm zu Programm. Je mehr Zeit in die Optimierung geflossen ist, desto schwerer wird es den Code weiter zu verbessern. Zum Teil liegt das daran, dass der Code bei der Optimierung komplexer wird.

Eine Aussage in der Form „Ein Programmierer kann die Lastverteilung eines Codes in x Monaten um 10 % erhöhen“ ist nicht möglich. Es bleibt nur die Möglichkeit die Nutzenden nach ihren Erfahrungen

zu fragen. Für diesen Zweck wurden die Teilnehmenden von zwei Performance Optimierungsworkshops am HLRS gebeten einen Fragebogen auszufüllen. Von ca. 20 Teilnehmenden haben drei den Fragebogen ausgefüllt. Die Fragen und die dazugehörigen Antworten der Teilnehmenden sind im Folgenden aufgelistet wobei jeder Buchstabe einer/m Teilnehmer*in entspricht.

1. Gab es Optimierungen der Referenzversion, welche die Laufzeit der Anwendung für einen festen Datensatz reduziert haben?
 - a. Ja
 - b. Über die Skriptsprache Ja. Im Detail konnte die Lastverteilung mit Parmetis gesteuert werden.
 - c. Ja
2. Um welchen Faktor konnte die Laufzeit reduziert werden?
 - a. 25 % Reduktion
 - b. Wenn die optimale Zahl von Rechenknoten gefunden wurde bis zu einem Faktor 3 für manche Anwendungen.
 - c. I/O Test: Faktor 2-3 im Vergleich zur Referenz. Realer Fall: Marginal, aber Randbedingungen sind jetzt viel schneller.
3. Wie viel Zeit haben Sie oder Ihre Kollegen verbracht um Optimierungsmöglichkeiten zu finden und umzusetzen?
 - a. 2 Wochen verteilt über mehrere Monate
 - b. Die Optimierung des zugrundeliegenden C++ Codes haben wir nicht selber gemacht. Basierend auf dem was wir vom Job-Skript kontrollieren können und dem verwendeten Lua Skript, würde ich sagen ca. 10 % unserer verbrauchten Zeit. Die „test“ Warteschlange war dafür nützlich.
 - c. I/O Test: 8 Tage im Workshop plus Wochen zwischen den Workshops.
4. Haben Sie aktiv nach Optimierungsmöglichkeiten, welche die Laufzeit verringern, gesucht oder wurde die Optimierungsmöglichkeit zufällig gefunden?
 - a. Nach den meisten aktiv gesucht, aber einige Verbesserungen wurden durch ausprobieren gefunden.
 - b. Wir testeten aktiv einige Konfigurationen.
 - c. Es war geplant die Optimierungsmöglichkeiten anzugehen.
5. Welche Techniken und Werkzeuge haben Sie benutzt, um nach Optimierungsmöglichkeiten zu suchen?
 - a. uProf, ScoreP, Vampir; Laufzeitmessungen von Modifikationen
 - b. Bis jetzt hat unser Profiler nicht korrekt gearbeitet, wir haben lua.clock verwendet, um einen Eindruck dafür zu bekommen, welche Regionen den Code ausbremsen. Ein weiteres Maß der Leistung war für uns die Zahl der Zeitschritte, die wir pro Optimierungsschritt für ein Problem mit Größe n lösen können. Wir versuchen verschiedene Dinge, z.B. Einstellungen der Gebietsaufteilung, Anzahl der benutzten Kerne pro Rechenknoten, numerische Löser, automatische Lastverteiler, um die maximale Zahl von Schritten in einem 25min Test in der „test“ Warteschlange zu erreichen. Meistens war die Zahl der Kerne pro Rechenknoten der größte Stellhebel.
 - c. Darshan, Laufzeitmessungen

Aus den Antworten wird deutlich, dass die Optimierung eines Programms eine langwierige Aufgabe mit ungewissem Ausgang ist. Alle Teilnehmenden geben in Frage 1 an, dass die Bemühungen zu einer Verbesserung des Codes führen. Die Mühe lohnt sich also immer. Frage 2 zeigt, dass die erreichte Reduzierung der Laufzeit zwischen nahezu Null und einem Faktor 3 schwankt. Der Fall mit nahezu Null Verbesserung bedeutet, dass entweder keine weitere Optimierung möglich ist oder diese nicht gefunden wurde. Der Fall mit der Verbesserung um den Faktor 3 ist eher ein Einrichten des Programms auf dem Computersystem als eine Optimierung durch Veränderungen am Programmcode. Frage 3 zeigt,

dass eine Optimierung oft nicht am Stück vorgenommen wird, sondern verteilt über einen längeren Zeitraum. Ein Grund für die Aufteilung der Optimierung ist, dass Ansätze zur Verbesserung oft gesucht werden müssen. Verbesserungen am Code wechseln sich ab mit Phasen der Codeanalyse und der Ideenfindung. Daraus folgt, dass für die Optimierung nicht nur Zeit für die Umsetzung, sondern auch für die Ideenfindung und für die Codeanalyse eingeplant werden muss. Frage 4 zeigt, dass Nutzende von sich aus nach Optimierungen suchen und sie nutzen die Laufzeit des Programms als Metrik.

Zusammenfassend lässt sich sagen: Potenzial zur Effizienzsteigerung durch effiziente Programmierung ist vorhanden. Je nach Anwendung und Optimierungsziel wurde in dieser Arbeit eine mögliche Effizienzsteigerung von 2 % bis 13,5 % durch Codeoptimierung abgeschätzt. Durch Portierung auf GPU-Systeme konnte an einem Beispiel eine Reduktion des Energieverbrauchs um 70 % gezeigt werden. Der personelle Aufwand ist hoch und im Vorhinein kann nicht gesagt werden, welcher Personalaufwand zu welcher Verbesserung führt.

4.6 Arbeitspaket 3.3 – Intelligente Netze

In diesem Arbeitspaket soll der Einfluss der Firmwareerweiterung SHARP (NVIDIA Corporation & affiliates 2021) auf die Energieeffizienz untersucht werden. SHARP ist eine Technologie, welche die Leistung der MPI-Kommunikation verbessert, indem kollektive Operationen von der Netzwerkhardware ausgeführt werden und nicht von der CPU. Die Netzwerkhardware besitzt spezielle Schaltungen für diesen Zweck und arbeitet dadurch schneller und effizienter als die CPU. SHARP spart also CPU-Zeit und verkürzt damit die Laufzeit von Programmen, was zu einer Effizienzsteigerung führt. SHARP beschleunigt nur kollektive Operationen an den alle Programme aus einem Programmverbund teilnehmen. Punkt-zu-Punkt-Kommunikationen profitieren nicht von SHARP. SHARP führt also nur bei den Programmen zu einer Effizienzsteigerung, die kollektive Kommunikation benutzen. Je größer der Anteil von kollektiver Kommunikation an der Laufzeit ist, desto größer ist das Einsparungspotenzial. Besonders wichtig wird die Beschleunigung von kollektiver Kommunikation, wenn Programme auf sehr vielen Rechenknoten laufen, da der Anteil von Kommunikation mit der Zahl der Rechenknoten zunimmt.

Während der Projektlaufzeit konnte die SHARP-Firmware auf HAWK nicht in Betrieb genommen werden. Es liegen aber Ergebnisse vor, die von HPE auf HAWK zu Testzwecken gesammelt wurden. In diesen Tests ist nicht die volle Leistungsfähigkeit von SHARP zu sehen, da die installierten Treiber nur einen Teil der Funktionen von SHARP unterstützen. Die vorliegenden Ergebnisse sind in den folgenden Abbildungen dargestellt. Kleinere Werte für die maximal vergangene Zeit sind besser. Auf eine numerische Auswertung wird verzichtet, da die Ergebnisse deutlich unter den erwarteten Werten liegen. Abbildung 34 zeigt, dass SHARP für Broadcast Operationen Vorteile bringt. In Abbildung 35 und Abbildung 36 ist das Bild nicht mehr eindeutig, die Werte mit SHARP liegen teilweise über den Werten ohne SHARP.

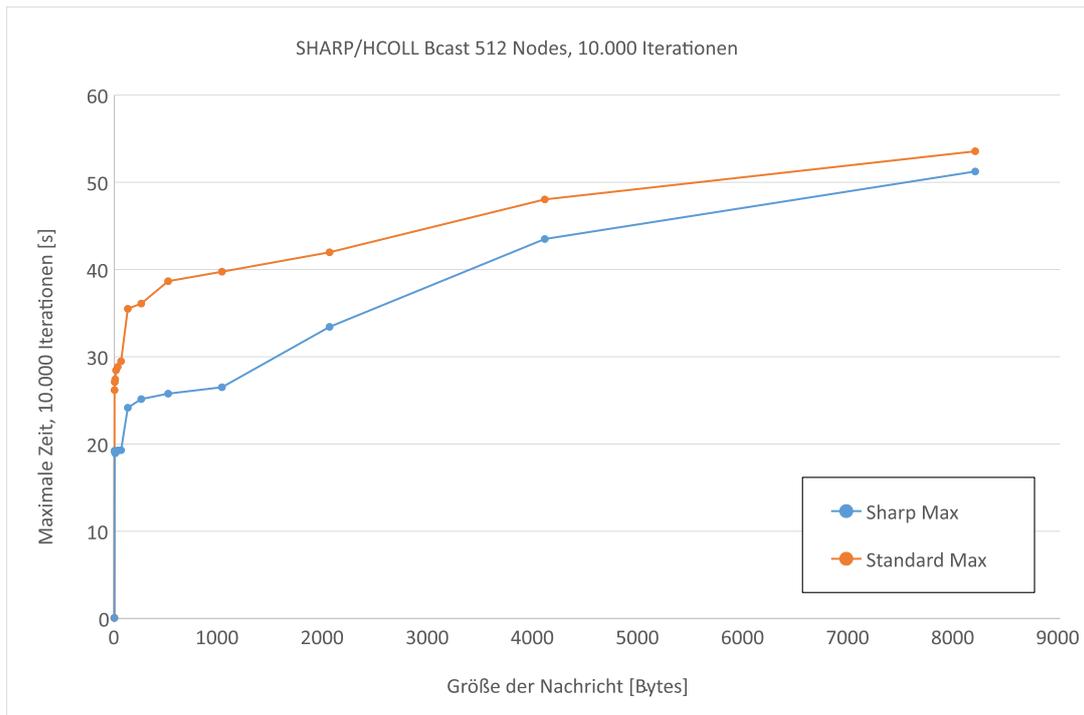


Abbildung 34: Maximale Zeit für Broadcast Operationen

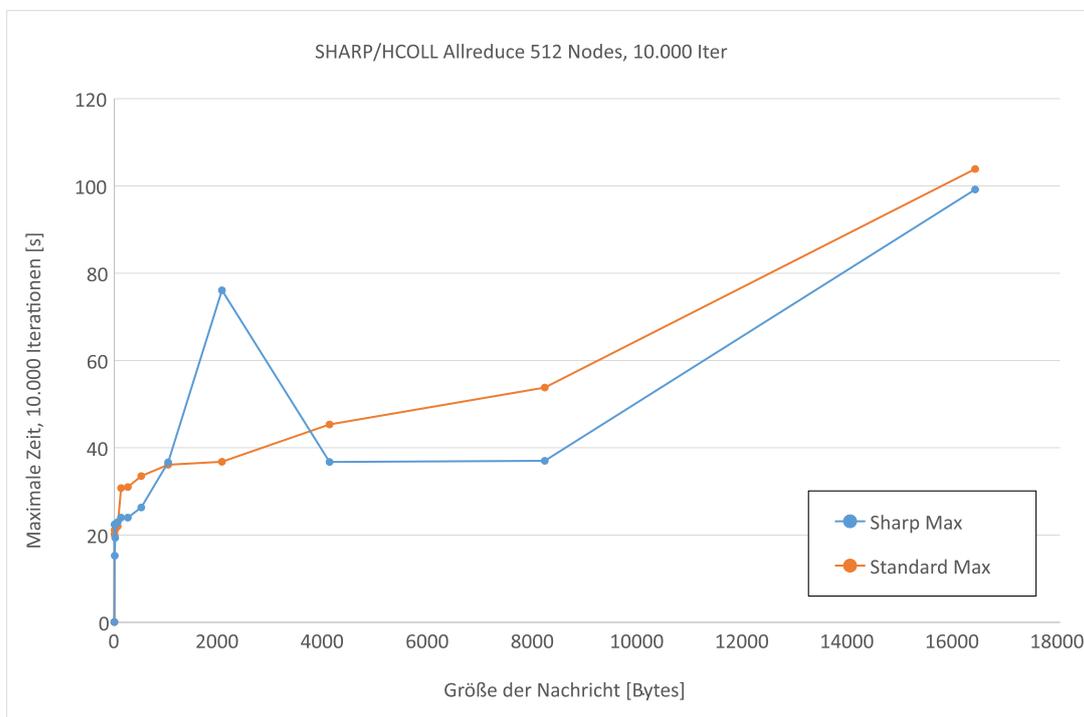


Abbildung 35: Maximale Zeit für Allreduce-Operationen

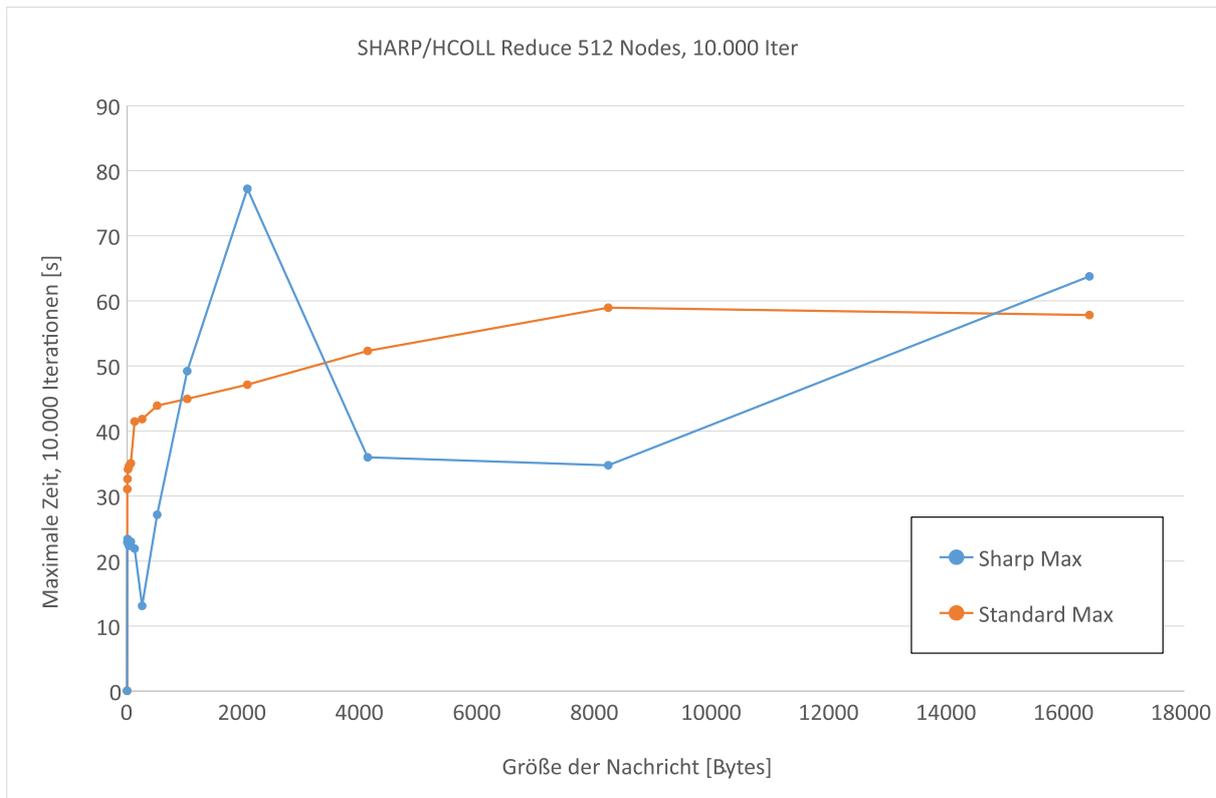


Abbildung 36: Maximale Zeit für Reduce-Operationen

4.7 Arbeitspaket 3.4 – Betrieb digitaler Infrastrukturen – Office, Telekommunikation, Media

Wie bereits im Kontext von Arbeitspaket AP2.4 dargelegt, müssen wir zwischen Beschaffung und Nutzung von IT-Infrastruktur unterscheiden. Dabei gilt zudem, dass Outsourcing zwar den Infrastruktur CO₂-Fußabdruck reduzieren kann, aber zusätzlichen CO₂ durch die Internet-Verbindung produziert.

Die primären erfassten Eckdaten sind:

- Produktion eines Rechners (Laptop oder Desktop) erzeugt um die 300 kg CO₂
- Nutzung eines Desktop Rechners bei 8h/Werktag liegt bei 39 kg CO₂/Jahr
- Laptop Nutzung (8h/Werktag) liegen bei 27 kg CO₂/Jahr
- Ein Monitor (8h/Werktag) liegt bei 9 kg CO₂/Jahr
- Lebensdauer eines Laptops 3–5 Jahre
- Maximale Lebensdauer eines Desktops 10 Jahre
- 1 Server Dauernutzung ca. 1000 kg CO₂/Jahr
- 1 GB Daten über das Internet benötigen 10–30 g CO₂
- 1 GB Daten im Intranet liegen bei 1–3 g CO₂
- Zoom-Meetings produzieren ca. 3kg CO₂/Jahr bei regelmäßigen Meetings mit 10 Mitarbeitenden

5 Arbeitspaket 4 – Anwenderperspektiven

5.1 Ziele

Innovative technische Anwendungen können immer auch zu ambigen Wirkungsketten und nicht-intendierten Nebenfolgen führen, die bei einer rein technischen Betrachtung nicht in den Fokus gelangen. Ein zentraler Aspekt sind in diesem Zusammenhang die Technologieanwendenden, die entscheidenden Einfluss auf die Wirkung einer Innovation nehmen können. So ist die Frage der Energie- und Ressourceneffizienz von technischen Maßnahmen eng verknüpft mit der Nutzerperspektive, insofern die Erreichung von Effizienzzielen auch von einer ressourcenschonenden Umsetzung durch die jeweiligen Anwendenden abhängt. Aus diesem Grund ist es wichtig, Folgen und Nebenfolgen zu betrachten und die Perspektive der möglichen Umsetzung durch die Anwendenden auf ihr praktisches Potential zu untersuchen.

Vor diesem Hintergrund war es zum einen das Ziel von Arbeitspaket 4, ausgewählte Digitalisierungstrends hinsichtlich deren Potentialen und Risiken für energetische und ressourcenbezogene Einsparpotentiale zu analysieren. Das zweite Ziel von Arbeitspaket 4 bestand darin, nutzerbezogene Potentiale der Ressourcen- und Energieeffizienz zu eruieren und hemmende sowie fördernde Faktoren für deren Umsetzung zu identifizieren.

5.2 Methoden

Zur Erreichung dieser Ziele wurden die folgenden zwei Methoden eingesetzt.

5.2.1 Experten-Workshops

Die Methode eines Experten-Workshops wurde zweifach eingesetzt. Entscheidend für die Qualität ist dabei im ersten Schritt die Auswahl und Rekrutierung der Teilnehmenden, um sowohl verfügbares Wissen der Fachwelt wie auch potentielle Bewertungen für die jeweilige Fragestellung zu erfassen. Den spezifischen Fragestellungen und Zielen der Workshops folgend wurde die Auswahl der Expert*innen anhand von Kriterien wie Profession, Expertise, Erfahrung und berufliche Position festgelegt. Die Ziele und Fragestellungen bestimmten überdies die methodische Konzeption sowie den Ablauf der Workshops, wobei jeweils ein Mix aus Impulsvorträgen, Arbeitsgruppen und Plenumsdiskussionen umgesetzt wurde. Pandemiebedingt fanden beide Experten-Workshops als je vierstündige Online-Meetings statt, und zwar am 23.11.2021 mit 22 Teilnehmenden und am 1.12.2021 mit 14 Teilnehmenden.

5.2.2 Fokusgruppen

Die Methode der Fokusgruppe ist seit Jahrzehnten ein unverzichtbarer Bestandteil des Instrumentariums der qualitativen Sozialforschung. Die Methode befindet sich an der Schnittstelle zwischen reinem Data Mining im Sinne einer Datenerhebung und partizipativen und deliberativen Ansätzen. Es handelt sich um eine nicht-repräsentative Methode, d.h. die Daten und Ergebnisse sind nicht repräsentativ für die Allgemeinbevölkerung. Stattdessen untersuchen Fokusgruppen die zugrundeliegende Rationalität der Handlungen, Erfahrungen, Meinungen und Gruppendynamik der Teilnehmer (Appleton, E. Ladikas, K. Richter, M. 2022; Bloor et al. 2001; Jenny Kitzinger 1994; Tausch und Menold 2015; Zwick, M.M., Schröter, R. 2012). Im Juli 2022 wurden auf der Grundlage eines detaillierten Gesprächsleitfadens zwei Online-Fokusgruppen mit je sieben Personen und einer Dauer von je 2,5 Stunden durchgeführt.

5.3 Ergebnisse

Die in Arbeitspaket 4 bearbeiteten Ziele und eingesetzten Methoden waren inhaltlich auf die Themenbereiche Videostreaming und Homeoffice ausgerichtet. Die dabei erreichten Ergebnisse werden im Folgenden geschildert.

5.3.1 Themenbereich Videostreaming

Unter dem Begriff Videostreaming wird hier das Streaming von Online-Videos verstanden, d.h. kostenfreie oder kostenpflichtige Videoinhalte von Video-Plattformen (z.B. YouTube), Video-on-Demand-Plattformen (z.B. Netflix) und Mediatheken von Fernsehsendern (z.B. ARTE-Mediathek) sowie Videoinhalte, die in Sozialen Netzwerken (z.B. Facebook) geteilt oder auf anderen Websites (z.B. Spiegel.de) eingebunden werden.

Der in diesem Themenbereich am 1.12.2021 durchgeführte Online-Experten-Workshop beleuchtete mögliche mittelfristige Entwicklungen von Videostreaming und widmete sich der Frage nach den damit verbundenen Auswirkungen auf Klima und Umwelt. Ziel des Workshops war die Identifizierung von vielversprechenden Potenzialen für ein energie- und ressourceneffizienteres Videostreaming und darauf aufbauend die Entwicklung von Handlungsoptionen für die nächsten drei bis fünf Jahre in den Handlungsfeldern Streaming-Angebote und Nutzungskontexte sowie Technologie und Infrastruktur (Dratsdrummer, F., Konrad, W., & Scheer, D.)

