

Materialien

Dr. A.R. Köhler, Jens Gröger,
Ran Liu

Energie- und Ressourcenverbräuche der Digitalisierung

Expertise für das WBGU-Hauptgutachten
„Unsere gemeinsame digitale Zukunft“

Berlin 2018

Kurzgutachten

Energie- und Ressourcenverbräuche der Digitalisierung

Freiburg,
05.02.2018

Autorinnen und Autoren

Dr. A.R. Köhler
Jens Gröger
Ran Liu

Öko-Institut e.V.

Geschäftsstelle Freiburg

Postfach 17 71
79017 Freiburg

Hausadresse

Merzhauser Straße 173
79100 Freiburg
Telefon +49 761 45295-0

Büro Berlin

Schicklerstraße 5-7
10179 Berlin
Telefon +49 30 405085-0

Büro Darmstadt

Rheinstraße 95
64295 Darmstadt
Telefon +49 6151 8191-0

info@oeko.de
www.oeko.de

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	4
Tabellenverzeichnis	6
1. Einleitung	7
1.1. Problemstellung und Zweck der Studie	7
1.2. Begriffsbestimmung Digitalisierung	9
1.3. Konzeptueller Rahmen für das Literaturscreening	12
1.4. Vorgehensweise	13
2. Innovationen im Bereich der digitalen Transformation	13
2.1. Politische Agenda	13
2.2. Digitalisierungstrends in der Industrie	14
2.3. Hardwaretrends im IKT Sektor	17
2.4. Erläuterung häufig diskutierter Technikkonzepte	20
2.4.1. Pervasive Computing	21
2.4.2. Wearable computing und Smarte Textilien	21
2.4.3. Internet der Dinge	22
3. Marktentwicklungen im IKT Sektor	23
3.1. Personal Computer und Laptops	23
3.2. Smartphones und Wearable Devices	24
3.3. Internet der Dinge	27
3.4. Server und Speichersysteme	28
3.5. Fazit aus der Literaturrecherche zu Markttrends	30
4. Ressourcenaspekte digitaler Technologien und Anwendungen	31
4.1. In digitalen Endgeräten gebundene Ressourcen	32
4.1.1.1. Eingebettete Elektronik	35
4.1.1.2. Digitale Endgeräte	43
4.1.1.3. Wearable computing und Smarte Textilien	48
4.1.2. Industrie 4.0	51
4.2. Rechenzentren	52
4.3. Übertragungsnetze	59
5. Schlussfolgerungen	65
Literaturverzeichnis	68

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1:	Übersicht über den Gehalt an Elementen in einer IKT Leiterplatte	7
Abbildung 1-2:	Aufkommen an verschiedenen Kategorien von Elektronikabfällen (in Prozent bezogen auf das Jahr 2010)	8
Abbildung 2-1:	Vier Treiber der digitalen Transformation	15
Abbildung 2-2:	Entwicklungstrends technologischer Konzepte im Zusammenhang mit der digitalen Transformation	17
Abbildung 2-3:	Trends der Systemintegration digitaler Funktionen gemäß der Internationalen Technology Roadmap für Halbleiter	18
Abbildung 2-4:	Intels Innovationszyklen in der CMOS Fertigung	20
Abbildung 2-5:	Smarte Textilien als konvergierende Technologie des IKT Sektors und der Textilbranche	22
Abbildung 3-1:	Trend des weltweiten Absatzes von PCs, Laptops und Tablets sowie Projektion der Absatzentwicklung bis 2021	24
Abbildung 3-2:	Trend des weltweiten Absatzes von Smartphones sowie Projektion der Absatzentwicklung bis 2021	25
Abbildung 3-3:	Trend der weltweiten Verkaufszahlen für Smartwatches	26
Abbildung 3-4:	Projektion des weltweiten Absatzes von Wearable Devices (in Millionen)	26
Abbildung 3-5:	Projektion des weltweiten Absatzes von Wearable Devices (in Millionen)	27
Abbildung 3-6:	Anzahl der weltweit installierten Internet of Things Geräte (in Milliarden)	28
Abbildung 3-7:	Prognose zum Bestand installierter Server in Europa (EU-28)	29
Abbildung 3-8:	Prognose zum Bestand installierter Speichersysteme in Europa (EU-28)	29
Abbildung 3-9:	Umsatz, Stückzahlen und Kapazität von externen Speichersystemen in Europa (EU-28) von 2009 bis 2013	30
Abbildung 4-1:	Auswahl typischer Perspektiven auf Ressourcenaspekte von IKT in der Literatur	31
Abbildung 4-2:	Untergliederung der IKT-Infrastruktur in Geräte und Bauwerke	32
Abbildung 4-3:	Relative Massenverteilung der in Elektronikschrott (IKT-Geräte) enthaltenen Materialien	33
Abbildung 4-4:	Steuerelektronik in PKW (2014 von der Schweiz importiert)	35
Abbildung 4-5:	Vorkommen ausgewählter kritischer Materialien in PKW-Elektronik*	36
Abbildung 4-6:	Übersicht über Elemente, die in Mobiltelefonen enthalten sind	44
Abbildung 4-7:	Menge an Seltene Erde Elementen in verschiedenen Typen von digitalen Elektronikgeräten	48
Abbildung 4-8:	Extrapoliertes Aufkommen von obsoleten e-Textilien (links) und darin enthaltener Elektronik (rechts)	50
Abbildung 4-9:	Vergleich des Rohmaterialverbrauchs bei konventioneller Fertigung im Vergleich zu additiver Fertigung (3d Druck) von Flugzeugteilen	51
Abbildung 4-10:	Komponenten in einem typischen Rechenzentrum	52

Abbildung 4-11:	Ressourcenverbrauch von drei Rechenzentren im Vergleich	53
Abbildung 4-12:	Verteilung des Ressourcenverbrauchs von Rechenzentren auf Lebenszyklusphasen	54
Abbildung 4-13:	Prognostizierter Jahresenergiebedarf von Rechenzentren in Deutschland	55
Abbildung 4-14:	Prognose des globalen Energiebedarfs für Datazentren bis 2020	56
Abbildung 4-15:	Prognostizierter Jahresenergiebedarf von Rechenzentren weltweit bis 2030	56
Abbildung 4-16:	Geschätzte Anteile des Materialbestands des Mobilfunknetzes (GSM und UMTS) in Deutschland im Jahr 2008	61
Abbildung 4-17:	Datenvolumen in Festnetzen von 2011-2016 in Deutschland	62
Abbildung 4-18:	Datenvolumen in Mobilfunknetzen von 2009-2016 in Deutschland	62
Abbildung 4-19:	Prognose des globalen Energiebedarfs für das Internet bis 2021	64

Tabellenverzeichnis