Handlungsoptionen im Bereich Streaming-Angebote und Nutzungskontexte

Nach Ansicht der Expert*innen deuten mehrere Trends darauf hin, dass die Zuwachsraten der durch Videostreaming verursachten Datenmengen in den nächsten Jahren weiter anwachsen werden. Dies liege zum einen an der Fortsetzung des bestehenden Trends zur Verlagerung der Nutzung von linearen Fernsehangeboten hin zu einer „Mediathekenkultur“. Die steigende Attraktivität von Video-on-Demand (VoD) spiegele sich den Expert*innen zufolge insbesondere darin wieder, dass weltweit etablierte Medienkonzerne, wie z.B. Disney, Paramount Pictures und Warner Media, nun mit eigenen Plattformen in den VoD-Markt eingetreten sind bzw. dies vorhaben.

Mit dem Trend der Verlagerung der Nutzung vom klassischen Fernsehen zu Video-on-Demand sind für die Expert*innen hinsichtlich Gesamtenergiebedarf und Klimawirkung folgende Implikationen zentral: (1) Mit zunehmender Nutzung von VoD-Angeboten erhöhen sich auch die Datenmengen, die auf Ebene der Rechenzentren und Datenübertragungsnetze bereitgestellt, verteilt und übertragen werden müssen. Damit sind höhere Energieverbräuche verbunden mit letztlich höheren Treibhausgasemissionen, solange der Strommix noch Anteile fossiler Energiequellen enthält. (2) Die Verlagerung vom klassischen Fernsehen zu Video-on-Demand bedeutet keinesfalls auch eine Verlagerung des Energiebedarfs, sondern insgesamt einen Mehrbedarf an Energie. Beim klassischen Fernsehen erfolgt die Übertragung von Videodaten über Rundfunk-Technologien (terrestrisch oder per Satellit), deren Energiebedarf von der Größe und den geographischen Gegebenheiten des zu erreichenden Empfangsgebietes bestimmt ist und nur in geringem Maße von der tatsächlichen Nutzung abhängt. Eine verminderte Nutzung des über Rundfunk ausgestrahlten Fernsehens hat somit nicht einen geringeren Energiebedarf zur Folge. Aus diesem Grund könne aus Sicht der Expert*innen mittelfristig eine Diskussion darüber angebracht sein, die Übertragung des klassischen Fernsehens komplett auf das Internet umzustellen und obsoletere Rundfunk-Technologien für den Dauerbetrieb abzuschalten und diese ggf. nur für eine Wiederinbetriebnahme in Krisenfällen bereitzuhalten.

Dass in der weiteren Entwicklung des Videostreaming-Marktes das lineare Fernsehen (bzw. Live-TV über Streaming) als Konzept gänzlich an Bedeutung verlieren könne, wurde nicht vermutet. Vielmehr gehen die Expert*innen davon aus, dass das Feld für Videostreaming-Anwendungen zunehmend heterogener wird und sich neben (linearem) Live-TV oder Video-on-Demand aus einer zunehmenden Vielfalt weiterer Videostreaming-Formate zusammensetzt. So sei heute bereits eine weitere Ausdifferenzierung des Videokonsums feststellbar, in der sich neben etablierten Anwendungsformaten wie Mediatheken, Videostreaming-Plattformen und Online-Videos auf Facebook und Twitter weitere neuartige und alternative Videostreaming-Formate und -Konzepte (wie z.B. gegenwärtig Snapchat, TikTok oder Twitch) herausbilden. Ein zentraler Treiber dieser Entwicklung stellt für die Workshop-Teilnehmenden die wachsende Vielfalt den Nutzenden zur Verfügung stehenden Endgeräte dar, mit denen Online-Videos einfacher konsumiert oder produziert werden könnten. So verfügen heute bereits viele

Haushalte über ein breites Repertoire an Endgeräten (z.B. Fernseher, Smartphone, Desk- und Laptop-Computer, Tablets), die in den nächsten Jahren durch weitere Endgeräte ergänzt werden (z.B. Smart Watches, Virtual Reality- bzw. Augmented Reality-Brillen, Smart Glasses). So rechnen die Expert*innen mit einer generellen Zunahme von Endgeräten in den nächsten Jahren mit einem Schwerpunkt auf Videostreaming-Nutzung mittels kleinerer Geräteklassen. Zwar gehe von diesen prinzipiell ein geringerer Energieverbrauch aus, dennoch könnten auch darauf relativ hohe Datenmengen beim Videostreaming anfallen mit der Folge, dass in der Summe schließlich höhere Energieverbräuche auf Ebene der Rechenzentren und Datenübertragungsnetze anfallen. Zudem wären z.B. mit neueren Gerätegenerationen von Virtual-Reality-Brillen beim Streaming weitaus höhere Datenmengen verbunden, da diese einerseits relativ hohe Videoauflösungen ermöglichen (für welche mehr Daten benötigt werden) und andererseits die doppelte Menge an Videodaten erforderten, da zwei Bildschirme (einer je Auge) mit je eigenen Videodaten angesteuert werden.

Weitere technologische Innovationen und funktionale Vielfalt von Endgeräten ermöglichten eine immer höhere Flexibilität zur Nutzung von Videostreaming an unterschiedlichen Orten (z.B. Wohnzimmer, Küche, Garten, Büro, unterwegs in Bus und Bahn) und zu unterschiedlichen Zwecken (z.B. Kochen nach Videorezept; Tablet als Second Screen während des Fernsehens). In der Gesamtbetrachtung dieser Trends ist es aus Sicht der Teilnehmenden des Workshops vorstellbar, dass die steigende Flexibilität bei Konsum und Produktion von Videostreams in den nächsten Jahren eine zunehmende Integration von Videostreaming in weitere Bereiche des Alltags begünstigt. In diesem Kontext würde Videostreaming als Massenphänomen nicht nur eine mittelfristige Verlagerung vom klassischen Fernsehen zu einer Mediathekenkultur bedeuten, sondern darüber hinaus eine langfristige Entwicklung, in der Videostreaming immer enger mit dem Leben der Nutzenden verwoben wird. Dementsprechend schätzten die Workshop-Teilnehmenden, dass weitere Steigerungen der Videostreaming-Nutzung weniger dadurch veranlasst würden, dass Nutzende mehr Zeit vor dem Fernseher verbringen, sondern vielmehr in der wachsenden Anzahl an Nutzungskontexten begründet liegen, in welchen Videostreaming in der Gesellschaft angewendet wird.

Die Zunahme der Datenmengen beim Videostreaming ergibt sich nicht nur infolge wachsender Nutzungszahlen und durch vermehrt im Internet abgerufener Videostreams. Immer mehr ins Gewicht fallen aus Sicht der Expert*innen die wachsenden Dateigrößen je Videostreaming-Stunde im Zuge des Trends zunehmender Qualitätssteigerungen bzw. Videoauflösungen. Durch den technologischen Fortschritt im Bereich der Endgeräte und Rechenzentrums-Hardware ist für das Videostreaming mittlerweile ein Qualitätsniveau erreicht worden, das die Expert*innen unter den Gesichtspunkten Klimawirkungen und Energieeffizienz kritisch bewerten. Schließlich erhöhe sich die Datenmenge eines Streams bei höheren Auflösungen um ein Vielfaches, so bei einer Qualitätssteigerung von Full HD auf 8K um ca. den Faktor 20. Nach der Experten-Argumentation würden höhere Videoauflösungen ab einer bestimmten (von der Displaygröße des verwendeten Endgeräts abhängigen) Schwelle jedoch keinen zusätzlichen Nutzen mehr bieten. Ab dieser brächten nächsthöhere Auflösungsstufen kaum feststellbare Unterschiede bei der Videoqualität, wobei sich jedoch der Datenbedarf um ein Vielfaches erhöhe. Da dieser Sachverhalt vielen Nutzenden nicht bekannt wäre und die Streaming-Qualität nur von wenigen herunterreguliert werde, könnten unnötig hohe Auflösungen den Expert*innen zufolge dadurch vermieden werden, indem Videostreaming-Dienste (z.B. als Standardeinstellung) die Videoauflösungen automatisch an die Displaygröße des verwendeten Endgeräts anpassen.

Die Expert*innen formulierten zum Handlungsfeld Streaming-Angebote und Nutzungskontexte als Grundsatz, dass ordnungspolitische Interventionen im Bereich Videostreaming immer auch zum Ziel haben sollten, Videostreaming-Nutzende eigenmotiviertes nachhaltiges Verhalten prinzipiell zu ermöglichen und zu vereinfachen. Schließlich mangle es bei vielen Nutzenden weniger an der Motivation zum nachhaltigen Verhalten, als vielmehr am Wissen darüber, dass ihr Streaming-Verhalten Effekte auf die Klimawirkung hat und durch welches Streaming-Verhalten sie diese Effekte reduzieren können. Nachhaltiges Videostreaming-Verhalten auf Seiten der Nutzenden bedinge als wesentliche Voraussetzung Transparenz bezüglich der Klima- und Umweltwirkungen von Streaming-Angeboten.

Unter dieser Voraussetzung könne nachhaltiges Streaming-Verhalten bei der Nutzung von Videostreaming-Diensten aus Sicht der Expert*innen z.B. über in die Nutzeroberfläche der Anwendung integrierte Feedback-Mechanismen ermöglicht werden. Dies wäre beispielsweise in Form eines Statusbalkens realisierbar, der Nutzenden Feedback über den Energieeffizienzgrad ihres bisherigen Streaming-Verhaltens gibt, wobei erweiterte Informationen über energieeffiziente Verhaltensoptionen angeboten werden könnten (z.B. Wahl einer niedrigeren Auflösung). Ein weiteres Feature-Beispiel für die Nutzeroberfläche wäre ein von Nutzenden optional aktivierbarer Green Mode, welcher automatisch verschiedene Einstellungsparameter für energieeffizienteres Videostreaming optimiert. Ein geeigneter Parameter dafür wäre z.B. die automatische Anpassung der Videoauflösung an die Displaygröße des verwendeten Endgeräts, wodurch unnötiger Mehrverbrauch an Daten reduziert würde. Das User-Interface-Design von kommerziellen Videostreaming-Anwendungen sei oft mit dem Ziel konzipiert, Nutzende dazu zu animieren, die Anwendung möglichst oft und in möglichst langen Zeiträumen zu nutzen, um die Bindung zum Angebot zu stärken. Ein von vielen Anbietern genutztes Element eines solchen Addictive Designs stellt die Autoplay-Funktion dar, bei der nach dem Ende eines Videos automatisch ein weiteres vom Algorithmus für den User als relevant bewertetes Video abgespielt wird. In diesem Bezug plädierten die Expert*innen dafür, dass Videostreaming-Anwendungen prinzipiell sogenannte Green Defaults enthalten müssen, wonach Voreinstellungen primär nach Maßgabe der Energieeinsparung spezifiziert sein müssen und das wirtschaftliche Interesse des Anbieters dabei nachrangig ist. Im Hinblick auf die Tarifgestaltung von Videostreaming-Anbietern argumentieren die Expert*innen gleichfalls auf dem Grundsatz, dass wirtschaftliche Gestaltungsziele mit den Zielen der Energie- und Ressourceneffizienz vereinbar sein müssten. In diesem Sinne könnten z.B. Flatrate-Tarife von Videostreaming-Anbietern gesetzlich auf ein bestimmtes Datenmengen-Kontingent begrenzt werden. Dabei könnten User*innen zugleich die Möglichkeit haben, die Videoauflösung in mehreren Stufen zu reduzieren, um Videostreaming-Stunden einzusparen. Mit einem solchen Ansatz könnte in der Wahrnehmung von Nutzenden möglicherweise die Begrenztheit der Datenmengen im Vordergrund stehen anstatt einer Begrenzung des Videokonsums.

In diesem Bezug betonten die Expert*innen jedoch, dass ordnungspolitische Maßnahmen keine Beschränkung von Videostreaming zum Ziel haben sollten. Vielmehr wären mögliche Maßnahmen im Videostreaming immer auch unter Abwägung der Potenziale von Videostreaming zur Reduzierung von Klima- und Umweltwirkungen in anderen Feldern zu bewerten. So biete Videostreaming insbesondere im Bereich des Personenverkehrs Potenziale zur Reduzierung des Energiebedarfs, indem ein Teil notwendiger Fahrten durch Streaming ersetzt werden könne. Dies z.B. durch die Möglichkeit von Videokonferenzen oder indem Aufzeichnungen von Universitäts-Vorlesungen als Video on Demand angeboten werden.

Handlungsoptionen im Bereich Technologie und Infrastruktur

In der Perspektive von Technologie und Infrastruktur zählen zum Videostreaming Rechenzentren und Rechenzentrums-Verbünde, Fest- und Mobilfunknetze für die Übertragung von Videostreaming-Daten, Endgeräte, mit welchen Videostreams auf Nutzer-Seite konsumiert bzw. produziert werden sowie Software oder Algorithmen (z.B. Video-Codecs), von denen ebenfalls Einflüsse auf die Klima- und Umweltwirkungen von Videostreaming ausgehen können.

Während im Hinblick auf Hardware und Endgeräte bisher insbesondere deren Klimawirkung in der Nutzungsphase und damit die Energieeffizienz im Mittelpunkt gestanden haben, rückten aus Sicht der Expert*innen in den letzten Jahren zunehmend Aspekte der Ressourcenschonung in den Vordergrund, wobei sich der Blick auf über die Nutzungsphase hinausgehende Umweltwirkungen weitet. Dieser Trend gehe in die Richtung, dass die Herstellungsphase an Bedeutung gewinnt und damit auch der Transport und die Entsorgung immer wichtiger werden, weil zum einen der Strombedarf pro Endgerät zunehmend geringer wird und die Server zum Teil effizienter werden, und zugleich die CO₂-Intensität des Strommix tendenziell abnimmt. Dem Grundsatz der Ressourcenschonung messen die Expert*innen sowohl im Hinblick auf die Einschränkung negativer Umweltwirkungen auf globaler Ebene (z.B. als

Folge des Abbaus bestimmter Ressourcen oder der Verkipfung von Altgeräten) als auch unter ethischen Gesichtspunkten eine wichtige Bedeutung zu.

Vor diesem Hintergrund bestand bei den Teilnehmenden des Workshops eine breite Zustimmung für den Gedanken der Kreislaufwirtschaft, nach welchem über den Aspekt der Ressourceneffizienz hinaus Materialien und Produkte so lange wie möglich im Wertschöpfungskreislauf gehalten und dabei Ressourcenverbrauch und Abfälle auf ein Minimum reduziert werden. In diesem Sinne wurden folgende Prioritäten für das Design von Produkten und Produktlebenszyklen identifiziert: In der Entwicklung von Rechenzentrums-Hardware und Endgeräten müsse das zentrale Ziel die (1) Langlebigkeit der Produkte sein. Der seit mehreren Jahren bestehende Konsumtrend immer schnellerer Gerätewechsel im Endgeräte-Markt sei einerseits durch Innovationssprünge in der technischen Entwicklung geprägt, wobei Leistungssteigerungen oder neuartige Features von neuen Geräten Verbrauchende zum schnelleren Gerätewechsel animierten. Im Bereich der Smartphones habe diese Entwicklung in den letzten Jahren allerdings abgenommen. Während schnelle Gerätewechsel einerseits durch Innovationen veranlasst bzw. durch den Wunsch nach Neuem motiviert sein können – und damit letztlich auf freien Kaufentscheidungen von Verbrauchenden basieren – können kurze Nutzungsphasen eines Produktes auch durch dessen Qualität und Produktdesign bedingt sein. Mit der Kategorie „Langlebigkeit der Produkte“ werden ausschließlich diese letztgenannten Qualitäts- bzw. Designaspekte adressiert, von welchen ein Einfluss auf die Länge der Nutzungsphase ausgeht. Innerhalb dieser Kategorie haben die Expert*innen z.B. vorgeschlagen, dass Endgeräte-Hersteller für einen längeren als in der Praxis üblichen Zeitraum Treiber-Aktualisierungen und Sicherheitsupdates anbieten müssten, um technisch funktionsfähige Hardware beispielsweise auch mit neuen Betriebssystem-Versionen weiterverwenden zu können. Als weitere Aspekte wurden in dieser Kategorie Reuse- bzw. Refurbish-Programme genannt, die (seit längerem im Endkunden-Bereich und mittlerweile auch bei Rechenzentrums-Betreibern) eine praktikable Möglichkeit zur Verlängerung von Nutzungsphasen darstellen.

Die (2) Reparierbarkeit und Modularität von Endgeräten und Hardware allgemein stellten weitere zentrale Aspekte zur Verlängerung der Nutzungsphase dar, die bereits in der Entwicklung des Produktdesigns mitgedacht werden müssten. Der modulare Aufbau von Hardware stelle eine einfachere Form der Reparierbarkeit dar, die anstelle einer Komplettentsorgung den einfachen Austausch einzelner Module eines Geräts ermögliche. Als Negativbeispiel für diesen Befund wurde die verbreitete Praxis von Smartphone-Herstellern angeführt, wonach der Austausch von Smartphone-Akkus nur durch einen vom Hersteller autorisierten Reparateur und nicht mehr durch die Nutzenden selbst möglich ist. Diese Praxis verkürze die Nutzungsdauer von Smartphones, da die Kosten für einen Akkuaustausch ab einer bestimmten Nutzungsdauer den Restwert des Smartphones übersteigen, weshalb für Nutzende der Kauf eines neuen Smartphones unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten sinnvoller sei.

Die (3) Recyclingfähigkeit und Zerlegbarkeit von Hardware und Endgeräten stellten für die Expert*innen weitere zentrale Zieldimensionen des Produktdesigns dar. Dabei seien Produkte nach der Maßgabe zu entwickeln, dass nach der Nutzungsphase möglichst viele Materialien auf einfache und kosteneffiziente Weise wiederverwertet werden können. Der Aspekt der Recyclingfähigkeit sei gerade bei kleineren Endgeräten von Bedeutung, da sich bei diesen das Recycling aufgrund des höheren Aufwands zur Extraktion der Materialien unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten kaum lohne.

In den Diskussionen zur Ressourceneffizienz befürworteten die Expert*innen den in der EU-Ökodesign-Richtlinie jüngst eingeschlagenen Weg, neben dem bisherig ausschließlichen Fokus auf Energieeffizienz und Klimawirkung nun den Blick auf die Umweltwirkungen auszuweiten und vermehrt Aspekte der Ressourcenschonung, wie z.B. Kreislaufwirtschaft oder Reparaturfreundlichkeit, zu adressieren. Nach Ansicht der Teilnehmenden des Workshops sei damit ein richtiger Weg begonnen, welcher nun konsequent fortgesetzt werden müsse, um bei Unternehmen eine stärkere Verankerung von Klima- und Umweltwirkungsaspekten in Strategie und Praxis zu bewirken.

Ein weiterer Expert*innen-Vorschlag besteht darin, sowohl Videostreaming-Anbieter als auch Rechenzentrums-Betreiber sowie Fest- und Mobilfunknetz-Betreiber und Hardware-Hersteller zu verpflichten, zu den Klima- und Umweltwirkungen ihrer Angebote durchgehende Transparenz in Form von jährlichen Nachhaltigkeitsberichten zu ermöglichen. Dabei müssten die Nachhaltigkeitsberichte für eine bessere Bewertbarkeit und Vergleichbarkeit in einem knappen standardisierten Format gestaltet sein, welches Pflichtangaben zu zentralen Kennzahlen (z.B. CO₂-Fußabdruck, Material-Fußabdruck) ausweist und in digitaler Form öffentlich zugänglich ist. Für die Expert*innen ermöglicht eine Berichtspflicht zu Umwelt- und Klimawirkungen eine Datenbasis, an die unterschiedliche Akteure der Gesellschaft anschließen und für ihre Beiträge zur Reduzierung von Umwelt- und Klimawirkungen verwenden können; dies z.B. in aufbereiteter Form zur Verbraucherinformation, in der Politik zur zielgerichteten Gestaltung von Klima- und Umweltschutzmaßnahmen oder in Forschung und Entwicklung zur Ermittlung weiterer Potenziale für Energie- und Ressourceneffizienz. In diesem Bezug führten die Expert*innen als Beispiel aus der Forschung an, dass die Ermittlung von Treibhausgasemissionen über die gesamte Wertschöpfungskette hinweg bei Endgeräten aufgrund mangelnder Realdaten gegenwärtig kaum möglich sei, weswegen Berechnungen etwa in Treibhausgas- oder Ökobilanzen nur auf Basis von Annahmen bzw. Schätzungen erfolgen könnten. In Ergänzung zum Vorschlag einer Nachhaltigkeitsberichtspflicht haben die Expert*innen die Umsetzung folgender politischer Handlungsempfehlungen vorgeschlagen, die aus dem Forschungsprojekt Green Cloud-Computing (Köhn, M., Gröger, J., Stobbe, L. 2020) des Umweltbundesamtes hervorgegangen sind: (1) Verpflichtender Energieausweis für Rechenzentren; (2) Anzeigepflicht des CO₂-Fußabdrucks für Anbieter wie Cloud-Dienstleister (bzw. in diesem Fall Videostreaming-Anbieter) oder Fest- und Mobilfunknetzbetreiber (je Service- bzw. Übertragungseinheit).

Konkrete Umsetzbedarfe in der technologischen Sphäre sehen die Expert*innen in erster Linie im Bereich der Datenübertragungsnetze. Da im Fest- und Mobilnetz die aktuellen Technologiestandards Glasfaser (einschließlich FTTH, fibre to the home) bzw. 5G eine weitaus energieeffizientere Datenübertragung ermöglichen als die jeweiligen Vorgängertechnologien, empfehlen die Expert*innen eine beschleunigte übergreifende Modernisierung der Zugangsnetze im Fest- und Mobilfunknetz – d.h. den direkten Glasfaser-Anschluss von Gebäuden über FTTH im Festnetz sowie den breiten Ausbau von 5G-Zugangsnetzen im Mobilfunk. Darüber hinaus sehen sie im Zuge einer übergreifenden Modernisierung der Kommunikationsnetze weitere Potenziale zur Reduzierung des Energiebedarfs, so ermögliche eine hinreichende Flächenabdeckung der 5G-Mobilfunkinfrastruktur die Abschaltung des deutlich energieintensiveren 2G-Mobilfunknetzes. Zudem könne im Zuge des Ausbaus moderner Netztechnologiestandards – wie oben bereits angedeutet – darüber nachgedacht werden, inwieweit klassische Rundfunktechnologien wie Satellit, Kabel oder terrestrischer Broadcast stillgelegt werden können bzw. als redundante Infrastruktur für Katastrophenfälle weiterhin ggfs. im eingeschränkten Betrieb bereitgehalten werden müssen. Dabei ist den Expert*innen zufolge auch die Prüfung sinnvoll, inwieweit jüngere Übertragungsnetz-Technologien, wie z.B. Starlink, potenziell dazu geeignet wären, verbleibende Versorgungslücken zu schließen bzw. mögliche Versorgungsgpässe zu überbrücken.

5.3.2 Themenbereich Homeoffice

Unter dem Begriff „Homeoffice“ verstehen wir eine Arbeitsform, bei der die Beschäftigten ihre Arbeit vollumfänglich („reines Homeoffice“) oder teilweise („teilweises Homeoffice“) aus dem privaten (Wohn-)Umfeld heraus ausführen. Zu diesem Themenbereich wurde erstens am 23.11.2021 ein Online-Experten-Workshop durchgeführt, um nach dem Beitrag von Homeoffice für den Klimaschutz im Kontext von Potenzialen und Grenzen der Telearbeit für die Energie- und Ressourceneffizienz zu fragen, wobei diese Problemstellung aus einer mittelfristigen Zukunfts- und multidimensionalen Wirkungsperspektive diskutiert worden ist (Konrad, W., Dratsdrummer, F., Scheer, D. 2022a). Zweitens wurden am 5./6.7.2022 zwei Online-Fokusgruppen mit Beschäftigten aus Industrie- und Dienstleistungsunternehmen durchgeführt mit dem Ziel, Anwenderperspektiven einer energiebewussten IT-Nutzung im Homeoffice zu eruieren (Konrad, W., Dratsdrummer, F., Scheer, D. 2022b).

Klimaschutzpotenziale des Homeoffice im Expertenurteil

Als erster Befund des Experten-Workshops ist festzuhalten, dass bei der Herausforderung Homeoffice nicht unbedingt die Hardware oder Infrastruktur an erster Stelle steht, sondern Soft Skills der Führungs- und Arbeitskultur, die mit Modellen hybrider Leistungserbringung „bis jetzt noch nicht klar kommt. Wir haben diese Mischung aus verschiedenen Führungsstilen, aus verschiedenen sozialen Umgangsstilen und Team-Zusammenhaltstilen bis jetzt noch nicht erreicht.“¹⁴ Mit Blick auf Geschlechterrollen wurde sogar davor gewarnt, „in irgendwelche rückgewandten Gesellschaftsmodelle zurückzuschliddern, denn wie man am Beispiel der Wissenschaft gesehen hat, lag die Mehrlast der Arbeit zu Hause primär auf den Frauen. So ist die Anzahl der Publikationen von männlichen Autoren in fast jedem Wissenschaftsbereich massiv hoch- und die von Frauen in Zeiten des Lockdowns massiv zurückgegangen.“

Vor diesem Hintergrund bestand Konsens, dass die schnelle Verbreitung des Homeoffice einen enormen Gestaltungsbedarf induziert, „weil mit dem herkömmlichen Führungsarrangement Homeoffice nicht gut funktionieren kann. Das wird zu Problemen führen wie Vereinsamung, Überanstrengung, Entgrenzung oder Erholungsunfähigkeit.“ Werden diese Gestaltungsaufgaben gelöst, kann Homeoffice eine „ganz große Zukunft haben und zur Humanisierung der Arbeitswelt beitragen.“ In diesem Kontext werden Fortschritte für Partizipation und Selbstbestimmung sowie Flexibilität und Arbeitszufriedenheit oder die Unterstützung eines soziokulturellen Wandels mit Blick auf die Integration von Familie und Beruf für möglich gehalten – letzteres gerade auch im Sinne das „es inzwischen fast schon dazu gehört, dass mal entweder ein Haustier oder ein Familienangehöriger unterschiedlichen Alters zwischenrein grätscht. Das macht uns alle nicht weniger professionell, unsere Arbeit wird dadurch nicht schlechter, sondern es zeigt, dass der Mensch Mensch ist und eben in gewisse Kontexte eingebettet ist.“

Konsens zwischen den Expert*innen bestand ebenfalls darin, dass es sich beim Homeoffice der Zukunft um ein auf Freiwilligkeit basierendes sowie hybrides, Büro- und Zuhause-Phasen kombinierendes Modell der Arbeitsorganisation handeln wird. Dieses wird eine solche Attraktivität entfalten, dass einerseits für Unternehmen ohne Homeoffice-Angebot Fachkräftemangel und Wettbewerbsnachteile drohen. Andererseits ist es nicht unwahrscheinlich, dass Homeoffice-Potenziale zukünftig auch für Arbeitsplätze in der Produktion und dieser vor- und nachgelagerten Tätigkeiten erschlossen werden, zum Beispiel die Ausübung von Steuerungs- und Kontrollprozessen durch Vorarbeiter*innen per Tablet von zu Hause aus.

Wie steht es nun um das Klimaschutzpotenzial des Homeoffice? Angesichts der Vielzahl intervenierender Variablen und multikausaler (Rebound-)Effekte sind sich die Expert*innen einig, dass eine Antwort auf diese Frage äußerst schwierig ist und derzeit keine eindeutigen Schlussfolgerungen möglich erscheinen. Vor diesem Hintergrund wird ein ambivalentes Argumentationsmuster präferiert, indem Homeoffice zunächst erhebliche Potenziale als Klimaschutzbaustein attestiert werden, um dann sogleich auf sich widersprechende Entwicklungen und das Fehlen von (politischen) Richtungsentscheidungen für ein klimafreundliches Homeoffice zu verweisen. „Potenziale gibt es, aber es läuft im Moment noch so unkoordiniert, dass es überhaupt nicht in eine Richtung geht, dass man sagen könnte, Potenziale werden gehoben, sondern es läuft eher in die Richtung: Doppelstrukturen werden aufgebaut, Verkehrsleistungen gehen in beide Richtungen – beim einen nehmen die zu, beim anderen ab. Es geht so diffus in alle möglichen Richtungen, und da ist es ganz schwierig zu versuchen, das Potenzial in eine positive Richtung zu lenken. Es ist noch nicht richtig absehbar, wo eigentlich die Reise hingeht.“

14 Um die Anonymität der Teilnehmenden zu wahren werden hier und im Folgenden Zitate ohne Sprechernennung wiedergegeben.

Die Vielschichtigkeit der Problemstellung zeigte sich in der Debatte insbesondere mit Blick auf die Faktoren Hardwareausstattung und Standort. Zu ersteren wird einerseits der Aufbau redundanter Strukturen im Zuge der schlagartig zu bewältigenden Homeoffice-Welle beklagt und andererseits die Gegenteilstendenz „Bring your own device“ hervorgehoben: „Jeder hat seinen personalisierten Laptop, und im Dienstgebäude hat man eine Docking-Station, einen Monitor und eine Tastatur, und auf diese Weise versuchen wir, Hardware abzubauen.“

Der Meinungs austausch zum Faktor Standort war zum einen geprägt von gegensätzlichen Einschätzungen der Wahrscheinlichkeit, dass Menschen mit Blick auf eine attraktivere Homeoffice-Umgebung an vom Büro weiter entfernte Orte umsiedeln. Beispielhaft für diese kontroversen Perspektiven stehen die folgenden beiden Äußerungen: „Ich denke es gibt viele, die bald rausziehen wollen, die sagen: ‚Ich brauche den Platz, ich habe dann die Möglichkeit mir ein zusätzliches Zimmer zu organisieren und pendle dafür aber doppelt so weit, dann aber nur einmal oder zweimal in der Woche‘. Ich glaube, da gibt es tatsächlich viele Fälle, wo es einfach zu deutlich höheren Verkehrsleistungen kommt.“ – „Es stimmt, Leute sagen, sie möchten jetzt rausziehen, ein extra Büro haben. Aber die Äußerung dazu und die tatsächliche Umsetzung sind dann natürlich schon noch weit auseinander.“ Zum anderen wurden diese gegensätzlichen Sichtweisen überlagert von drei Aspekten, die verdeutlichen, dass dualistische Gegenüberstellungen in der Diskussion um Klimaschutzpotenziale von Homeoffice nicht komplex genug sind. Erstens wurde die Möglichkeit ins Spiel gebracht, „dass wenn der eine aus der Stadt rauszieht, eine Wohnung für jemand anderen frei wird, der dadurch vielleicht irgendeine Vor-Ort-Arbeit annehmen kann, die nicht für das Homeoffice geeignet ist.“ Zweitens wurde auf die Notwendigkeit einer sozialräumlich differenzierten Betrachtung hingewiesen, wonach „es in den Zentren, wo es zum Umland ein großes Preisgefälle gibt, nochmal ganz andere Motivationen gibt, die Stadt zu verlassen, als jetzt in anderen Gegenden, wo sich das eher annähert.“ Und drittens wurde das Augenmerk auf Pendlerbüros oder Working Spaces gerichtet, die etwa „im ländlichen Raum angeboten werden, um Pendelverkehr zu reduzieren und um den Menschen eine Alternative zu bieten, die sich zu Hause kein Homeoffice einrichten können.“

Perspektiven eines energieeffizienten Homeoffice aus Nutzersicht

Arbeit von zu Hause aus zu verrichten war für fast alle an den Fokusgruppen beteiligten Personen eine durch Corona getriebene Veränderung der gewohnten Büroroutinen. Während wenige das Homeoffice vorbehaltlos begrüßen, ist diese Arbeitsumgebung für die meisten eine Lösung mit Licht und Schatten. Der Flexibilität im Vollzug der beruflichen Tätigkeiten und der Möglichkeit der situativen Integration von Alltagsaufgaben in den Arbeitstag auf der einen Seite stehen das Fehlen sozialer Kontakte, Effizienz- und Konzentrationsprobleme sowie Schwierigkeiten der Vereinbarung von Familie und Beruf auf der anderen Seite gegenüber. Für die Zukunft wünschen sich alle die Freiheit, selbst über den Arbeitsort entscheiden zu können, wobei die deutliche Mehrheit eine gleichgewichtige Mischung aus Homeoffice und Büro präferiert.

Dass aus dem Kreis der Teilnehmenden niemand eine das Homeoffice prinzipiell ablehnende Haltung einnimmt ist nicht zuletzt dem Umstand geschuldet, dass die IT-technischen Arbeitsbedingungen als zufriedenstellend wahrgenommen werden. Flächendeckend ausgestattet mit größtenteils neuwertigen Komponenten einer modernen Hard- und Softwareumgebung (insb. Laptop, WLAN-Router, Smartphone, Office-Software, Videokonferenz-Tools), wird nahezu ausnahmslos davon berichtet, IT-seitig im Homeoffice unter den gleichen Bedingungen wie im Büro arbeiten zu können. Stellenweise wird die Homeoffice-IT sogar als für den eigenen Bedarf überdimensioniert eingestuft, insofern alle mit den gleichen Geräten ausgestattet wurden, ohne zunächst die individuellen Bedarfe der Beschäftigten zu erheben.

Bei dem Thema der Geräteausstattung wird erstmals deutlich, dass Aspekte von Klimaschutz und Energie- und Ressourceneffizienz nur vereinzelt eine Rolle bei der Bewertung und Verwendung von Homeoffice-IT spielen. Werfen noch einige wenige einen kritischen Blick auf doppelte IT-Strukturen und diskutieren die Nutzung von Coworking Spaces als Möglichkeit, Ressourcen einzusparen, wünschen sich

viele neueres und weiteres IT-Equipment, obwohl bis auf eine Ausnahme alle Teilnehmenden die vorhandene Ausstattung als ausreichend einstufen. Nur zwei Personen erklären, dass für sie aus ökologischen und Kostengründen Stromsparen bei der Nutzung von Computern oder Druckern im Homeoffice eine Rolle spielt, und nur die eine oder der andere weisen darauf hin, dass sie Energiesparmaßnahmen nicht nur kennen, sondern auch praktizieren. Dagegen hält die Mehrheit den Energieverbrauch der Homeoffice-IT für vernachlässigbar, durch Maßnahmen an anderer Stelle leicht überkompensierbar oder aufgrund struktureller Hürden nicht beeinflussbar, so dass ein ressourcen- und energiesparendes Verhalten als weder notwendig noch möglich angesehen wird.

Erst wenn die Themenstellung auf eine allgemeine Ebene von Bedingungen und Barrieren für Energieeffizienz im Homeoffice gerichtet wird, zeigen sich die Teilnehmenden offen für ein differenzierteres Nachdenken. So wird ein Mangel an energieeffizienten Geräten und Anwendungen sowie das Fehlen valider Informationen über wirksame Ansatzpunkte und tatsächlich erreichbare Effekte von Sparmaßnahmen konstatiert und zudem verlangt, dass die Arbeitgebenden ihrer Fürsorgepflicht und Vorbildfunktion für ein umweltfreundlich ausgestattetes und genutztes Homeoffice nachkommen sollen. Auch bleibt die Diskussion nicht bei der Verantwortung von Herstellern, Wissensvermittlern und Unternehmen stehen, sondern wird zudem durch eine kritische Reflexion von Verhaltensaspekten bereichert, in der individuelle Beharrungskräfte wie die eigene Gemütlichkeit oder Angst vor Veränderungen als wichtige Barrieren hinsichtlich von Energieeffizienz im Homeoffice benannt werden.

Wie jedoch die Reaktionen der Teilnehmenden auf vier theseartig formulierte Informationen zu den Klimaeffekten verschiedener Aspekte der IT-Nutzung zeigen, ist die Anerkennung persönlicher energiesparender Handlungsmöglichkeiten letztlich nur schwach ausgeprägt und nicht mehrheitsfähig. Zur Diskussion gestellt wurden folgende aus der Literatur gewonnene Aussagen:

- Wenn Sie darauf verzichten, während Videokonferenzen die Bildübertragung einzuschalten, können Sie die klimaschädlichen Emissionen von Videokonferenzen um 96 Prozent verringern (Moberg et al. 2010).
- Durch das Versenden von E-Mails verursacht jeder Bürobeschäftigte jährlich CO₂-Emissionen, die einer Fahrt von 320 Kilometern mit einem Familienauto entsprechen (MoreThanNow (o.J.)).
- Unsere IT-Geräte, unsere Internetnutzung und die sie unterstützenden Systeme sind für 3,7 Prozent der weltweiten Treibhausgasemissionen verantwortlich – diese Zahl wird sich bis 2025 verdoppeln (MoreThanNow (o.J.))
- Wenn ein Notebook alle sechs statt alle vier Jahre ausgetauscht wird, werden die Treibhausgasemissionen um 30 Prozent reduziert (TCO Certified 2022).(TCO Certified 2022)

Wie auch im Kontext der zuvor in den Fokusgruppen adressierten Themen finden sich zustimmende Äußerungen zu den Thesen, indem diese als Bestätigung praktizierten Verhaltens und vorhandenen Wissens sowie als nachvollziehbare Handlungsoptionen interpretiert werden. In der von der Mehrheit vertretenen klar ablehnenden Meinung spiegelt sich dagegen eine Motivlage, in der die bekannten Argumente von Berufspflichten, marginalen Effekten und lohnenswerteren Ansatzpunkten durch eine Verteidigung des aktuellen Stands der Bürotechnik verstärkt werden. In dieser Perspektive geht es bei der Frage eines energiesparenden Verhaltens im Homeoffice nicht mehr um die Sinnhaftigkeit auch kleiner eigener Beiträge zum Klimaschutz, sondern um den Schutz von als fortschrittlich und vorteilhaft wahrgenommenen Digitalstrukturen und -routinen vor als anmaßend empfundenen Eingriffen in die Handlungsautonomie.

Vor diesem Hintergrund sind zumindest zwei Voraussetzungen zu erfüllen, sollen Beschäftigte für eine energie- und ressourcenbewusste Nutzung der Homeoffice-IT gewonnen werden. Erstens die Bereitstellung glaubwürdiger und leicht verständlicher Informationen zu den ökologischen und ökonomischen Effekten von Sparverhalten auf der individuellen sowie gesamtgesellschaftlichen Ebene. Zweitens die ganzheitliche Betrachtung des Homeoffice, um alle Segmente des Strom- und Wärmever-

brauchs in den Blick zu nehmen und somit sämtliche größeren und kleineren Emissionsquellen zu adressieren und damit zu verhindern, durch einen Fokus auf die Homeoffice-IT unbeabsichtigt deren Legitimation in den Augen der Nutzenden in Frage zu stellen.

6 Arbeitspaket 5 – Digitaler Atlas BW

6.1 Ziel des Arbeitspakets

Im Rahmen dieses Arbeitspakets sollen Potentiale, Zahlen und Fakten im Bereich der digitalen Infrastruktur georeferenziert für das Land Baden-Württemberg aufbereitet werden. Hierbei soll sich an dem bestehenden Angebot des Energieatlas BW orientiert werden und in ähnlicher Form öffentliche Informationen zum Stand der digitalen Infrastruktur bereitgestellt werden.

6.2 Begriffsdefinitionen

Um eine einheitliche Definitionsgrundlage zu schaffen soll der Begriff Digitale Infrastruktur kurz umrissen werden. In einem Glossar zur Erklärung wesentlicher Begriffe der Digitalisierung des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft wird der Begriff wie folgt beschrieben: „Die digitale Infrastruktur umfasst den Teil der Telekommunikationsinfrastruktur, der digitalen Anwendungen und netzbasierte Geschäftsmodelle ermöglicht.“ (Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft 2022, S. 7). Besonders in Hinblick auf die COVID-19 werden unsere sozialen und wirtschaftlichen Interaktionen über digitale Informationsnetzwerke organisiert. Über diese Netzwerke sind Menschen, Prozesse, Daten und Dinge miteinander verbunden (Lynn et al. 2022, S. 109). Um dies zu bewerkstelligen, ist eine entsprechende digitale Infrastruktur notwendig. Wichtige Punkte im Bereich der digitalen Infrastruktur sind:

- Hohe Übertragbarkeit bzw. hoher Datendurchsatz
- Stabilität bzw. Verfügbarkeit
- Flächendeckende Verfügbarkeit (räumliche Verfügbarkeit)
- Vertrauenswürdigkeit, beinhaltet Datensicherheit und Datenschutz
- Nutzerfreundlichkeit
- Kostengünstige Bereitstellung (Bär et al. 2016, S. 170)

Zur digitalen Infrastruktur gehören zum Beispiel Rechenzentren, alle digitalen Telekommunikationsnetze und Übertragungswege mit Kabeln wie Glasfaserleitungen, Satelliten- oder Funkstationen und erforderlichen Frequenzen.

Wie in Arbeitspaket 1 ausgeführt, spielt die Digitalisierung in vielen Bereichen eine sehr große Rolle. Die Grundlage für die Digitalisierung ist der Ausbau der digitalen Infrastrukturen. (Vera Demary et al. 2021)

6.3 Visualisierung digitale Infrastruktur Deutschland

Im Folgenden wird eine Übersicht über die IT-Infrastruktur auf Gemeindeebene im Land Baden-Württemberg gegeben. Die Daten sind auf der 5-stelligen PLZ aggregiert, um sicherheitsrelevante Daten nicht im genauen preiszugeben.

Es konnten Daten gesammelt und aufgearbeitet werden in den Bereichen der bestehenden Schwerindustrien, der Anzahl von Mobilfunktürmen, sowie der Anzahl von Rechenzentren. Außerdem konnte eine Übersicht über die Verfügbarkeit von 5G-Netzen in Baden-Württemberg erstellt werden.

6.3.1 Mobilfunkmasten

Mobilfunkmasten, auch bekannt als Mobilfunksendemasten oder Mobilfunkantennen, sind Türme oder andere hohe Strukturen, die verwendet werden, um Mobilfunknetze aufzubauen. Sie ermöglichen die drahtlose Kommunikation zwischen Mobiltelefonen, Smartphones und anderen mobilen Geräten und den Basisstationen, die das Signal empfangen und weiterleiten. Mobilfunkmasten sind eine wichtige Infrastrukturkomponente für die Bereitstellung von Mobilfunkdiensten. Da die Nachfrage

nach mobilen Daten- und Sprachdiensten weiterwächst, wird erwartet, dass auch die Anzahl der Mobilfunkmasten zunehmen wird.

Die Erhebung der Mobilfunkinfrastruktur in Baden-Württemberg ist hierbei nicht vollständig. Jedoch lassen sich einige Ballungsräume und Bereiche feststellen, welche strategisch günstig zwischen großen Städten liegen (siehe Abb. 37).

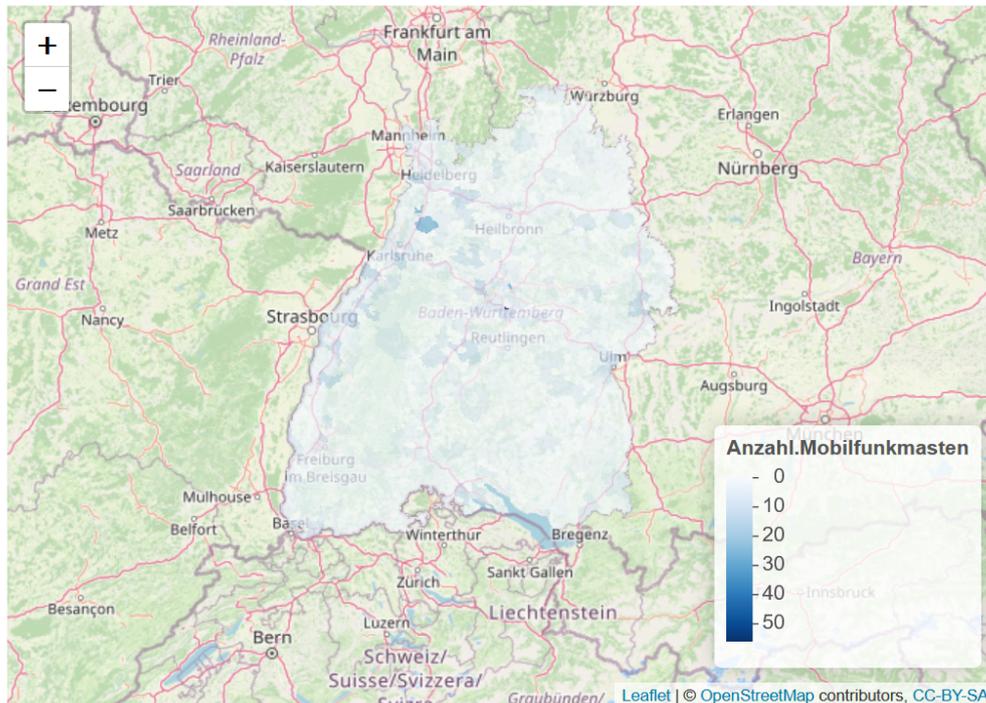


Abbildung 37: Kartenansicht Baden-Württemberg mit der Verteilungsdichte von Mobilfunkmasten

Die Anzahl der Mobilfunkmasten ist ein wichtiger Indikator für den Stand der digitalen Infrastruktur in einem bestimmten Gebiet. Eine höhere Anzahl von Mobilfunkmasten deutet darauf hin, dass mehr Standorte mit Mobilfunknetzabdeckung versorgt werden können.

Eine gute Dichte von Mobilfunkmasten hängt von verschiedenen Faktoren ab, einschließlich der geografischen Eigenschaften des Gebiets und der Bevölkerungsdichte. In städtischen Gebieten ist in der Regel eine höhere Mastendichte erforderlich, um eine zuverlässige Konnektivität sicherzustellen. Hier können beispielsweise mehrere Mobilfunkmasten in relativ kurzen Abständen erforderlich sein. In Baden-Württemberg ist dies zwischen Karlsruhe und Heidelberg, sowie auf einer kleinen Ebene in Stuttgart zu sehen.

In ländlichen Gebieten mit geringerer Bevölkerungsdichte kann eine niedrigere Mastendichte ausreichend sein, um eine angemessene Netzabdeckung zu gewährleisten. Um eine genaue Aussage über die aktuellen Situationen im ländlichen Bereich zu treffen, könnten Tests und Befragungen durchgeführt werden.

Somit ist anzumerken, dass eine höhere Anzahl von Mobilfunkmasten nicht immer automatisch eine bessere Netzqualität oder -abdeckung bedeutet. Die effektive Nutzung der verfügbaren Frequenzbänder, die Qualität der Übertragungstechnologie und die Auslastung der Netzwerkkapazitäten spielen ebenfalls eine entscheidende Rolle. Eine ausgewogene und gut geplante Bereitstellung von Mobilfunkmasten, basierend auf den spezifischen Anforderungen eines Gebiets, ist entscheidend, um eine zuverlässige digitale Infrastruktur bereitzustellen.

6.3.2 Rechenzentren

Rechenzentren spielen eine sehr wichtige Rolle in der digitalen Infrastruktur, da sie die Grundlage für viele Dienste und Anwendungen bilden, die im Internet genutzt werden. Sie dienen als Basis für verschiedene digitale Dienste und Anwendungen wie Cloud Computing, Datenbanken, Webhosting und mehr. Sie sind große Einrichtungen, in denen Server und andere IT-Systeme untergebracht sind, die Informationen verarbeiten und speichern. Die Rolle von Rechenzentren besteht darin, eine zuverlässige, sichere und skalierbare Infrastruktur für die Verarbeitung und Speicherung von Daten bereitzustellen. Sie sind dafür ausgelegt, große Datenmengen zu verarbeiten und zu speichern, die von Unternehmen, Regierungen und anderen Organisationen generiert werden. In Deutschland hat der Bedarf an Rechenzentren in den letzten Jahren aufgrund zunehmenden Datenverkehrs und des wachsenden Bedarfs an digitalen Diensten deutlich zugenommen.

Ohne Rechenzentren wäre die digitale Infrastruktur nicht in der Lage, die steigende Nachfrage nach Datenverarbeitung und -speicherung zu bewältigen. Sie sind ein wichtiger Bestandteil der modernen Wirtschaft und der Gesellschaft im Allgemeinen und spielen eine entscheidende Rolle bei der Entwicklung und Bereitstellung neuer Technologien und Dienste. Die Erhebung der Datenzentren in Baden-Württemberg ist hierbei nicht vollständig - zusätzliche Informationen beispielsweise über die Leistung der Datenzentren sind unvollständig (siehe Abb. 38).

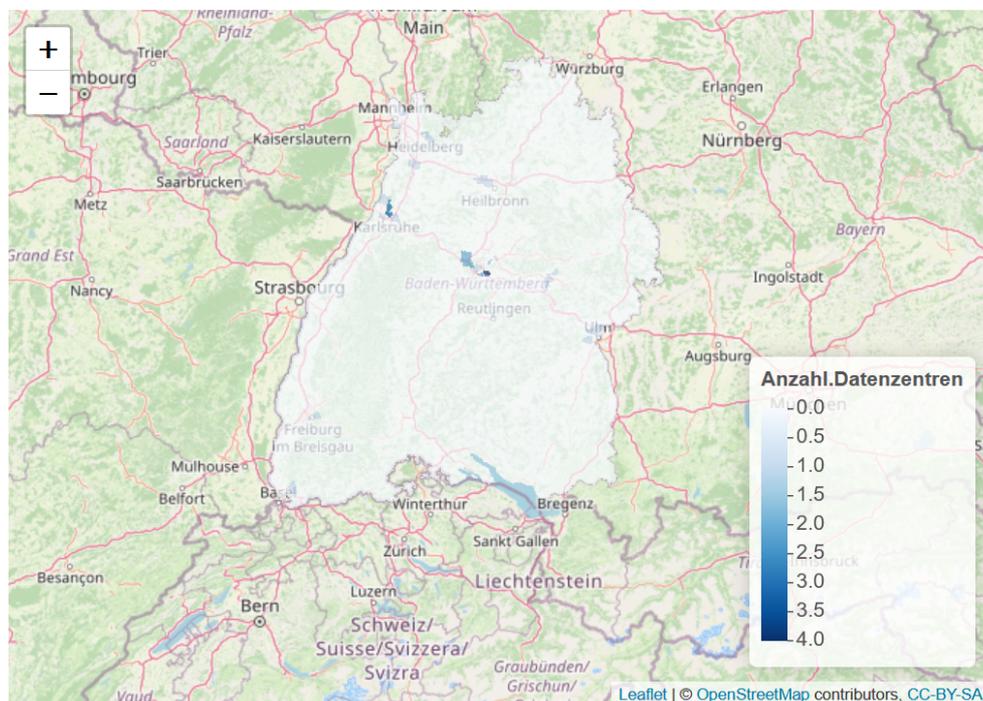


Abbildung 38: Kartenansicht Baden-Württemberg mit der Verteilungsdichte von Rechenzentren

Die genaue Anzahl und Verteilung der Standorte von Rechenzentren in Baden-Württemberg können sich schnell ändern.

Darüber hinaus besteht aufgrund der teilweise schwierigen Klassifizierung und Definition Unklarheit darüber, was als Rechenzentrum gilt. Selbst kleine Unternehmen, die ihre Server im Keller betreiben, können als Rechenzentren betrachtet werden. Die Erfassung dieser Einrichtungen gestaltet sich jedoch schwierig. Daher ist es derzeit nicht möglich, einen umfassenden Überblick zu erhalten.

Allerdings werden Rechenzentrums- und Informationstechnikbetreiber im aktuellen Entwurf eines Gesetzes zur Steigerung der Energieeffizienz und zur Änderung des Energiedienstleistungsgesetzes vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz adressiert (Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz 2023b). In dem Entwurf ist beschrieben, dass Rechenzentrums- und Informationstechnikbetreiber ab einer bestimmten Größe Angaben über ihren Standort und über ihre Verbräuche jährlich

an eine Registerdatenbank zu melden haben. Diese Daten sollen teilweise öffentlich einsehbar online dargestellt werden.

Somit könnten bessere Erkenntnisse über den aktuellen Stand der Branche gemacht werden, außerdem kann beispielsweise eine Abwärmenutzung möglich gemacht werden.

6.3.3 Schwerindustrie

Die Schwerindustrie spielt eine wichtige Rolle für die digitale Infrastruktur, da sie die notwendigen Ressourcen und Materialien für die Herstellung von Hardware-Komponenten bereitstellt, die für die digitale Infrastruktur benötigt werden. Die Schwerindustrie stellt zum Beispiel Stahl her, der für den Bau von Rechenzentren, Mobilfunkmasten und anderen Infrastrukturbauten benötigt wird. Sie stellt auch Rohstoffe wie Kupfer und Silizium her, die für die Produktion von Chips und anderen elektronischen Bauteilen benötigt werden.

Darüber hinaus spielen Schwerindustriunternehmen eine wichtige Rolle bei der Entwicklung neuer Technologien, die für die digitale Infrastruktur benötigt werden. Zum Beispiel sind Unternehmen der Schwerindustrie an der Entwicklung von Robotern, autonomen Fahrzeugen und anderen fortschrittlichen Technologien beteiligt, die für die digitale Infrastruktur von Bedeutung sind.

Insgesamt ist die Schwerindustrie ein wichtiger Bestandteil der Lieferkette für die digitale Infrastruktur und spielt eine entscheidende Rolle bei der Bereitstellung von Ressourcen, Materialien und Technologien, die für den Betrieb und die Erweiterung der digitalen Infrastruktur notwendig sind.

Diese Übersicht basiert auf dem Zensus der 2021 vorgenommenen Aufstellung der besonderen Ausgleichsregelung für Betriebe (Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz). Während diese Betriebe keinen direkten Einfluss auf die IT-Infrastruktur haben, ist jedoch festzustellen, dass für emissionsintensive Betriebe, welche auf Optimierungs- und Koordinierungspotentiale aus der Digitalisierung zählen, eine stabile IT-Infrastruktur sehr wichtig ist. Deswegen lohnt es sich, diese hier in ihrer Verteilung aufzuzeigen, um mögliche Engpässe erarbeiten zu können (siehe Abb. 39).

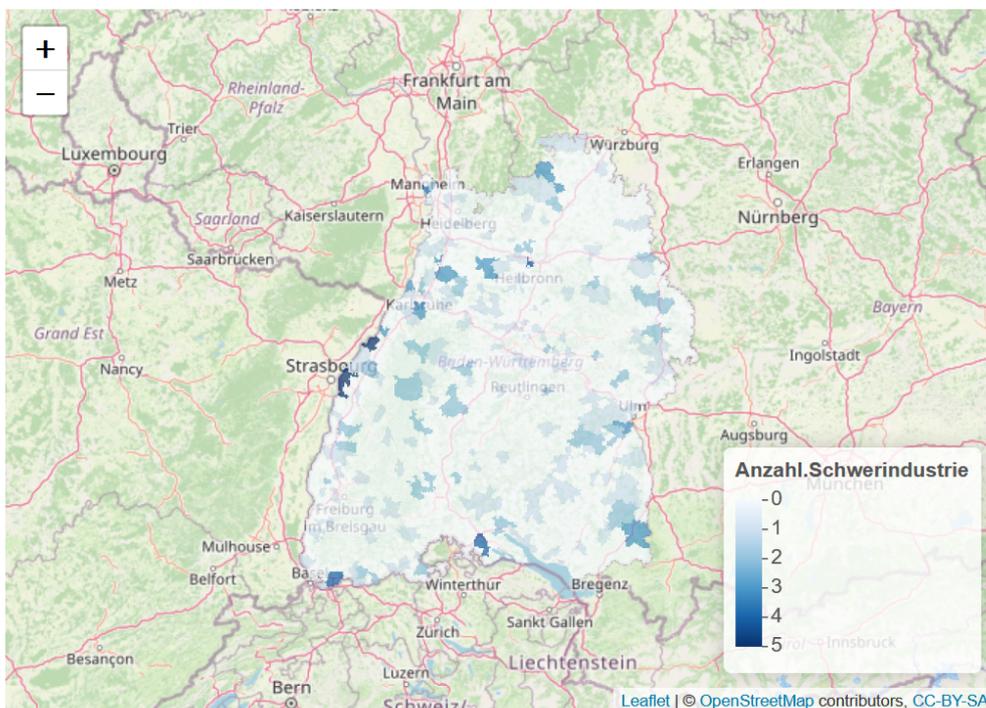


Abbildung 39: Kartenansicht Baden-Württemberg mit der Verteilungsdichte von Schwerindustrie

Die Bestimmung einer „guten“ Anzahl von Schwerindustrie in einer bestimmten Region wie Baden-Württemberg hängt von verschiedenen Faktoren ab, einschließlich der wirtschaftlichen und sozialen

Bedingungen, Umweltfaktoren und politischen Zielen. Es gibt keine einheitliche Antwort auf diese Frage, da die ideale Anzahl von Schwerindustriebetrieben von verschiedenen Interessen und Perspektiven abhängt.

Einige Aspekte, die bei der Beurteilung einer angemessenen Anzahl von Schwerindustrie berücksichtigt werden können, sind:

- **Wirtschaftliche Bedeutung:** Die Schwerindustrie kann eine wichtige Rolle für die Wirtschaft einer Region spielen, indem sie Arbeitsplätze schafft, Investitionen anzieht und die industrielle Basis stärkt. Daher könnte eine angemessene Anzahl von Schwerindustriebetrieben in Baden-Württemberg davon abhängen, wie gut sie zur Wirtschaftsentwicklung und –stabilität der Region beiträgt.
- **Umweltauswirkungen:** Schwerindustriebetriebe können potenziell erhebliche Umweltauswirkungen haben, insbesondere in Bezug auf Emissionen, Abfallentsorgung und Ressourcenverbrauch. Eine „gute“ Anzahl von Schwerindustriebetrieben in Baden-Württemberg könnte daher auf eine angemessene Balance zwischen wirtschaftlichen Vorteilen und Umweltbelastung abzielen, beispielsweise durch strikte Umweltauflagen und nachhaltige Produktionspraktiken.

6.3.4 Breitbandabdeckung

Baden-Württemberg macht auf dem Weg zur flächendeckenden Versorgung mit schnellem Internet beachtliche Fortschritte. Seit 2016 hat das Land 1,69 Milliarden Euro und der Bund weitere 1,84 Milliarden Euro für insgesamt rund 3,53 Milliarden Euro zur Verfügung gestellt, um 3.170 kommunale Förderprojekte zu unterstützen (Stand: 1. September 2022).

Die Anzahl der Haushalte und Unternehmen, die mit schnellem Internet versorgt werden, nimmt stetig zu. In Baden-Württemberg verfügen bereits 88,9 Prozent der Haushalte über einen Internetanschluss mit einer Downloadgeschwindigkeit von mindestens 100 Megabit pro Sekunde (Mbit/s). Zudem sind derzeit 59,5 Prozent der Haushalte mit einem Anschluss von 1.000 Mbit/s im Gigabit-Bereich ausgestattet. Das Ziel, eine flächendeckende Breitbandinfrastruktur bis zum Jahr 2025 zu erreichen, rückt somit immer näher (Ministerium des Inneren, für Digitalisierung und Kommunen in Baden-Württemberg).

Um die aktuelle Situation zur Breitbandabdeckung in Baden-Württemberg zu visualisieren wurden die Daten der Bundesnetzagentur verwendet und in die Shiny Applikation integriert (Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahn 2022).

Glasfaserleitungen und Breitbandabdeckung

Das Verhältnis der Glasfaserkabelänge zur Fläche des Landkreises wird auf den ersten Blick größer, je größer die Fläche des Landkreises ist. In einigen Landkreisen ist allerdings zu sehen, dass sie trotz kleinerer Fläche eine längere Glasfaserabdeckung haben. Hier handelt es sich um eher städtische Gebiete wie Stuttgart, Esslingen und Ludwigsburg. Während andere Landkreise in ähnlicher Größe, die etwas ländlicher liegen, eine kleinere Glasfaserversorgung haben.

5G Verfügbarkeit

5G-Netze sind wesentlich schneller als 4G-Netze. Mit 5G können Daten mit Geschwindigkeiten von mehreren Gigabit pro Sekunde übertragen werden, was die Datenübertragungsgeschwindigkeit und die Reaktionszeit (Latenz) verbessert. 5G-Netze ermöglichen es, die Konnektivität auch in Gebieten mit schlechter Abdeckung zu verbessern. Dies ist besonders wichtig für ländliche Gebiete oder Orte, an denen der Ausbau von Glasfaser-Infrastruktur schwierig oder kostspielig ist.

Abbildung 40 zeigt die 5G-Verfügbarkeiten in Baden-Württemberg auf Gemeindeebene in Prozent.

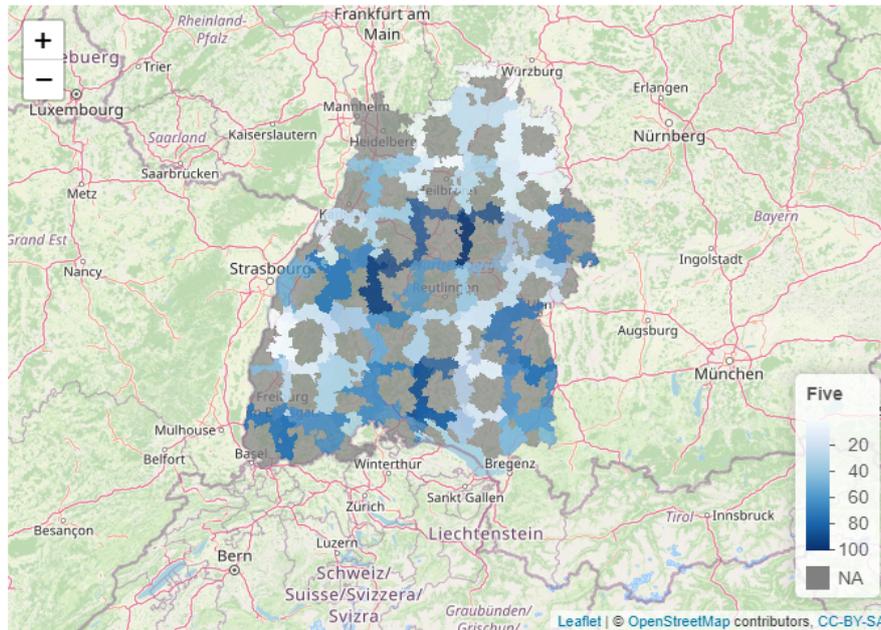


Abbildung 40: 5G-Verfügbarkeit Gemeindeebene Baden-Württemberg

6.3.5 Fazit

Obwohl es sich als schwierig erweist standortgenaue und vollständige Daten zu erheben, kann gesagt werden, dass die digitale Infrastruktur in Baden-Württemberg gut entwickelt und fortschrittlich ist. Das Land hat erhebliche Anstrengungen unternommen, um den Ausbau und die Verbesserung der digitalen Infrastruktur voranzutreiben.

Baden-Württemberg hat in den letzten Jahren erheblich in den Ausbau von Breitbandinternet investiert. Durch verschiedene Initiativen werden große Teile des Landes mit einem schnelleren Internetzugang versorgt, einschließlich ländlicher Gebiete (Ministerium für Inneres, Digitalisierung und Migration Baden-Württemberg 2020; Ministerium des Inneren, für Digitalisierung und Kommunen Baden-Württemberg 2023). Baden-Württemberg hat eine stark industrielle Basis, insbesondere im Maschinenbau und der Automobilindustrie. Diese Branchen haben sich aktiv mit der digitalen Transformation und der Implementierung von Industrie 4.0 Konzepten befasst. Dies hat zur Entwicklung und Anwendung fortschrittlicher digitaler Technologien in der Produktion und Logistik geführt.

Obwohl die digitale Infrastruktur in Baden-Württemberg im Allgemeinen gut entwickelt ist, gibt es immer noch Herausforderungen und Verbesserungsmöglichkeiten. Dazu gehören der flächendeckende Ausbau von 5G-Mobilfunknetzen, die Stärkung der Datensicherheit sowie die Förderung digitaler Kompetenzen und Bildung. Dennoch bleibt Baden-Württemberg ein Vorreiter in der digitalen Transformation und setzt sich aktiv für eine zukunftsfähige digitale Infrastruktur ein.

7 Arbeitspaket 6 – Bewertung, Öffentliche Verwaltung als First Mover, Kommunikation und Wissensvermittlung

7.1 Ziel des Arbeitspakets

Im Rahmen dieses Arbeitspakets sollen Indikatoren ausgearbeitet werden, die im Zusammenhang mit der Digitalisierung in Baden-Württemberg auftretenden Veränderungen und Maßnahmen bewerten. Hierfür soll ein Indikatorenset mit bis zu 10 Einzelbewertungen festgelegt werden, das Technologien, Maßnahmen oder Veränderungen in den Kategorien Ökonomie, Ökologie und Sozialem bewertet.

7.2 Begriffsdefinitionen

Um eine einheitliche Definitionsgrundlage zu schaffen, werden einige Begriffe für den Kontext dieser Arbeit definiert.

7.2.1 Ökonomische Bewertung:

Die ökonomische Bewertung ist ein Maß, um die finanzielle Sinnhaftigkeit einer Technologie, Maßnahme oder Veränderung einzuordnen. Hierfür haben wir eine monetäre Einheit ins Verhältnis zu einem Nutzen gesetzt. Der Nutzen ist abhängig vom Ziel und besteht aus einer Bezugseinheit. Werden verschiedene Alternativen oder eine Veränderung zum Status Quo verglichen, sollte die Bezugseinheit identisch sein.

7.2.2 Ökologische Bewertung:

Die ökologische Bewertung ist ein Maß, um eine Technologie, Maßnahme oder Veränderung hinsichtlich ihres Nutzens bzw. Schadens auf ökologische Kennwerte zu quantifizieren. Im Rahmen dieses Projekts sind vor allem die Kennwerte des Energieverbrauchs, Treibhausgasausstoß und Ressourcenverbrauchs relevant, wobei diese ebenfalls auf eine Bezugseinheit (bzw. Nutzen) bezogen werden.

7.2.3 Soziale Bewertung:

Die soziale Bewertung ist ein Maß um Technologien, Maßnahmen oder Veränderungen hinsichtlich ihres Einflusses auf den Menschen und die Gesellschaft zu bewerten. Die Bewertung anhand einer Bezugseinheit ist in diesem Bereich nicht immer möglich, aber nicht ausgeschlossen. Die Bewertung der sozialen Auswirkungen ist meist nur in Bezug auf einen Status Quo oder eine andere Alternative möglich und somit eine relative Bewertung. Eine absolute Bewertung wie beispielsweise in einer linguistischen Bewertung in die Kategorien „sozial nachhaltig“ und „soziale nicht nachhaltig“ ist möglich, sollte aber durch klar definierte Kriterien für die entsprechenden Kategorien abgegrenzt werden.

7.3 Methodik

Für das Arbeitspaket 6 wurde eine Literaturrecherche als primäre wissenschaftliche Methoden angewandt.

- Literaturrecherche

Die Literaturrecherche basierte auf einer systematischen Analyse der verfügbaren Quellen (Fachliteratur, Datenbanken, Statistiken oder Websites). Sie diente vor allem dazu, den Stand der Wissenschaft zu ermitteln.

Folgend auf die Literaturrecherche werden Bezugseinheiten und Bewertungsmethoden vorgestellt, um die im Projekt erarbeiteten Erkenntnisse und Empfehlungen bewerten zu können.

Da im Projekt viele Aspekte der Digitalisierung betrachtet werden, ist es nötig die Bewertungsindikatoren bzw. die Bezugseinheiten abhängig von der zu bewertenden Technologie, Maßnahme oder Veränderung zu wählen. Hierfür werden konkrete Beispiele gegeben und die zugrundeliegende Methodik

erläutert. Für den einzelnen Fall ist es jedoch nötig ggf. von der Bezugseinheit abzuweichen oder diese zu erweitern.

7.4 Beurteilung von Digitalisierungsmaßnahmen in Hinsicht auf ihren ökologischen, ökonomischen und sozialen Einfluss

Das Ziel von AP6 ist es zudem einen einheitlichen, gleichzeitig praktischen Bewertungsansatz für die Durchführung von Digitalisierungsmaßnahmen zu entwickeln. In der Entwicklung dieses Ansatzes wurde auf übergeordnete Indikatoren aus dem Indikatorenbericht des Landes Baden-Württembergs und zusätzliche Indikatoren aus vergangenen Projekten (EcoRZ) zurückgegriffen. Diese wurden anhand ihres Zusammenhangs mit dem Thema Digitalisierung reduziert und angepasst.

In der nachstehenden Erläuterung zur ökonomischen, ökologischen und sozialen Bewertung der Digitalisierung muss darauf hingewiesen werden, dass durch ihre Ausbreitung und Mannigfaltigkeit Effekte und Bewertungen oftmals nicht trennscharf in die unterschiedlichen Sektionen eingeteilt werden können. Zudem wird auf die Bewertung der Auswirkungen des Ausbaus der digitalen Infrastruktur weitestgehend verzichtet. Diese Bewertung, in Hinsicht auf soziale, ökonomische und ökologische Faktoren, fand im Projekt EcoRZ ausführlich statt, und ist offen einsehbar.

7.4.1 Ökonomische Bewertung

Die ökonomische Bewertung von Digitalisierungsmaßnahmen ist ein sehr breites Feld. Wissenschaftler*innen befassen sich in diesem Gebiet mit unterschiedlichsten Fragen. So werden sowohl standardisierte Methoden entwickelt, um den Digitalisierungsgrad eines Landes oder eines Unternehmens zu quantifizieren (Katz et al. 2014), als auch Zusammenhänge zwischen Digitalisierung von individuellen Unternehmen und Branchen (Okorie et al. 2018; Abby Paterson und D. Bourell 2012), bis hin zu ganzen Volkswirtschaften (Elena Stremousova, Olga N. Buchinskaia 2019) bewertet. Die aus der wissenschaftlichen Literatur zählt unterschiedliche Vorteile für das wirtschaftliche Wachstum eines Landes auf. Mit einer verbesserten Konnektivität, mehr Integration und Humankapital wird der Grundstock gelegt, für mehr Skalierung von bestehenden Geschäftsmodellen (William H Lehr et al. 2014), der Erschließung von neuen Märkten und Wirtschaftszweigen (Robert Crandall et al. 2007) und Optimierungen, beispielsweise in der Supply Chain (Robert D. Atkinson, Daniel Castro, Stephen Ezell 2009). Durch Technologien und Methoden aus dem Bereich Big Data Analytics und Machine Learning können, in Kombination mit dem Mehraufkommen von Daten, einiger dieser Tendenzen noch verstärkt werden. So werden Prozesse zunehmend unter entsprechendem Einsatz optimiert sowie neue Wirtschaftszweige in der Datenökonomie erschlossen.

Nichtsdestotrotz muss angemerkt werden, dass die Effekte von Digitalisierung in der ökonomischen Bewertung nicht immer direkt messbar sind. In vielen Fällen lassen sich digitale Instrumente als eine Unterstützung der primären Wertschöpfung sehen, beispielsweise durch mehr Transparenz und Effizienz, sodass eine direkte Quantifizierung der Maßnahmen schwerfällt. Hierbei müssen auf Seiten der Anwendenden Annahmen und Schätzungen getroffen werden.

Auf der europäischen Ebene wurde der Einfluss des Digitalisierungsgrads auf das Bruttoinlandprodukt (BIP) beispielsweise mithilfe eines Digitalisierungsindex gemessen. Der Einfluss, laut der Studie, läuft sich auf zweistellige Milliardenbeträge (z.B. 61,48 Mrd. US \$ im Jahr 2010). In diesem Index sind für die Digitalisierung entscheidende Faktoren integriert, welche das Potential zur ökonomischen Wirkung einfangen und eine gute Orientierung für ökonomisch effektive Digitalisierungsmaßnahmen geben (Katz et al. 2014). Eine weitere Studie untersucht die Beziehung zwischen dem Digitalisierungsindex einzelner EU-Mitgliedsstaaten (DESI) und dem Output der respektiven industriellen Produktion (A. Lastauskaite und R. Krusinskas 2021). Der Index für digitale Wirtschaft und Gesellschaft (DESI) ist eben-

falls ein zusammengestellter Index, welcher den Digitalisierungsgrad eines Landes bemisst. Es wird geschätzt, dass eine Verbesserung eines Digitalindex um 1 % das Wirtschaftswachstum pro Kopf um 0,13 % erhöht, wobei der Effekt in Abhängigkeit des Landes schwankt (Katz und Callorda 2017).

Beide Indexe zusammen orientieren sich an einigen Angelpunkten, welche im Folgenden beleuchtet werden.

Humankapital

In beiden Studien wird als eine der wichtigsten Indikatoren das vorhandene Humankapital angeführt. Dazu gehören sowohl der allgemeine Bildungsgrad der Population, als auch das Vorhandensein von grundlegenden digitalen Fähigkeiten bis hin zum Anteil von IT-Fachkräften in der Grundpopulation.

Je höher der Grundstock an gut ausgebildeten Bürger*innen (in den Worten der Wissenschaftler*innen, mehr als Sekundarstufe), desto einfacher gehe die Anpassung auf die neuen, digitalen Gegebenheiten von Statten (Katz et al. 2014). Darüber hinaus sei es wichtig, dass das gesamte Spektrum der digitalen Fähigkeiten in der Bevölkerung vertreten sei. Hierzu zählen sowohl grundlegende Fähigkeiten, welche die vermehrte Nutzung von IT in einer breiten Anzahl von Sektoren und Sparten etablieren kann, als auch Spezialisten, welche neuartige, IT-basierte Produkte und Dienstleistungen entwickeln können (European Commission 2022a).

In einer Großzahl der digital bereits fortgeschrittenen Länder bestehe der Hauptfokus (und Herausforderung) auf der digitalen Weiterbildung der Gesellschaft, um weitere wirtschaftliche Potentiale auszuschöpfen (Katz et al. 2014) und eine vollständige Teilhabe an der digitalen Gesellschaft zu ermöglichen (European Commission 2022a). Das deckt sich mit der Annahme, dass besonders im Thema Software die Herausforderungen zur Schaffung neuer Geschäftsfelder und Wirtschaftszweige zunächst kreativer und intellektueller Natur sind und weniger von einer Verbesserung beispielsweise der digitalen Infrastruktur profitieren. Die Investitionen aus öffentlicher Hand in Bezug auf Forschungsstellen in Schlüsselbereichen der Digitalisierung sind Teil der allgemeinen Investitionen in Forschung und Entwicklung (#14.1), welcher ein wichtiger Beitrag für die ökonomische Entwicklung eines Landes sind

Konnectivität

Die Konnectivität ist ein Faktor, welcher sich aus dem Status der digitalen Infrastruktur zusammensetzt. Hierzu gehören die Abdeckung und Penetration des Breitband- und Mobilfunknetzes sowie dessen Geschwindigkeit. Als zweiter Faktor sind die dazugehörigen Kosten zu betrachten, welche den Unternehmen und Bürger*innen in der Teilhabe an der digitalen Wirtschaft und Gesellschaft begegnen. Im Ausbau des Breitbandnetzes steht Deutschland im europäischen Vergleich eher im Mittelfeld. Bezüglich der Preisgestaltung hingegen, steht Deutschland besser dar und befindet sich unter den günstigsten Standorten, um Kaufkraft korrigiert.

Die Konnectivität in den beiden genannten Ausprägungen hat einen direkten Einfluss andere Teilbereiche der Digitalisierung, etwa der Integration (folgende Sektion). Die notwendigen Investitionen in die Konnectivität finden sich auch in dem Indikatorenset des Landes Baden-Württemberg wieder, welches auch die Bruttoanlageinvestitionen im Vergleich mit dem Bruttoinlandsprodukt (#6.2) aufführt.

Integration

Die Integration der Digitalisierung sowohl im privaten als auch im öffentlichen Raum ist ein weiterer wichtiger Faktor für den Einfluss der Digitalisierung auf die Wirtschaft. Hierzu gehört der Digitalisierungsgrad in Unternehmen, also beispielsweise die Nutzung digitaler Tools für Kommunikation und Lösungen wie eCommerce Plattformen. Weitere Indikatoren sind die Nutzung von Cloud und Big Data Technologien und das digitale Bereitstellen von Daten (European Commission 2022a; Katz et al. 2014).

Außerdem zählt der Digitalisierungsgrad der öffentlichen Verwaltung dazu, was sich z.B. in dem Angebot digitaler Dienstleistungen gegenüber Bürger*innen und dem Anteil digital integrierter Prozesse in

Verwaltungsorganen niederschlägt. An dieser Stelle muss erwähnt werden, dass sich mit zunehmender Integration von digitalen Services die Auswirkungen und Angriffspunkte möglicher Cyberattacken vergrößern.

Die Integration digitaler Angebote in Unternehmens- und Verwaltungsprozesse und dessen Nutzung ist ein wichtiger Indikator für den Digitalisierungsgrad und als Konsequenz auch für den möglichen wirtschaftlichen Hebel.

7.4.2 Ökologische Leistungsbewertung

Wäre das Internet ein Land, es wäre das sechst größte Land in punkto Elektrizitätsverbrauch (Anders S G Andrae 2020). Bis zu 7 % des globalen Elektrizitätskonsums fällt auf das Internet. Doch nicht nur der Energieverbrauch ist hoch, sondern auch der Hunger nach Ressourcen für immer neue Hardware hat einen negativen ökologischen Einfluss.

Die ökologische Bewertung von Digitalisierungsmaßnahmen ist komplex. Besonders indirekte Effekte lassen sich auf Grund der komplexen Wirkungsketten nur schwerlich quantifizieren und in den meisten Fällen lediglich beschreiben. Die untenstehende Übersicht über die Wirkungsketten von digitalen Dienstleistungen, welche vom Umweltprogramm der Vereinten Nationen (UNEP) erstellt wurde, gibt einen Eindruck der Komplexität.

Die steigende Nachfrage nach digitalen Dienstleistungen wird von unterschiedlichen Faktoren angefeuert. Darunter mehr Konnectivität, soziale Netzwerke oder das Internet der Dinge. Dies wiederum erhöht den Anspruch auf die digitale Infrastruktur, die Ressourcennutzung und Emissionen. Dazu kommt, dass sich viele Faktoren, wie z.B. Gesundheit, wiederum die Nachfrage nach Dienstleistungen erhöhen.

Ressourcen und Energie

Die ökologischen Kosten von Digitalisierung lassen sich in die folgenden Kategorien unterteilen: der Energieverbrauch und die Ressourcennutzung. Während sich im Energieverbrauch auch die indirekten Folgen der zunehmenden Digitalisierung widerspiegeln, finden sich bei der Ressourcennutzung besonders die Hardwarekomponenten. Für den Ausbau der digitalen Infrastruktur und die Herstellung von mehr digitalen Geräten werden neben Energie auch große Mengen an Metallen, Wasser und nicht zuletzt auch Land gebraucht. Dieses Land wird im Zuge von Ressourcenextraktion denaturiert und für den Aufbau von notwendiger Infrastruktur versiegelt.

In dem Indikatorenbericht des Landes Baden-Württemberg wird auch der Ressourcen- und Energieverbrauch in den Vordergrund gestellt. Die Energieproduktivität (#1.1) bezeichnet hierbei das Verhältnis von Bruttoinlandsprodukt zum Energieverbrauch, und die Ressourcenproduktivität (#4.1) das Verhältnis bezüglich genutzter Ressourcen. Je weniger Energie und Ressourcen für ein bestimmtes wirtschaftliches Ziel gebraucht wird, desto besser für die Umwelt. Indirekt, stellt dieser Wert auch auf Effizienzgewinne aus der Digitalisierung ab, wie unten beschrieben. Ähnliche Effizienzgewinne aus der Digitalisierung finden sich in einem weiteren Faktor aus dem Indikatorenset wieder. Der Energieverbrauch privater Haushalte (#1.2) kann etwa durch die intelligente Steuerung von elektrischen Großgeräten gesenkt werden. Der Landverbrauch durch Versiegelung und Bebauung spiegelt sich als weitere Indikator im baden-württembergischen Bericht wieder, ähnlich wie der Ressourcenverbrauch für digitale Produkte und Dienstleistungen generell. Die Flächeninanspruchnahme bezeichnet den Anstieg an Siedlungs- und Verkehrsflächen pro Tag, während der Ressourcenverbrauch pro Kopf (#4.2) ein Repräsentant für den steigenden Verbrauch von elektronischen Geräten sein kann.

Weitere, aus dem Indikatorenset entnommene Werte, welche allerdings weniger stark mit der Digitalisierung zusammenhängen sind die des Anteils erneuerbaren Energien am Primärenergieverbrauch (#1.3) sowie der Treibhausgasemissionen im Vergleich zu 1990. Für beide Indikatoren gilt, dass sie zwar für die ökologische Bewertung sinnvoll, jedoch nur indirekt mit der Digitalisierung verknüpft sind.

Optimierung und Koordination

Allerdings hat die Digitalisierung nicht nur negative Effekte, sondern kann in unterschiedlichen Szenarien auch der Umwelt zuträglich sein. Diese Wirkungen lassen sich primär in zwei Bereiche einteilen. Zum einen ermöglicht die Digitalisierung allgemein Optimierungspotential zu heben. Dieses findet in unterschiedlichen Kontexten sowohl auf privater als auch auf öffentlicher Ebene statt. So lassen sich z.B. in der Landwirtschaft der Einsatz von Wasser und anderen Ressourcen optimieren, indem durch digitale Instrumente etwa aktuelle Bodenverhältnisse gemessen werden können oder in Industrieprozessen durch Sensorik die Anlagensteuerung verbessert werden kann. Generell können durch Monitoring auch Businessprozesse optimiert und somit Ressourcen und Energie eingespart werden. Dies geschieht z.B. durch das Monitoring von Kundenbewertungen, was zu einer Reduzierung von Produktionen führt, die nicht von Endkunden abgenommen werden. Ein weiterer Faktor, der positiv für die Emissionsbilanz der Digitalisierung ist, ist die Ermöglichung von mehr Koordination. Dies bezieht sich sowohl auf die Koordinierung von Produktion im B2B-Bereich, etwa in punkto Circular Economy (#4.1), als auch auf den Konsumentenbereich mit Angeboten wie Car- oder Foodsharing. Eine tiefergehende Bewertung der Effekte einzelner Trends der Digitalisierung in Hinsicht auf Energie- und Ressourcenverbrauch befindet sich in AP1.

Der Energy Reuse Factor, der ein etablierter Standard in der Bemessung von nachhaltigen Rechenzentren ist, kann in Bezug auf Digitalisierung und Ökologie ein weiterer Indikator sein. Er bezeichnet den Anteil an wiederverwendeter Energie im Verhältnis zum gesamten Energieverbrauch über einen bestimmten Zeitraum gerechnet.

7.4.3 Soziale Leistungsbewertung

Der Einfluss der Digitalisierung auf das soziale Geflecht der Gesellschaft ist immens. Dies gilt sowohl in positiver als auch in negativer Hinsicht. Durch die Interdependenz zwischen der sozialen und der ökonomischen und ökologischen Bewertung, ist die Bewertung komplex.

Phänomene wie die sozialen Medien haben einen umstrittenen Einfluss auf die soziale Interaktion zwischen Menschen, deren psychische Gesundheit sowie politische Bewegungen. Gleichzeitig ermöglichen sie aber auch das Aufrechterhalten von Kontakten und Freundschaften, und haben nicht zuletzt auch in der Pandemie dazu beigetragen, dass sich Familien und Freunde trotz Kontaktbeschränkungen nah sein konnten. Die positiven ökonomischen Einflüsse der Digitalisierung zeigen sich in Form neuer Märkte und Wirtschaftszweige sowie der Kreation neuer Arbeitsplätze. Gleichzeitig sind diese jedoch nicht gleichmäßig über die Breite der Bevölkerung verteilt, was die Einkommensungleichheit in Deutschland verstärkt. In der Gesundheitsversorgung hingegen ermöglichen digitale Technologien die Ausweitung von Angeboten und die effizientere Abwicklung von existierenden Prozessen.

Sozioökonomische Effekte

Die Digitalisierung hat, wie in Kapitel 3.1 beschrieben, einen starken Einfluss auf die Wirtschaft. Dieser Einfluss ist entschieden positiv. Neue Wirtschaftszweige und Märkte werden ermöglicht, bestehende Prozesse werden effizienter und neue Arbeitsplätze werden geschaffen, welche gut dotiert sind.

Diese positiven Einflüsse schlagen sich in der sozialen Wertung nieder, jedoch oftmals nicht gleichmäßig. So fallen durch die Optimierung und Automatisierung von Prozessen viele Arbeitsplätze weg, besonders im Niedriglohnssektor (Brynjolfsson und McAfee 2014). Diese arbeitnehmenden Personen sind darauf angewiesen neue Angebote zu finden, welche oftmals mit einer Umschulung oder Weiterbildung zusammenhängen. In diesem Zuge wird vielerorts von der Erosion der Mittelschicht gesprochen, welche durch die Automatisierung von Unternehmensprozessen zunehmend gefährdet ist. So fallen nicht nur Arbeitsplätze in der Fertigung und Produktion neuartigen Robotern zum Opfer, sondern auch Bereiche der Sachbearbeitung und Administration (Sachs und Kotlikoff 2012). Die Wahrscheinlichkeit für Arbeitnehmende von der Digitalisierung wirtschaftlich und somit sozial zu profitieren hängt dem-

entsprechend maßgeblich vom Bildungsniveau und technischen Know-How ab. Zudem vertieft die bestehende wirtschaftliche Ungleichheit das Problem. Menschen aus prekären Verhältnissen fehlt oftmals die technische Ausstattung, um wirtschaftliche oder bildungstechnische Möglichkeiten im digitalen wahrzunehmen.

Die sozioökonomische Betrachtung ist auch Teil der Bewertungskriterien des Landes Baden-Württemberg. Hier werden Faktoren wie die Armutsgefährdung (#7.1), das Einkommensreichtum (#7.2) sowie die in Teilzeit und befristet angestellten Beschäftigten (#6.6) und der Erwerbstätigen allgemein (#6.5) betrachtet.

Service Delivery (Health, Public Services)

Ähnlich wie in der wirtschaftlichen Betrachtung, ist auch für die sozialen Einflüsse die Umgestaltung von Prozessen durch die Digitalisierung ausschlaggebend. So lassen sich hier nicht nur ökonomische Vorteile anbringen, sondern auch soziale.

Das bezieht sich zum Beispiel auf das Angebot digitaler und effizienterer Dienstleistungen, wie im Bürgeramt. Heutzutage findet sich in fast jeder Gemeinde mit mehr als 20.000 Einwohnern ein solches Büro. Was initial als ein Anlaufpunkte für alle Verwaltungsgänge der Bürger*innen konzipiert war, stellt diese heute oftmals auf die Geduldssprobe mit langen Wartezeiten und weitestgehend analogen Interaktionen. Eine Studie in den Städten Freiburg, Mannheim, Karlsruhe und Bochum hat gezeigt, dass gut 83 % aller Kontakte im Büro vor Ort stattfinden. Der Anteil digitaler Kontakte liegt bei gerade mal 10 %. Onlineauftritte von Bürgerbüros lassen heute zwar zu, dass Bürger*innen sich online informieren, es geht jedoch in den wenigsten Fällen mit der digitalen Abwicklung weiter. Die Durchsetzung von Digitalisierung in diesem Bereich kann, wenn Hürden überwunden werden können, einen starken sozialen Nutzen entfalten, durch eine bessere Abdeckung und mehr Zugangsmöglichkeiten.

Ein anderer Bereich, in dem die Digitalisierung einen starken sozialen Nutzen mit sich bringt, ist im Bereich Gesundheit und Gesundheitsversorgung. Sowohl Patient*innen, welche durch Apps und Wearables eigene Gesundheitsdaten tracken können, als auch Ärzt*innen, welche z.B. digitale Sprechstunden anbieten und weniger bürokratischen Aufwand haben, profitieren von der Digitalisierung. Zudem werden, in Anlehnung an die digitale Verwaltung, auch Prozesse in Gesundheitsämtern verbessert. Diese Fortschritte ermöglichen die Versorgung von mehr Bürger*innen – auch von denen, die in ländlicheren Gebieten wohnen. Aktuelle Initiativen, wie die digitale Patientenakte oder die digitale Bereitstellung von Rezepten, treiben diese Entwicklungen voran.

Fragmentierung

Die zunehmende Nutzung von Sozialen Medien hat zu einer stärkeren Polarisierung bei sozial und politisch umstrittenen Themen gesorgt. Der Großteil der Plattformen, die für den Austausch hierbei genutzt werden (Facebook, Twitter etc.), haben dazu beigetragen, indem sie ihre Produkte auf das Engagement, also auf die Interaktion, und die verwendete Zeit ihrer User*innen optimiert haben. Daraus folgt die Förderung von kontroversen Inhalten, die zum Interagieren anregen sowie die von Inhalten, die zu den Vorstellungen der jeweiligen Nutzenden passen. Als Konsequenz wird davon gesprochen, dass sich die Nutzenden an unterschiedlichen Seiten eines Meinungsspektrums nicht mehr vernünftig begegnen können und sich in sogenannten Filterblasen befinden. Die Auswirkungen solcher Entwicklungen lassen sich nicht zuletzt auch an Ereignissen wie der Leugnung von Corona oder dem Sturm auf das Kapitol in den USA erkennen. Gleichzeitig kann aber auch eine positive Seite dieser Entwicklung auf der interpersonellen Ebene gesehen werden. So finden sich in den Nischen des Internets Nutzende zusammen, die ohne diese Entwicklungen keinen Austausch gehabt hätten.

Im Zuge der Entwicklung der sozialen Medien als Plattformen haben sich Probleme im Bereich der mentalen Gesundheit manifestiert. Dies bezieht sich sowohl auf den zwischenmenschlichen Bereich, als auch auf das Selbstbildnis, welches sich durch die starke Nutzung sozialer Medien etabliert. Ersteres bezieht sich auf die Veränderung in der Art und Weise wie wir kommunizieren – der Trend geht in

Richtung mehr digitaler Kommunikation und weniger persönlicher, analoger Kommunikation. Durch den damit einhergehenden Verlust an persönlichen Kontakten degradieren Freundschaften und andere Verbindungen. Letzteres bezieht sich insbesondere auf die Informationsflut, welcher reguläre Nutzende von sozialen Medien täglich ausgesetzt sind. Mit dem oberflächlichen Einblick in das Leben anderer haben insbesondere Jugendliche Probleme, da sie sich mit anderen vergleichen und dementsprechend schlecht fühlen, wenn das Leben anderer subjektiv interessanter wirkt. Während es schwer ist, diesen Entwicklungen aktiv entgegen zu wirken, ist es dennoch wichtig sie bei der Auswahl von Maßnahmen einzubeziehen.

7.5 Nachhaltigkeitsindikatoren für Digitalisierungsmaßnahmen

Im Folgenden soll aus den vorhergehenden Sektionen eine Synthese erstellt werden, die ein Indikatorenset von maximal 12 Einzelindikatoren festlegt. Diese sollen bei der Bewertung von Digitalisierungsmaßnahmen in Hinsicht auf ökonomische und soziale, aber besonders ökologische Nachhaltigkeit, helfen. Um die Handhabung realistisch und anwenderfreundlich zu machen, sollen die Indikatoren auf einer Skala von 1 bis 5 entwickelt werden, um für unterschiedliche Maßnahmen in der Abwägung ein klares Bild zu malen. Je nach Indikator bezieht sich die Skala auf unterschiedliche Dimensionen, welche für den Faktor spezifisch sind. Aufgrund des breiten Anwendungsfeld der Indikatoren, sind diese in ihrer Natur eher qualitativ gehalten und weniger an konkrete Metriken gebunden.

In der Anwendung sind die aufgestellten Indikatoren eher makroökonomischer Natur, nicht zuletzt wegen des breiten Spektrums der Maßnahmen. Viele Indikatoren können jedoch für die Bewertung von Maßnahmen innerhalb von Unternehmen adaptiert werden, indem die zugrundeliegende Datenbasis auf Unternehmenskennzahlen angepasst wird. Beispiele und Anregungen für die einzelnen Indikatoren werden in den folgenden Unterabschnitten beschrieben.

Die Gewichtung der einzelnen Indikatoren gestaltet sich wie folgt.

7.5.1 Sozial

Um den sozialen Einfluss von breiten Digitalisierungsmaßnahmen bewerten zu können, wird die soziale Nachhaltigkeit in vier Indikatoren wiedergespiegelt, die sich aus oben genannten Erläuterungen ableiten. Die vier Indikatoren sind:

- Gini Koeffizient
- Arbeitslosenanteil
- Anteil digitaler Bürgerservices
- Anteil digitaler (psychischer) Gesundheitsdienste

Im Folgenden werden die einzelnen Indikatoren näher beschrieben.

Gini Koeffizient

Der Gini Koeffizient ist eine statistische Metrik, welche die Ungleichverteilung in einer Gesellschaft angibt. Er wird errechnet durch die Kumulation der in einer Gesellschaft verfügbaren Einkommen in Vergleich mit den absoluten Bevölkerungszahlen. Der Koeffizient reicht von 0 bis 1, wobei 0 absolute Gleichheit und 1 absolute Ungleichheit bedeutet. Der Koeffizient kann als Indikator für die aus Digitalisierungsmaßnahmen entstehenden Ungleichheiten fungieren und findet somit Platz in der sozialen Nachhaltigkeitsbewertung. Auf der Unternehmensebene kann der Gini Koeffizient angepasst Anwendung finden. So würden in diesem Zuge nicht etwas die verfügbaren Einkommen in einer Region oder Volkswirtschaft dargestellt werden, sondern innerhalb eines Unternehmens. Der Mechanismus des Indikators funktioniert in beiden Bereichen gleich.

In der Bewertung von Digitalisierungsmaßnahmen soll in diesem Indikator der projizierte Einfluss auf die Ungleichverteilung der Einkommen berücksichtigt werden. Die Einflüsse rangieren hierbei von

stark negativ (1) über neutral (3) bis stark positiv (5). Als negativ wird hierbei der Anstieg des Gini Koeffizienten bezeichnet, welcher für mehr Ungleichheit steht. Bei der Implementierung von Digitalisierungsmaßnahmen wird durch den Einbezug dieses Faktors dafür Sorge getragen, dass die drohende Ungleichverteilung von Einkommen Berücksichtigung findet.

Arbeitslosenquote

Die Quote der Menschen, welche nicht einer erwerbsorientierten Beschäftigung nachgehen bezeichnet man als die Arbeitslosenquote. Sie berechnet sie aus dem Anteil der Erwerbslosen an der Gesamtbevölkerung oder der Bevölkerung einer Region. Sie repräsentiert einen wichtigen Teil der sozialen Nachhaltigkeitsbewertung, da durch die Digitalisierung sowohl Jobs geschaffen, als auch zerstört werden. Auf die Unternehmensebene angewendet, kann hierbei die Arbeitslosenquote durch die Quote von Neueinstellungen zu Kündigungen ersetzt werden.

In der Bewertung stehen hierbei die Bewertungsmetriken von 1, einem stark negativen Einfluss auf die Arbeitslosenquote, bis 5, einem stark positiven Einfluss auf die Arbeitslosenquote. Hierbei wird positiv als ein Rückgang der Arbeitslosigkeit betrachtet. Bei der Bewertung von Digitalisierungsmaßnahmen sorgt die Arbeitslosenquote dafür, dass Entscheidungsträger in ihren Überlegungen den Einfluss der zu treffenden Maßnahmen auf den Arbeitsmarkt berücksichtigen.

Digitale Bürgerdienste

Digitale Bürgerdienste stehen nicht nur für mehr Effizienz und Zeitersparnis in der ökonomischen Betrachtung, sondern sorgen auch für mehr soziale Gerechtigkeit. Durch weniger Zeit, die Bürger*innen aufbringen müssen um die Dienste wahrzunehmen, wird der Zugang zu den Diensten gestärkt. Zusätzlich, kann die Betreuung von Bürger*innen verbessert werden, da Prozesse digital in Parallel ablaufen können und die individuelle Beratung durch die Mitarbeitenden entlastet wird. Vor dem Hintergrund einer Bewertung im Rahmen eines Unternehmens können hier die Dienstleistungen für Bürger*innen, durch solche für Arbeitnehmende ausgetauscht werden. Beispielsweise können digitale Leistungen in der Personalabteilung ähnliche Effekte aufweisen. Dort angesiedelte Mitarbeitende werden entlastet, Prozesse weniger zeitintensiv und transparenter, was sie gleichzeitig für Arbeitnehmenden zugänglicher macht.

Der Indikator wird berechnet durch den Anteil digitaler Dienstleistungen am grundlegenden Portfolio von Diensten in einem Organ oder einer Sammlung von Organen. Durch den Einbezug dieses Indikators wird dafür gesorgt, dass die digitale Unterstützung von Bürger*innen in der Bewertung von Digitalisierungsmaßnahmen eine Priorität erhält und somit der Zugang zu essenziellen Diensten für alle Bürger*innen gestärkt wird. Hierbei steht 1 für einen starken Rückgang des Anteils digitaler Dienste und 5 für einen starken Zuwachs des digitalen Anteils.

Digitale Gesundheit

Wie oben diskutiert, birgt die Digitalisierung sowohl Vorteile als auch Nachteile für das Gesundheitswesen und die Gesundheit der Bevölkerung. Durch mehr digitale Angebote in der Versorgung wird diese verstärkt und durch digitale Prozesse wird das System entlastet. Auf der anderen Seite stehen negative Einflüsse der Digitalisierung, z.B. für die mentale Gesundheit von Bürger*innen. Durch die Bereitstellung mehr digitaler Gesundheitsangebote können auch die negativen Folgen der Digitalisierung abgefedert werden. Unter anderem auch aus diesem Grund, wird der Anteil der digitalen Gesundheitsdienstleistungen am Gesamtangebot als sozialer Indikator aufgenommen. Das Thema von Gesundheit wird auch im Unternehmenskontext zunehmend als wichtig erachtet. Hier lassen sich im Rahmen dieses Indikators ähnliche Bewertungen vornehmen, sollte ein Unternehmen anstreben, das Angebot an digitalen Gesundheitsleistungen auszubauen.

Sollte projiziert werden, dass durch eine Maßnahme dieser Anteile eher sinkt, wird diese mit einer 1 oder 2 bewertet. Sollte das Angebot durch eine Maßnahme steigen, ist dieses positiv (4) oder sehr positiv (5).

7.5.2 Ökonomisch

Der ökonomische Einfluss der Digitalisierung ist enorm. Um diesen ökonomisch bewerten zu können, wird die ökonomische Nachhaltigkeit in vier Indikatoren dargestellt, welche sich aus oben genannten Erläuterungen ableiten. Die vier Indikatoren sind:

- Digitale Bruttoanlageinvestitionen
- Anteil Digitale Fähigkeiten in der Bevölkerung
- Breitbandabdeckung

Im Folgenden werden die einzelnen Indikatoren näher beschrieben.

Digitale Bruttoanlageinvestitionen

Die Bruttoanlageninvestitionen bezeichnen den Anteil von Ausgaben in Unternehmen, welche Investitionen gelten, die länger als ein Jahr gehalten werden sollen. Sie bilden hierbei die Investitionsquote eines Unternehmens. Die Metrik kann auch auf Regionen oder ganze Volkswirtschaften angewendet werden, um ein Bild der Investitionslage zu bekommen. Im Zuge der Bewertung von Digitalisierungsmaßnahmen soll dieser Indikator einen digitalen Anstrich bekommen, und die Investitionen in digitale Anlagen widerspiegeln.

Der Anteil von Investitionen exklusiv in digitale Güter soll hierbei für die Investitionsbereitschaft von Unternehmen in die Digitalisierung stehen. Bei einer positiven projizierten Entwicklung wird dieser Indikator mit 4 (positiv) oder 5 (stark positiv) bewertet. Falls ein Rückgang vorhergesagt wird, mit einer 2 (negativ) oder 1 (stark negativ).

Anteil Digitale Fähigkeiten in der Bevölkerung

Als wichtiger Faktor des ökonomischen Einflusses der Digitalisierung steht der Grad an digitalen Fähigkeiten in der Bevölkerung. Diese Fähigkeiten bilden den Grundstock für eine erfolgreiche digitale Transformation, für digitale Geschäftsmodelle und Wirtschaftszweige. Die weitere wirtschaftliche Entwicklung von Unternehmen und Gesellschaft hängt maßgeblich von diesen Fähigkeiten ab. Somit lassen sich für diesen Faktor sowohl makroökonomische als auch unternehmensweite Bewertungen vornehmen.

Aus diesen Gründen wird der Anteil der digital befähigten Arbeitnehmenden als ökonomischer Indikator in die Bewertung mit aufgenommen. Er steht nicht zuletzt auch in Verbindung mit der sozialen Verträglichkeit von Digitalisierungsmaßnahmen, da er auch einen Einfluss auf die Arbeitslosenquote, das Lohnniveau und dessen Verteilung hat. Bei einer projizierten Zunahme des Anteils der Bevölkerung mit signifikanten digitalen Fähigkeiten, wird dieser Indikator mit positiv, oder stark positiv bewertet. Sollte eine Maßnahme einen negativen oder stark negativen Einfluss aufweisen, wird dieser Indikator mit 2 oder 1 bewertet.

Breitbandabdeckung

Die Breitbandabdeckung ist ein wichtiger, stellvertretender Indikator für den Grad an Konnektivität einer Region. Die Konnektivität wiederum ist, wie oben beschrieben, ein entscheidender Faktor, welcher über die wirtschaftliche Entwicklung basierend auf fortschreitender Digitalisierung entscheidet. Nur mit adäquater Konnektivität lassen sich in allen Bereichen der Gesellschaft und Wirtschaft mögliche Potentiale heben, was die Optimierung und Koordination, aber auch Automatisierung von Prozessen angeht. Zudem spielt die flächendeckende Konnektivität auch eine wichtige Rolle in der sozialen Betrachtung, da sie ein entscheidender Faktor in der Inklusion im Einbezug unterschiedlicher Regionen

und sozialer Schichten spielt. In Bezug auf die Anwendung im unternehmerischen Kontext, spiegelt die Breitbandabdeckung die Konnektivität zwischen den unterschiedlichen Standorten des Unternehmens und seiner Mitarbeitenden wieder und kann somit auch hier Anwendung finden.

In der Bewertung einer Digitalisierungsmaßnahme soll deswegen die Breitbandabdeckung als Indikator Berücksichtigung finden. Wenn eine Maßnahme die Abdeckung positiv oder stark positiv beeinflusst, wird dieser Indikator mit einer 4 oder 5 bewertet. In der negativen Richtung werden dementsprechend die Zahlen 1 oder 2 angenommen.

7.5.3 Ökologisch

Ökologisch gesehen birgt die Digitalisierung viele Chancen. Jedoch kommen, speziell durch den Ausbau und die Nutzung von digitaler Infrastruktur, auch ökologische Risiken hinzu. Um diese bewerten zu können, wird die ökologische Nachhaltigkeit anhand 4 Indikatoren gemessen. Diese bestehen aus:

- Energieproduktivität
- Erneuerbare Energien
- Ressourcenproduktivität

Es soll abermals darauf hingewiesen werden, dass für eine genaue Betrachtung der ökologischen Folgen des Ausbaus von digitaler Infrastruktur, insbesondere von Rechenzentren, ein dediziertes Projekt in Form vom [EcoRZ](#) Projekt vorliegt. Unter diese Betrachtung fallen ökologische Abwägungen, wie bezüglich der Flächenversiegelung, welche spezifisch für den Aufbau von Rechenzentren, nicht aber für Digitalisierung im Allgemeinen wichtig sind. Im Folgenden werden die Indikatoren genauer betrachtet.

Energieproduktivität

Dieser Indikator stellt die Wirtschaftsleistung einer Region mit dessen Verbrauch an Primärenergieverbrauch gegenüber. Er gibt an, wie viel Energieverbrauch für eine bestimmte Wirtschaftsleistung notwendig ist. In der ökonomischen Bewertung von Digitalisierungsmaßnahmen schlägt sich dieser Wert somit nieder und gibt einen Anhaltspunkt zu diesem Verhältnis. Je höher die Energieproduktivität, also die wirtschaftliche Wertschöpfung pro eingesetzter Energieeinheit, desto weniger ist die Wirtschaft vom Einsatz von Energie abhängig. In ökologischer Hinsicht ist eine möglichst große Energieproduktivität vorteilhaft, da sie wirtschaften ohne den Ausstoß der mit Energiegeneration assoziierten Emissionen ermöglicht. Dieser Indikator kann durch das Abstellen auf organisationsinterne Daten bezüglich der Wirtschaftsleistung und des Energieverbrauchs auch auf ein einzelnes Unternehmen bezogen werden.

In der Bewertung von Maßnahmen, soll deswegen auch auf diesen Indikator eingegangen werden. Bei einer projizierten positiven oder stark positiven Entwicklung der Wirtschaftsleistung pro eingesetzter Energieeinheit, wird dieser Indikator mit 4 oder 5 bewertet. Andersherum, wird bei einer negativen oder stark negativen Entwicklung die Stufen 1 oder 2 genommen.

Erneuerbare Energien

Der Anteil erneuerbarer Energien am Gesamtaufkommen von Energie ist ein wichtiger Indikator für die ökologische Tragfähigkeit von Digitalisierungsmaßnahmen. In Zusammenhang mit der Energieproduktivität, sorgt der Anteil von erneuerbaren Energien für möglichst wenig energierelevante Emissionen durch wirtschaftliche Wertschöpfung. Die Digitalisierung kann hierbei eine entscheidende Rolle spielen, da durch Optimierungsanwendungen mithilfe digitaler Technologien der Betrieb und die Einbettung erneuerbarer Energien in das bestehende Energiesystem unterstützt werden können. Zugleich kann durch die durchgehend anliegende energetische Last von digitalen Anwendungen, wie z.B. von Rechenzentren, aber auch die Nutzung von erneuerbaren Energien erschwert werden. Auf dem unternehmerischen Level findet dieser Indikator in der Nutzung und Optimierung hauseigener erneuerbarer Energiesysteme Anwendung.

In der ökologischen Bewertung von Digitalisierungsmaßnahmen soll durch diesen Indikator dieses Spannungsfeld abgebildet werden und damit in die Bewertung mit einfließen. Bei einer positiven Entwicklung der erneuerbaren Energien durch geplante Maßnahmen, wird eine positive oder stark positive Bewertung angelegt. Bei einer negativen oder stark negativen Entwicklung entsprechend andere Bewertungen.

Ressourcenproduktivität

In Anlehnung an die Energieproduktivität, gibt die Ressourcenproduktivität an, in welchem Verhältnis die Wirtschaftsleistung zu den eingesetzten Ressourcen stehen und findet sowohl auf unternehmerischer, als auch auf makroökonomischer Ebene Anwendung. Die Digitalisierung spielt in dieser Hinsicht eine zweigeteilte Rolle. Zunächst kann durch die Optimierung von Produktions- und Unternehmensprozessen die Nutzung von Ressourcen effizienter gestaltet werden. Durch weniger Ausschuss und eine bessere Ausnutzung von Materialien bei gleichbleibender oder steigender Wirtschaftsleistung wird die Ressourcenproduktivität erhöht. Die zweite Rolle der Digitalisierung in dieser Hinsicht entfällt auf die Koordinationsfunktion digitaler Technologien. Sie ermöglichen, vor dem Hintergrund der Ressourcennutzung, mehr Circular Economy Ansätze, was zu einer besseren Nutzung von Ressourcen führen kann. Zusätzlich können durch digitale Technologien bestehende Ressourcen, z.B. Wälder, besser überwacht und dadurch geschützt werden. Diese Potentiale müssen gegen den Ressourcenverbrauch im Zuge des Infrastrukturaufbaus, etwa in Form von Rechenzentren, ausgeglichen werden.

In der Bewertung von Digitalisierungsmaßnahmen sollen die oben genannten Aspekte aufgewogen werden und entsprechend ihrer positiven oder negativen Einflüsse auf die Ressourcenproduktivität eingeordnet werden.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen des Projekts wurde die Nachhaltigkeit und die Ressourceneffizienz in der Informationstechnologie untersucht. Insbesondere wurde hierbei das Land Baden-Württemberg und Rechenzentren betrachtet. Die Untersuchung beinhaltete sechs Arbeitspakete, die verschiedene Aspekte der Auswirkungen auf den Ressourcen- und Energieverbrauch behandelten.

Im Projekt wurden die Auswirkungen der Digitalisierung auf Nachhaltigkeit und Effizienz umfassend analysiert. Besonders die IT-Branche und Rechenzentren spielen eine entscheidende Rolle bei der Vortreibung der Digitalisierung, und sollen gleichzeitig zur Emissionsreduktion beitragen, um die EU-Ziele für Klimaneutralität zu unterstützen. Trotz ihres großen Energie- und Ressourcenverbrauchs bieten sie Potenzial für Energieeinsparung und Ressourceneffizienz. Die Forschung in diesem Bereich ist notwendig, um gesetzlichen Anforderungen gerecht zu werden, technologische Innovationen zu fördern und wirtschaftliche Vorteile zu erzielen. Das Projekt gliederte sich in sechs Arbeitspakete, um umfassende Erkenntnisse zu gewinnen und einen nachhaltigen Fortschritt zu gewährleisten.

Arbeitspaket 1 analysierte die Auswirkungen von Megatrends der Digitalisierung auf den Energie- und Ressourcenverbrauch. Dabei wurden Trendbereiche wie Homeoffice, die Elektronische Patientenakte und Streaming quantifiziert. Die Rolle von Künstlicher Intelligenz in Verkehr, Smart Home und Landwirtschaft wurde ebenfalls betrachtet. Die Digitalisierung bietet Chancen zur Senkung des Verbrauchs, aber auch potenzielle Rebound-Effekte sollten beachtet werden.

Arbeitspaket 2 beschäftigte sich mit der Herstellung, dem Einkauf und der Entsorgung von IT-Geräten sowie dem Lieferkettenmanagement. Empfehlungen zur nachhaltigen Beschaffung und Entsorgung wurden erarbeitet, um den gesamten Lebenszyklus von Produkten zu berücksichtigen.

Arbeitspaket 3 führte Experimente an einem Supercomputer durch, um den Einfluss von Leistungsbeschränkungen auf die Energieeffizienz zu untersuchen. Effizienzsteigerungen durch Programmierung und Portierung von Algorithmen wurden betrachtet.

Arbeitspaket 4 untersuchte die Anwenderperspektiven, insbesondere im Zusammenhang mit Videostreaming und Homeoffice. Handlungsoptionen zur Förderung nachhaltigen Verhaltens wurden vorgeschlagen.

Arbeitspaket 5 analysierte die digitale Infrastruktur in Baden-Württemberg. Dabei wurden vorhandene Stärken und Herausforderungen wie der flächendeckende Ausbau von 5G und die Datensicherheit identifiziert.

Arbeitspaket 6 entwickelte ein Indikatorenset zur Bewertung von Digitalisierungsmaßnahmen hinsichtlich ihrer ökonomischen, ökologischen und sozialen Auswirkungen.

Wichtige Erkenntnisse aus diesen Untersuchungen sind:

- Die Digitalisierung kann dazu beitragen, den Energie- und Ressourcenverbrauch in verschiedenen Bereichen zu senken, erfordert jedoch auch eine genaue Analyse der spezifischen Auswirkungen.
- Bei Homeoffice und Videostreaming sollten gezielte Maßnahmen ergriffen werden, um energieeffizientes Verhalten der Nutzenden zu fördern und mögliche Rebound-Effekte zu verringern.
- Eine nachhaltige Beschaffung und Entsorgung von IT-Geräten sowie die Berücksichtigung des gesamten Lebenszyklus sind entscheidend, um den Ressourcenverbrauch zu reduzieren.
- Die Entwicklung fortschrittlicher digitaler Maßnahmen erfordert Ressourceninvestitionen, jedoch können Effizienzsteigerungen durch Codeoptimierung und Portierung von Anwendungen erzielt werden.
- Eine flächendeckende digitale Infrastruktur sollte im Einklang mit Ressourceneffizienz- und Energieverbrauchsaspekten ausgebaut werden.

- Die Bewertung von Digitalisierungsmaßnahmen anhand eines Indikatorensets ermöglicht eine umfassende Einschätzung ihrer Auswirkungen.

Das Projekt ENRICH liefert wertvolle Erkenntnisse über den Einfluss der Digitalisierung auf den Energie- und Ressourcenverbrauch. Neben den diskutierten Aspekten wurden auch Vorschläge für einen nachhaltigen Lebenszyklus von IKT-Geräten erarbeitet und die Meinungen und Erfahrungen der Nutzenden wurden einbezogen. Diese Erkenntnisse eröffnen weitere Perspektiven für eine nachhaltigere digitale Transformation. Hier sind einige mögliche Aspekte, die in Zukunft untersucht und berücksichtigt werden könnten:

- Entwicklung von Leitlinien und Standards: Um eine nachhaltige Digitalisierung zu fördern, sollten Leitlinien und Standards entwickelt werden, die Unternehmen, Regierungen und andere Akteure bei der Umsetzung von energieeffizienten und ressourcenschonenden digitalen Lösungen unterstützen. Dies könnte beispielsweise die Festlegung von Nachhaltigkeitskriterien für die Beschaffung von IKT-Produkten, die Förderung von umweltfreundlichen Technologien und die Einführung von Zertifizierungen umfassen.
- Förderung von Bewusstsein und Schulungen: Es ist wichtig, das Bewusstsein für energieeffizientes Verhalten und den nachhaltigen Einsatz von digitalen Technologien zu fördern. Unternehmen sollten gezielte Schulungsmaßnahmen für Mitarbeitende im Homeoffice durchführen, um energieeffizientes Verhalten zu fördern. Auch die Sensibilisierung der Öffentlichkeit für den Zusammenhang zwischen Digitalisierung und Energieverbrauch ist von Bedeutung.
- Zusammenarbeit zwischen verschiedenen Akteur*innen: Um eine nachhaltige digitale Transformation zu erreichen, ist eine Zusammenarbeit zwischen Unternehmen, Regierungen, Forschungseinrichtungen und der Zivilgesellschaft erforderlich. Durch den Austausch von Wissen, Best Practices und Ressourcen können innovative Lösungen entwickelt und implementiert werden.
- Integration von Nachhaltigkeitsaspekten in die digitale Infrastruktur: Bei der Planung und dem Ausbau der digitalen Infrastruktur sollte verstärkt auf Ressourceneffizienz und Energieverbrauch geachtet werden. Die Integration von erneuerbaren Energien, effizienten Datenübertragungstechnologien wie Glasfaser und eine umfassende Lebenszyklusbetrachtung können dazu beitragen, eine nachhaltige digitale Infrastruktur zu schaffen.

Der Ausblick zeigt, dass die digitale Transformation in Bezug auf Energie- und Ressourceneffizienz noch viele Möglichkeiten bietet. Durch weitere Forschung, Zusammenarbeit und gezielte Maßnahmen kann eine nachhaltigere und energieeffizientere Nutzung digitaler Technologien erreicht werden, um positive Auswirkungen auf die Umwelt und die Gesellschaft insgesamt zu erzielen.

9 Literaturverzeichnis

§ 23 Abs. 2 UVgO (2021): Unterschwellenvergabeordnung. Online verfügbar unter <https://www.vergabevorschriften.de/uvgo/23>.

§ 3 Abs. 5 VOL/A, Arten der Vergabe (2009): Allgemeine Bestimmungen für die Vergabe von Leistungen.

A. Lastauskaite; R. Krusinskas (2021): Impact of digitalization factors on EU economic grow. In: 2021 IEEE International Conference on Technology and Entrepreneurship (ICTE). 2021 IEEE International Conference on Technology and Entrepreneurship (ICTE), S. 1–6.

Abby Paterson; D. Bourell (2012): Evaluation of a digitised splinting approach with multi-material functionality using Additive Manufacturing Technologies. In: Twenty-Third Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium: University of Texas at Austin. Online verfügbar unter [https://www.research.manchester.ac.uk/portal/en/publications/evaluation-of-a-digitised-splinting-approach-with-multimaterial-functionality-using-additive-manufacturing-technologies\(1e809641-aff2-4752-83b6-23b014261242\).html](https://www.research.manchester.ac.uk/portal/en/publications/evaluation-of-a-digitised-splinting-approach-with-multimaterial-functionality-using-additive-manufacturing-technologies(1e809641-aff2-4752-83b6-23b014261242).html), zuletzt geprüft am 19.07.2016.

Agentur für Wirtschaft und Entwicklung: CSR-Risiko. Hg. v. Helpdesk Wirtschaft & Menschenrechte. Online verfügbar unter <https://wirtschaft-entwicklung.de/wirtschaft-menschenrechte/csr-risiko-check/>, zuletzt geprüft am 23.01.2023.

AK Rohstoffe (2020): 12 Argumente für eine Rohstoffwende. Online verfügbar unter <https://ak-rohstoffe.de/wp-content/uploads/2020/05/Rohstoffwende.pdf>, zuletzt geprüft am 25.03.2023.

Alsema, E. A. und M. J. Wild-Scholten (31 Mai bis 2006): Environmental Impact of Crystalline Silicon Photovoltaic Module Production. 13th CIRP Intern. Conference on Life Cycle Engineering. Leuven, 31 Mai bis 02.06.2006.

Amatuni, Levon; Ottelin, Juudit; Steubing, Bernhard; Mogollón, José M. (2020): Does car sharing reduce greenhouse gas emissions? Assessing the modal shift and lifetime shift rebound effects from a life cycle perspective. In: *Journal of Cleaner Production* 266, S. 121869. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.121869.

American Chemical Society (2021): Virtual Chemistry and Simulations - American Chemical Society. Online verfügbar unter <https://www.acs.org/content/acs/en/education/students/highschool/chemistryclubs/activities/simulations.html>, zuletzt aktualisiert am 21.01.2022.000Z, zuletzt geprüft am 24.01.2022.278Z.

Anders S G Andrae (2020): New perspectives on internet electricity use in 2030. In: *Engineering and Applied Science Letters* 3 (2), S. 19–31. DOI: 10.30538/psrp-easl2020.0038.

Appleton, E. Ladikas, K. Richter, M. (2022): 100 Prozent Digitale Quali-Forschung: Was hat sich verändert und wohin geht die Reise? Hg. v. München: Happy Thinking People GmbH. Online verfügbar unter <https://www.marktforschung.de/dossiers/themendossiers/die-zukunft-qualitativer-marktforschung/einzelansicht/100-digitale-quali-forschung-was-hat-sich-veraendert-und-wohin-geht-die-reise/>, zuletzt aktualisiert am 17.03.2022.

Auswärtiges Amt im Namen des Interministeriellen Ausschusses Wirtschaft und Menschenrechte (Hg.) (2017): Nationaler Aktionsplan. Umsetzung der VN-Leitprinzipien für Wirtschaft und Menschenrechte 2016-2020. Bundesregierung.

Bär, Christian; Fischer, Andreas T.; Gulden, Henning (2016): Informationstechnologien als Wegbereiter für den steuerberatenden Berufsstand. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Bertelsmann (2021): Elektronische Patientenakten. Online verfügbar unter <https://www.bertelsmann-stiftung.de/de/publikationen/publikation/did/elektronische-patientenakten>, zuletzt aktualisiert am 24.01.2022, zuletzt geprüft am 24.01.2022.

Bestsennyy, Oleg; Gilbert, Greg; Harris, Alex; Rost, Jennifer (2021): Telehealth: A quarter-trillion-dollar post-COVID-19 reality? In: *McKinsey & Company*, 09.07.2021. Online verfügbar unter <https://www.mckinsey.de/~ /media/mckinsey/locations/europe%20and%20middle%20east/deutschland/news/presse/2020/2020-11-12%20ehealth%20monitor/ehealth%20monitor%202020.pdf>, zuletzt geprüft am 20.01.2022.242Z.

Bhargava Srinivasulu, Louis Merlin (2020): The Effect of Autonomous Vehicles on Traffic and the Environment. In: *International Journal of Transportation Science and Technology*.

Blazejczak, Jürgen; Edler, Dietmar (2004): Nachhaltigkeitskriterien aus ökologischer, ökonomischer und sozialer Perspektive: ein interdisziplinärer Ansatz.

Bloor, Michael; Frankland, Jane; Thomas, Michelle; Robson, Kate (2001): Focus Groups in Social Research. 1 Oliver's Yard, 55 City Road, London England EC1Y 1SP United Kingdom: SAGE Publications Ltd.

Borchard, Rebecca; Zeiss, Roman; Recker, Jan (2021): Digitalization of waste management: Insights from German private and public waste management firms. In: *Waste management & research : the journal of the International Solid Wastes and Public Cleansing Association, ISWA*, 734242X211029173. DOI: 10.1177/0734242X211029173.

Brandl, Barbara; Hornuf, Lars (2020): Where Did FinTechs Come From, and Where Do They Go? The Transformation of the Financial Industry in Germany After Digitalization. In: *Front. Artif. Intell.* 3, S. 8. DOI: 10.3389/frai.2020.00008.

Brynjolfsson, E.; McAfee, A. (2014): The second machine age: Work, progress, and prosperity in a time of brilliant technologies. Hg. v. W W Norton & Co. Online verfügbar unter <https://psycnet.apa.org/record/2014-07087-000>, zuletzt aktualisiert am 26.01.2022, zuletzt geprüft am 04.02.2022.

Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle: Lieferketten. Online verfügbar unter https://www.bafa.de/DE/Lieferketten/Ueberblick/ueberblick_node.html;jsessionid=0463C7B2C1E06236F633141E9019F4E7.intranet661#doc1469782bodyText2, zuletzt geprüft am 17.03.2023.

Bundesgesetzblatt (Hg.) (2021): Lieferkettengesetz. Gesetz über die unternehmerischen Sorgfaltspflichten in Lieferketten. Teil I Nr. 46. ausgegeben zu Bonn am 22.Juli 2021. Online verfügbar unter https://www.bgbl.de/xaver/bgbl/start.xav?startbk=Bundesanzeiger_BGBl&jumpTo=bgbl121s2959.pdf#__bgbl__%2F%2F*%5B%40attr_id%3D%27bgbl121s2959.pdf%27%5D__1679085837582, zuletzt geprüft am 17.03.2023.

Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (2022): Glossar zur Erklärung wesentlicher Begriffe der Digitalisierung.

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2020): Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2020). Übersicht und Rechtsgrundlagen auf Bundesebene. Online verfügbar unter <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Artikel/Wirtschaft/vergabe-uebersicht-und-rechtsgrundlagen.html>, zuletzt aktualisiert am 01.02.2023.

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz: Besondere Ausgleichsregelung und Eigenversorgung. Online verfügbar unter <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Artikel/Energie/besondere-ausgleichsregelung.html>, zuletzt geprüft am 15.01.2023.

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (2023a): Entwurf eines Gesetzes zur Steigerung der Energieeffizienz und zur Änderung des Energiedienstleistungsgesetzes. Referentenentwurf der Bundesregierung. Online verfügbar unter <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/E/entwurf-eines-gesetzes-zur-steigerung-der-energieeffizienz-u-aenderung-des-energiedienstleistungsgesetzes.html>, zuletzt geprüft am 10.05.2023.

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (2023b): Entwurf eines Gesetzes zur Steigerung der Energieeffizienz und zur Änderung des Energiedienstleistungsgesetzes. Referentenentwurf der Bundesregierung. Online verfügbar unter <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/E/entwurf-eines-gesetzes-zur-steigerung-der-energieeffizienz-u-aenderung-des-energiedienstleistungs-gesetzes.html>, zuletzt aktualisiert am 03.04.2023, zuletzt geprüft am 15.05.2023.

Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (2017): Wirtschaft und Menschenrechte. Bundesminister Heil und Müller: "Jetzt greift der Koalitionsvertrag für ein Lieferketten-Gesetz.

Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (2020): Lieferkette und Lieferkettengesetz.

Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahn (2022): Pressestelle.

Bundesregierung (2018): Lieferketten-Gesetz.

Bundesverband Car Sharing (2007): Definition CarSharing. verabschiedet von den bcs-Mitgliedern am 28.03.2007 im Umlaufverfahren.

Chasin, Friedrich; Hoffen, Moritz; Hoffmeister, Benedikt; Becker, Jorg (2018): Reasons for Failures of Sharing Economy Businesses. In: *MIS Quarterly Executive* 17 (3). Online verfügbar unter <https://aisel.aisnet.org/misqe/vol17/iss3/4>.

Chirine Etezadzadeh (Hg.) (2020): Smart City – Made in Germany. Die Smart-City-Bewegung als Treiber einer gesellschaftlichen Transformation. 1. Aufl.: Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH.

Clemm, Christian und Lang, Klaus-Dieter (2018): Stärkere Verankerung der Ressourceneffizienz und Abfallvermeidung in produktpolitischen Instrumenten. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/staerkere-verankerung-der-ressourceneffizienz>, zuletzt geprüft am 29.03.2023.

CoinMarketCap (2022): All Cryptocurrencies | CoinMarketCap. Online verfügbar unter <https://coinmarketcap.com/all/views/all/>, zuletzt aktualisiert am 25.01.2022, zuletzt geprüft am 25.01.2022.

Computer Base (2022): Storage. Micron B58R mit 232 Layern: Der fortschrittlichste 3D-NAND geht in Serie und beeindruckt. Online verfügbar unter <https://www.computerbase.de/2022-07/micron-b58r-mit-232-layern-der-fortschrittlichste-3d-nand-geht-in-serie-und-beeindruckt/>, zuletzt geprüft am 22.03.2023.

Computer Base (2023): SSD.

ComputerWeekly.de (2023): Solid State Drive (SSD). Online verfügbar unter <https://www.computer-weekly.com/de/definition/Solid-State-Drive-SSD>, zuletzt geprüft am 19.03.2023.

CSR Wirtschaft und Menschenrechte (2023a): Lieferkettengesetz. Gesetz über die unternehmerischen Sorgfaltspflichten in Lieferketten. Online verfügbar unter <https://www.csr-in-deutschland.de/DE/Wirtschaft-Menschenrechte/Gesetz-ueber-die-unternehmerischen-Sorgfaltspflichten-in-Lieferketten/gesetz-ueber-die-unternehmerischen-sorgfaltspflichten-in-lieferketten.html>, zuletzt geprüft am 17.03.2023.

CSR Wirtschaft und Menschenrechte (2023b): Lieferkettengesetz. Umsetzung durch Unternehmen. Online verfügbar unter <https://www.csr-in-deutschland.de/DE/Wirtschaft-Menschenrechte/Gesetz-ueber-die-unternehmerischen-Sorgfaltspflichten-in-Lieferketten/Umsetzung-durch-Unternehmen/umsetzung-durch-unternehmen.html>, zuletzt geprüft am 17.03.2023.

CSR-Politik (2023): Aktivitäten der Bundesregierung.

Curcial by Micron (2019): Wie werden SSDs hergestellt? Online verfügbar unter <https://www.curcial.de/articles/about-ssd/how-are-ssds-made>, zuletzt geprüft am 27.03.2023.

Dachverband Entwicklungspolitik Baden-Württemberg und Werkstatt Ökonomie (Hrsg.) (2013): Nachhaltige IT-Beschaffung: für Umweltschutz & Menschenrechte!

Daniel Zhang, Nestor Maslej, Erik Brynjolfsson, John Etchemendy, Terah Lyons, James Manyika, Helen Ngo, Juan Carlos Niebles, Michael Sellitto, Ellie Sakhaee, Yoav Shoham, Jack Clark und Raymond Per-rault (2022): The AI Index 2022 Annual Report. Hg. v. Stanford Institute for Human-Centered AI. Stan-ford University.

DEAB & Werkstatt Ökonomie (2013): Nachhaltige IT-Beschaffung: für Umweltschutz & Menschen-rechte! Online verfügbar unter <https://www.woek.de/themen-projekte/nachhaltige-beschaf-fung/publikationen/detail/nachhaltige-it-beschaffung-fuer-umweltschutz-menschenrechte/>, zuletzt aktualisiert am 18.01.2023.

Deloitte (2020): Digital Twins | IoT noch smarter | Studie | Deloitte Deutschland. Online verfügbar unter <https://www2.deloitte.com/de/de/pages/technology-media-and-telecommunications/artic-les/digital-twins.html>, zuletzt aktualisiert am 24.01.2022, zuletzt geprüft am 24.01.2022.

Deloitte (2021): Urban Future with a Purpose. Online verfügbar unter <https://www2.deloi-tte.com/content/dam/Deloitte/global/Documents/Public-Sector/deloitte-urban-future-with-a-pur-pose-study-set2021.pdf>, zuletzt geprüft am 24.01.2022.

Deutsche Rohstoffagentur (DERA) (2019): DERA-Rohstoffliste 2019. Angebotskonzentration bei mine-ralischen Rohstoffen und Zwischenprodukten – potenzielle Pries- und Lieferrisiken. Hg. v. Bundesan-stalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR). Online verfügbar unter https://www.deutscheroh-stoffagentur.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/DERA_Rohstoffinformationen/rohstoffin-formationen-40.pdf?__blob=publicationFile, zuletzt geprüft am 29.03.2023.

Deutsches Ausschreibungsblatt GmbH (2019).

Die ILO in Deutschland (2021 a): ILO. Online verfügbar unter <https://www.ilo.org/berlin/wir-uber-uns/lang--de/index.htm>, zuletzt geprüft am 06.02.2023.

Doerr, Allison (2017): Protein folding studies go global. In: *Nat Methods* 14 (9), S. 834. DOI: 10.1038/nmeth.4418.

Dr. Brigitte-Maria Lorenz, Tamara Fischer, Inna Wöckener & HLRS Nachhaltigkeitsteam (2021): Kom- pass Lieferkettenmanagement Teil 1. Nachhaltige Beschaffung.

Dratsdrummer, F., Konrad, W., & Scheer, D.: Massenphänomen Videostreaming. Implikationen für Nutzer:innen, Infrastruktur und Klima. Arbeitsbericht des Projektes ENRICH. Stuttgart: Dialogik 2022.

Dubey, S., N. Y. Jadhav und B. Zakirova: Socio-Economic and Environmental Impacts of Silicon based photovoltaic (PV) Technologies. *Energy Procedia* 33, S. 322–334. Online verfügbar unter 2019.

Dubey, S., N. Y. Jadhav und B. Zakirova (2013): Socio-Economic and Environmental Impacts of Silicon based photovoltaic (PV) Technologies. In: *Energy Procedia* 33.

Eckelman, Matthew J.; Huang, Kaixin; Lagasse, Robert; Senay, Emily; Dubrow, Robert; Sherman, Jodi D. (2020): Health Care Pollution And Public Health Damage In The United States: An Update. In: *Health affairs (Project Hope)* 39 (12), S. 2071–2079. DOI: 10.1377/hlthaff.2020.01247.

Electronicswatch (2014): Winds of Change. Das Potenzial der öffentlichen Beschaffung, die Arbeitsbe-dingungen in der IKT-Industrie zu verbessern. Online verfügbar unter https://www.sued-wind.at/fileadmin/user_upload/suedwind/X_Downloadliste/Winds_of_Change.pdf.

Electronicswatch (2023): Verantwortungsvolle öffentliche Beschaffung. Arbeitsrechte in der Elektro-industrie.

Elena Stremousova, Olga N. Buchinskaia (2019): SOME APPROACHES TO EVALUATION MACROECONOMIC EFFICIENCY OF DIGITIZATION. In: *Business, Management and Education* 17 (2), S. 232–247. Online verfügbar unter <https://www.ceeol.com/search/article-detail?id=857714>.

EMAS: Eco Management and Audit Scheme.

Europäische Kommission, EMAS (2017): VERORDNUNG (EU) 2017/1505 DER KOMMISSION vom 28. August 2017 zur Änderung der Anhänge I, II und III der Verordnung (EG) Nr. 1221/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates über die freiwillige Teilnahme von Organisationen an einem Gemeinschaftssystem für Umweltmanagement und Umweltbetriebsprüfung.

Europäische Kommission, EMAS, Verordnung (EG) Nr.1221/2009: Verordnung des europäischen Parlaments und des Rates vom 25. Nov. 2009 über die freiwillige Teilnahme von Organisationen an einem Gemeinschaftssystem für Umweltmanagement und Umweltbetriebsprüfung und zur Aufhebung der Verordnung, Amtsblatt der Europäischen Union 2009.

European Commission (2022a): DESI. Online verfügbar unter <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/desi>, zuletzt aktualisiert am 27.01.2022, zuletzt geprüft am 27.01.2022.

European Commission (2022b): Digitisation of Agriculture. Online verfügbar unter <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/digitisation-agriculture>, zuletzt aktualisiert am 25.01.2022, zuletzt geprüft am 25.01.2022.

European Commission, Brüssel (2021): REGULATION OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL LAYING DOWN HARMONISED RULES ON ARTIFICIAL INTELLIGENCE (ARTIFICIAL INTELLIGENCE ACT) AND AMENDING CERTAIN UNION LEGISLATIVE ACTS 2021.

Gallersdörfer, Ulrich; Klaaßen, Lena; Stoll, Christian (2020): Energy Consumption of Cryptocurrencies Beyond Bitcoin. In: *Joule* 4 (9), S. 1843–1846. DOI: 10.1016/j.joule.2020.07.013.

German Water Partnership (2019): Water 4.0. Online verfügbar unter https://germanwaterpartnership.de/wp-content/uploads/2019/05/GWP_Brochure_Water_4.0.pdf, zuletzt geprüft am 25.01.2022.

Gesetz gegen Wettbewerbsbeschränkungen (2016): § 122 GWB, vom Eignung. Online verfügbar unter https://www.gesetze-im-internet.de/gwb/___122.html, zuletzt geprüft am 25.01.2023.

Gesetz gegen Wettbewerbsbeschränkungen; vgl. § 97 Abs. 3 GWB und § 2 Abs. 3 UVgO.

Gesetz gegen Wettbewerbsbeschränkungen, § 127 GWB (2016): Zuschlag. Online verfügbar unter https://www.gesetze-im-internet.de/gwb/___127.html, zuletzt geprüft am 26.01.2023.

Gröger, Jens; Liu, Ran; Stobbe, Lutz; Druschke, Jan; Richter, Nikolai (2021): Green Cloud Computing. Lebenszyklusbasierte Datenerhebung zu Umweltwirkungen des Cloud Computing. Hg. v. Umweltbundesamt. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/5750/publikationen/2021-06-17_texte_94-2021_green-cloud-computing.pdf, zuletzt geprüft am 01.07.2021.

HLSRS (2021): Code of Conduct für Lieferanten.

Höchstleistungsrechenzentrum Stuttgart: HPE Apollo (Hawk). Online verfügbar unter <https://www.hlrs.de/de/loesungen/systeme/hpe-apollo-hawk>.

ICLEI Europe (2020): How to procure fair ICT hardware - Criteria set for socially responsible public procurement. Online verfügbar unter <https://sustainable-procurement.org/resource-centre?c=search&uid=85795a98>, zuletzt geprüft am 18.01.2023.

ILO (2021c): Arbeitsnormen und Beschwerdeverfahren. Online verfügbar unter <https://www.ilo.org/berlin/sozialpartner/arbeitsnormen/lang--de/index.htm>, zuletzt geprüft am 06.02.2023.

ILO (2021d): ILO-Übereinkommen. Online verfügbar unter <https://ilo.org/berlin/arbeits-und-standards/ratifikationen-in-deutschland/lang--de/index.htm>, zuletzt geprüft am 06.02.2023.

ILO (2021f): Ratifications of fundamental instruments by region. Online verfügbar unter https://www.ilo.org/dyn/normlex/en/f?p=1000:10011:538757393956:::P10011_DISPLAY_BY:3, zuletzt geprüft am 06.02.2023.

ILO Kernarbeitsnormen (2021b): ILO. Online verfügbar unter <https://www.ilo.org/berlin/arbeits-und-standards/kernarbeitsnormen/lang--de/index.htm>, zuletzt geprüft am 06.02.2023.

Ingram, Julie; Maye, Damian (2020): What Are the Implications of Digitalisation for Agricultural Knowledge? In: *Front. Sustain. Food Syst.* 4, Artikel 66, S. 66. DOI: 10.3389/fsufs.2020.00066.

International Energy Agency; World Bank; International Renewable Energy Agency; United Nations Statistics Division; World Health Organization (2020): Tracking SDG7 - The Energy Progress Report 2020. Online verfügbar unter https://iea.blob.core.windows.net/assets/9807257f-ff94-48dc-9318-0168ebfef283/Tracking_SDG7_The_Energy_Progress_Report_2020.pdf.

iStock (2021): Alex LMX.

Jana Lippelt, Jennifer Steigmeier, Anita Wölf (2021): Kurz zum Klima: Silizium - ein Rohstoff, der es in sich hat. Online verfügbar unter <sd-2021-09-lippelt-woelfl-silizium.pdf>, zuletzt geprüft am 27.03.2023.

Jenny Kitzinger (1994): The methodology of Focus Groups: the importance of interaction between research participants. In: *Sociology of Health & Illness* 16, S. 103–121.

Jentsch, Marc; Prause, Christian R.; Pramudianto, Ferry; Al-Akkad, Amro; Reiners, Rene (2010): The Energy Aware Smart Home. In: Fraunhofer Institute for Applied Information Technology FIT (Hg.): The Energy Aware Smart Home. Unter Mitarbeit von Marco Jahn, Marc Jentsch, Christian R. Prause, Ferry Pramudianto, Amro Al-Akkad, René Reiners. 2010 5th International Conference on Future Information Technology (FutureTech). Busan, Korea (South), 21.05.2010 - 23.05.2010: IEEE, S. 1–8.

Katz, Raul; Callorda (2017): Estimación del impacto socioeconómico del crecimiento del ecosistema digital en América Latina. In: *Tenth CPR Latam*. Online verfügbar unter http://www.teleadvs.com/wp-content/uploads/Katz_Callorda_Estimacion_del_impacto_socioeconomico_del_crecimiento_del_ecosistema_digital_en_America_Latina_v2.pdf, zuletzt geprüft am 04.02.2022.

Katz, Raul; Koutroumpis, Pantelis; Martin Callorda, Fernando (2014): Using a digitization index to measure the economic and social impact of digital agendas. In: *Info* 16 (1), S. 32–44. DOI: 10.1108/info-10-2013-0051.

Knaus, Anja; Renn, Ortwin (1998): Den Gipfel vor Augen. Unterwegs in eine nachhaltige Zukunft.

Köhn, M., Gröger, J., Stobbe, L. (2020): Energie- und Ressourceneffizienz digitaler Infrastrukturen – Ergebnisse des Forschungsprojektes „Green Cloud-Computing“. Dessau-Roßlau. In: *Umweltbundesamt*.

Kompass Nachhaltigkeit: Supercomputer. Online verfügbar unter <https://www.kompass-nachhaltigkeit.de/produktsuche/computer/supercomputer>, zuletzt geprüft am 12.02.2023.

Kompass Nachhaltigkeit (2023a): Gütezeichen-Finder.

Kompass Nachhaltigkeit (2023b): Lieferkette im Detail.

Kompass Nachhaltigkeit (2023c): Nachhaltigkeit im Beschaffungsprozess. Nationaler Rahmen: Im Unterschwellenbereich relevante Gesetze.

Kompass Nachhaltigkeit Öffentliche Beschaffung (2023): Rechtliche Grundlagen. Online verfügbar unter <https://kompass-nachhaltigkeit.de/grundlagenwissen/rechtliche-grundlagen/>, zuletzt geprüft am 18.01.2023.

Konrad, W., Dratsdrummer, F., Scheer, D. (2022b): Einstellungen von Beschäftigten zur energie- und ressourcensparenden IT-Nutzung im Homeoffice. Ergebnisse einer Fokusgruppen-Studie. Arbeitsbericht des Projektes ENRICH, Stuttgart: Dialogik 2022b.

Konrad, W., Dratsdrummer, F., Scheer, D. (2022a): Homeoffice für Klimaschutz? Potenziale und Grenzen der Telearbeit für Energie- und Ressourceneffizienz. Arbeitsbericht des Projektes ENRICH. Stuttgart: Dialogik. DOI: 10.13140/RG.2.2.27768.52487.

KPMG (2021): KPMG DACH Online-Shopping Studie, zuletzt geprüft am 24.01.2022.

LACIE (2023): Identifizieren der verschiedenen PCI-Steckplätze. Online verfügbar unter <https://www.lacie.com/de/de/support/kb/identify-a-variety-of-pci-slots-006353en/#:~:text=Peripheral%20Component%20Interconnect%20oder%20PCI,und%20wird%20heute%20noch%20verwendet>, zuletzt geprüft am 19.03.2023.

Lenzen, Manfred; Malik, Arunima; Li, Mengyu; Fry, Jacob; Weisz, Helga; Pichler, Peter-Paul et al. (2020): The environmental footprint of health care: a global assessment. In: *The Lancet Planetary Health* 4 (7), e271-e279. DOI: 10.1016/S2542-5196(20)30121-2.

Lübberstedt, Nele (2015): Nachhaltige IT-Infrastruktur. Leitfaden zur Umsetzung in KMU.

Lucon O., D. Ürge-Vorsatz, A. Zain Ahmed, H. Akbari, P. Bertoldi, L.F. Cabeza, N. Eyre, A. Gadgil, L.D.D. Harvey, Y. Jiang, E. (2014): Buildings. In: *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel*. Online verfügbar unter https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ipcc_wg3_ar5_chapter9.pdf, zuletzt geprüft am 24.01.2022.

Ludin, Daniela und Wellbrock. Wanja (2019): Betriebswirtschaftliche Implikationen eines nachhaltigen Beschaffungsmanagements. Nachhaltiges Beschaffungsmanagement. Strategien – Praxisbeispiele – Digitalisierung.: Wellbrock und Ludin.

Lv, Zhihan; Shang, Wenlong (2023): Impacts of intelligent transportation systems on energy conservation and emission reduction of transport systems: A comprehensive review. In: *Green Technologies and Sustainability* 1 (1), S. 100002. DOI: 10.1016/j.grets.2022.100002.

Lynn, Theo; Rosati, Pierangelo; Conway, Edel; Curran, Declan; Fox, Grace; O'Gorman, Colm (2022): Digital Towns. Cham: Springer International Publishing.

Manuel Wiedmann, Dr. Brigitte-Maria Lorenz, Tamara Fischer & HLRS Nachhaltigkeitsteam (2021): Kompass Lieferkettenmanagement Teil 2. End-of-Life-Management.

McKinsey & Company (2018): Notes from the AI frontier Modeling the impact of AI on the world economy. Discussion Paper.

McKinsey & Company (2020): ehealth monitor 2020, zuletzt geprüft am 20.01.2022.

Micron (2022): Micron Ships World's first 232-Layer NAND. Extends Technology Leadership. Online verfügbar unter <https://investors.micron.com/news-releases/news-release-details/micron-ships-worlds-first-232-layer-nand-extends-technology>, zuletzt geprüft am 22.03.2023.

Miller, G., & Gatersleben, B. (2011): The impact of eco-feedback interventions on commuters' transportation modes and emissions. In: *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 16 (7), S. 123–131. DOI: 10.1016/j.trd.2011.05.005.

Ministerium des Inneren, für Digitalisierung und Kommunen Baden-Württemberg (2023): Weitere 30,3 Millionen Euro für Breitbandausbau.

Ministerium des Inneren, für Digitalisierung und Kommunen in Baden-Württemberg: Breitbandausbau. Hg. v. Ministerium des Inneren, für Digitalisierung und Kommunen Baden-Württemberg. Online

verfügbar unter <https://im.baden-wuerttemberg.de/de/digitalisierung/breitband>, zuletzt geprüft am 20.03.2023.

Ministerium für Inneres, Digitalisierung und Migration Baden-Württemberg (2020): Breitbandbericht Baden-Württemberg. Stadt. Land. Flüssig Streamen.

Ministerium für Umwelt (2017): Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg.

Moberg, Åsa; Johansson, Martin; Finnveden, Göran; Jonsson, Alex (2010): Printed and tablet e-paper newspaper from an environmental perspective — A screening life cycle assessment. In: *Environmental Impact Assessment Review* 30 (3), S. 177–191. DOI: 10.1016/j.eiar.2009.07.001.

MoreThanNow (o.J.): The Sustainability Question. Designing the Future of Work with Applied Behavioural Science. London, 16,17.

Naisbitt, John (1986): Megatrends. 10 Perspektiven, die unser Leben verändern werden. 6. Aufl. Hestia: Bayreuth.

Normenkontrolle 2021 e.

NVIDIA Corporation & affiliates (2021): HCOLL. Overview. Online verfügbar unter <https://docs.nvidia.com/networking/m/view-rendered-page.action?abstractPageId=32413526>.

Öko-Institut e.V. (2016): Resource Efficiency in the ICT Sector. Final Report. Online verfügbar unter https://www.greenpeace.de/sites/default/files/publications/20161109_oeko_resource_efficiency_final_full-report.pdf, zuletzt geprüft am 29.03.2023.

Öko-Institut e.V.; Hochschule Trier und Universität Zürich (2017): Kriterienkatalog für nachhaltige Software. Online verfügbar unter https://www.umwelt-campus.de/fileadmin/Umwelt-Campus/Greensoft/Kriterienkatalog_nachhaltige_Software_v01_2017-05-31.pdf, zuletzt geprüft am 29.03.2023.

Öko-Institut e.V. Freiburg (2018): Autonomes Fahren und Strombedarf.

Okorie, Okechukwu; Salonitis, Konstantinos; Charnley, Fiona; Moreno, Mariale; Turner, Christopher; Tiwari, Ashutosh (2018): Digitisation and the Circular Economy: A Review of Current Research and Future Trends. In: *Energies* 11 (11), S. 3009. DOI: 10.3390/en11113009.

Peng Chen, Songhua Hu et al.: Promoting carsharing attractiveness and efficiency: An exploratory analysis. In: *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 2018.

Performance Optimisation and Productivity A Centre of Excellence in HPC: About POP. Online verfügbar unter <https://pop-coe.eu/>.

PI-DSMC: Introduction. Online verfügbar unter <https://www.pi-dsmc.com/index.html>.

PowerShift (2017): Ressourcenfluch 4.0: Die sozialen und ökologischen Auswirkungen von Industrie 4.0 auf den Rohstoffsektor. Online verfügbar unter <https://power-shift.de/wp-content/uploads/2017/02/Ressourcenfluch-40-rohstoffe-menschenrechte-und-industrie-40.pdf>, zuletzt geprüft am 25.03.2023.

Prakash, Channa S.; Fiaz, Sajid; Nadeem, Muhammad Azhar; Baloch, Faheem Shehzad; Qayyum, Abdul (2023): Sustainable Agriculture in the Era of the OMICs Revolution. Cham: Springer International Publishing.

PWC (2019): PwC Study "The road to circularity - Why a circular economy is becoming the new normal". Online verfügbar unter <https://www.pwc.de/de/nachhaltigkeit/pwc-circular-economy-study-2019.pdf>, zuletzt geprüft am 24.01.2022.

PWC (Hg.) (2021): Die Verwaltung im Homeoffice. Erfahrungen, Grenzen und Chancen für die Zukunft der Verwaltung. Online verfügbar unter <https://www.pwc.de/de/branchen-und-markte/oeffentlicher-sektor/pwc-die-verwaltung-im-homeoffice.pdf>, zuletzt geprüft am 01.07.2021.

Rat für Nachhaltige Entwicklung (2019).

Rat für Nachhaltige Entwicklung (2023): Über den Rat. Online verfügbar unter <https://www.nachhaltigkeitsrat.de/ueber-den-rat/?cn-reloaded=1>, zuletzt aktualisiert am 18.03.2023.

Robert Crandall; William Lehr; Robert Litan (2007): The Effects of Broadband Deployment on Output and Employment: A Cross-sectional Analysis of U.S. Data (6). Online verfügbar unter https://www.researchgate.net/publication/237644428_The_Effects_of_Broadband_Deployment_on_Output_and_Employment_A_Cross-sectional_Analysis_of_US_Data.

Robert D. Atkinson, Daniel Castro, Stephen Ezell (2009): The Digital Road to Recovery: A Stimulus Plan to Create Jobs, Boost Productivity and Revitalize America. In: *Information Technology and Innovation Foundation*. Online verfügbar unter <https://itif.org/publications/2009/01/07/digital-road-recovery-stimulus-plan-create-jobs-boost-productivity-and>.

Sachs, Jeffrey D.; Kotlikoff, Laurence (2012): Smart Machines and Long-Term Misery. National Bureau of Economic Research, Inc (National Bureau of Economic Research, Inc, 18629). Online verfügbar unter <https://econpapers.repec.org/paper/nbrnberwo/18629.htm>.

Shaikh, Faisal Karim; Memon, Mohsin Ali; Mahoto, Naeem Ahmed; Zeadally, Sherali; Nebhen, Jamel (2022): Artificial Intelligence Best Practices in Smart Agriculture. In: *IEEE Micro* 42 (1), S. 17–24. DOI: 10.1109/MM.2021.3121279.

Siemens Digital Industries Software (2021): Simulation & Test for Process Industry Applications | Siemens Software. Online verfügbar unter <https://www.plm.automation.siemens.com/global/de/industries/energy-utilities/energy-equipment-manufacturing/simulation-test-process-industry-applications.html>, zuletzt aktualisiert am 23.04.2020.000Z, zuletzt geprüft am 24.01.2022.588Z.

SSD-info.NET (2013): Solid State Drives für mehr Geschwindigkeit.

stanmoore1 (2022): Public development project of the SPARTA DSMC software package. sparta. Online verfügbar unter <http://sparta.sandia.gov>.

Statista (2022): ePapers - Worldwide | Statista Market Forecast. 2021. Online verfügbar unter <https://www.statista.com/outlook/dmo/digital-media/epublishing/epapers/worldwide#revenue>, zuletzt aktualisiert am 24.01.2022, zuletzt geprüft am 24.01.2022.

Statistica. Statistica GmbH: Prognose zum Umsatz mit Unternehmensanwendungen im Bereich künstliche Intelligenz weltweit von 2016 bis 2025 (in Millionen US-Dollar) 2022.

Statistica. Statistica GmbH (2022): Statistiken zu Smart Grids. Energie. Online verfügbar unter <https://de.statista.com/themen/1964/smart-grid/#topicOverview>, zuletzt geprüft am 16.01.2023.

Strubell, Emma; Ganesh, Ananya; McCallum, Andrew (2019): Energy and Policy Considerations for Deep Learning in NLP. Online verfügbar unter <https://arxiv.org/pdf/1906.02243>.

TA-Swiss (2021): Quantified Self – Schnittstelle zwischen Lifestyle und Medizin-eBook. Online verfügbar unter <https://vdf.ch/quantified-self-schnittstelle-zwischen-lifestyle-und-medizin-e-book.html>, zuletzt aktualisiert am 21.01.2022.000Z, zuletzt geprüft am 21.01.2022.212Z.

Tausch, Anja P.; Menold, Natalja (2015): Methodische Aspekte der Durchführung von Fokusgruppen in der Gesundheitsforschung: welche Anforderungen ergeben sich aufgrund der besonderen Zielgruppen und Fragestellungen? Unter Mitarbeit von GESIS - Leibniz-Institut für Sozialwissenschaften.

TCO Certified (2022): Kreislaufwirtschaft in der Praxis: Wie man verantwortungsvoll mit Notebooks umgeht. Online verfügbar unter <https://tcocertified.com/de/news/circularity-in-practice-how-to-manage-notebook-computers-responsibly/>, zuletzt geprüft am 14.06.2022.

Till Zimmermann, Robin Memelink, Lisa Rödig, Alexander Reitz, Nane Pelke, Rene John, Ulrike Eberle (2020): Die Ökologisierung des Onlinehandels: Neue Herausforderungen für die umweltpolitische Förderung eines nachhaltigen Konsums. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/5750/publikationen/2020_12_03_texte_227-2020_online-handel.pdf, zuletzt geprüft am 24.01.2022.

Umweltbundesamt (2012): Zeitlich optimierter Einsatz eines Notebooks unter ökologischen Gesichtspunkten. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/zeitlich-optimierter-ersatz-eines-notebooks-unter>, zuletzt geprüft am 29.03.2023.

Umweltbundesamt (2017a): Rechtliche Grundlagen der nachhaltigen Beschaffung. Vortrag an der Hochschule Zittau/Görlitz. Unter Mitarbeit von Körber-Ziegengeist. Online verfügbar unter <https://www.hochsn.uni-hamburg.de/-downloads/handlungsfelder/betrieb/2017-05-17-rechtl-grundlagen-nachh-beschaffung-uba.pdf>, zuletzt geprüft am 23.01.2023.

Umweltbundesamt (2017b): Strategien gegen Obsoleszenz. Sicherung einer Produktmindestlebensdauer sowie Verbesserungen der Produkt-nutzungsdauer und der Verbraucherinformation.

Umweltbundesamt (2018): Entwicklung und Anwendung von Bewertungsgrundlagen für ressourceneffiziente Software unter Berücksichtigung bestehender Methodik. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/entwicklung-anwendung-von-bewertungsgrundlagen-fuer>, zuletzt geprüft am 29.03.2023.

Umweltbundesamt (2019): Leitfaden zur umweltfreundlichen öffentlichen Beschaffung von Software.

Umweltbundesamt (2021a): Schwere Nutzfahrzeuge. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/themen/verkehr-laerm/emissionsstandards/schwere-nutzfahrzeuge>, zuletzt geprüft am 26.03.2023.

Umweltbundesamt (2021b): IKT-Geräte: Nachhaltige Beschaffung und Nutzungsdauerverlängerung, 16.02.2021.

Umweltbundesamt (2022): Elektrogeräte. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/themen/abfall-ressourcen/produktverantwortung-in-der-abfallwirtschaft/elektroaltgeraete#elektronikaltgeraete-in-deutschland>, zuletzt geprüft am 26.03.2023.

Umweltbundesamt (2023): Lebenszykluskosten. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/themen/wirtschaft-konsum/umweltfreundliche-beschaffung/lebenszykluskosten>, zuletzt geprüft am 23.01.2023.

Unterschwelvenvergabeordnung, § 23 UVgO (September 2021): Auswahl geeigneter Unternehmen; Ausschluss von Bewerbern und Bieter. Online verfügbar unter <https://www.vergabevorschriften.de/uvgo/31>, zuletzt geprüft am 25.01.2023.

Unterschwelvenvergabeordnung, § 43 UVgO (2021): Zuschlag und Zuschlagskriterien. Online verfügbar unter <https://www.vergabevorschriften.de/uvgo/43>, zuletzt geprüft am 26.01.2023.

Unterschwelvenvergabeordnung, § 44 UVgO (2021): Ungewöhnlich niedrige Angebote. Online verfügbar unter <https://www.vergabevorschriften.de/uvgo/44>, zuletzt geprüft am 26.01.2023.

Vera Demary; Jürgen Matthes; Axel Plünnecke; Thilo Schaefer (Hg.) (2021): Gleichzeitig: Wie vier Disruptionen die deutsche Wirtschaft verändern. IW-Studien. Schriften zur Wirtschaftspolitik aus dem Institut der deutschen Wirtschaft. Institut der deutschen Wirtschaft Köln Medien GmbH.

Vergabeverordnung § 31 VgV, Leistungsbeschreibung 2016. Online verfügbar unter https://www.gesetze-im-internet.de/vgv_2016/_31.html, zuletzt geprüft am 23.01.2023.

Vergabeverordnung § 44-46 VgV (2016): Befähigung und Erlaubnis zur Berufsausübung, Wirtschaftliche und finanzielle Leistungsfähigkeit, Technische und berufliche Leistungsfähigkeit. Online verfügbar unter https://www.gesetze-im-internet.de/vgv_2016/___44.html, zuletzt geprüft am 25.01.2023.

Vergabeverordnung, § 60 VgV: Ungewöhnlich niedrige Angebote. Online verfügbar unter <https://www.vergabevorschriften.de/uvgo/44>, zuletzt geprüft am 26.01.2023.

Vetters, Regina; Akbik, Alexander (2020): Gesundheitswesen Aktuell 2020.

Vinuesa, Ricardo; Azizpour, Hossein; Leite, Iolanda; Balaam, Madeline; Dignum, Virginia; Domisch, Sami et al. (2020): The role of artificial intelligence in achieving the Sustainable Development Goals. In: *Nature communications* 11 (1), S. 233. DOI: 10.1038/s41467-019-14108-y.

Visa (2022): Crypto | Money is evolving. Online verfügbar unter <https://usa.visa.com/solutions/crypto.html>, zuletzt aktualisiert am 25.01.2022, zuletzt geprüft am 25.01.2022.

Wadud, Zia; MacKenzie, Don; Leiby, Paul (2016): Help or hindrance? The travel, energy and carbon impacts of highly automated vehicles. In: *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 86, S. 1–18. DOI: 10.1016/j.tra.2015.12.001.

WEED e.V. (2020): Elektroschrott vermeiden. Handlungsoptionen für Verbraucher/innen. Online verfügbar unter https://www2.weed-online.org/uploads/weed_infoblatt_elektroschrott_web.pdf, zuletzt geprüft am 25.03.2023.

WEED e.V. (2022): Soziale Kriterien einfordern und überprüfen: Ansätze für eine faire öffentliche Beschaffung von IKT-Produkten. Online verfügbar unter <https://www.weed-online.org/publikationen/11072469.html>, zuletzt aktualisiert am 18.01.2023.

WikiChip LLC (2023): AMD's Zen CPU Complex, Cache, and SMU. Caches. Online verfügbar unter <https://fuse.wikichip.org/news/1177/amds-zen-cpu-complex-cache-and-smu/2/>.

William H Lehr; Carlos A Osorio; Sharon E Gillett; Marvin A Sirbu (2014): Measuring Broadband's Economic Impact. Online verfügbar unter https://www.researchgate.net/publication/266336485_Measuring_Broadband's_Economic_Impact.

Zandt, F. (2022): Server sind Stromverbraucher Nummer eins in der IT. Statista. Statista GmbH. Online verfügbar unter <https://de.statista.com/infografik/27846/stromverbrauch-von-deutschen-rechenzentren-und-kleineren-it-installationen-pro-jahr/>, zuletzt geprüft am 10.05.2023.

Zhu, Lei; Gonder, Jeffrey; Bjarkvik, Eric; Pourabdollah, Mitra; Lindenberg, Bjorn (2019): An Automated Vehicle Fuel Economy Benefits Evaluation Framework Using Real-World Travel and Traffic Data. In: *IEEE Intell. Transport. Syst. Mag.* 11 (3), S. 29–41. DOI: 10.1109/MITS.2019.2919537.

Zwick, M.M., Schröter, R. (2012): Fokusgruppen in der empirischen Sozialwissenschaft. Von der Konzeption zur. Konzeption und Durchführung von Fokusgruppen am Beispiel des BMBF-Projekts. Übergewicht und Adipositas bei Kindern, Jugendlichen und jungen Erwachsenen als systemisches Risiko. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften.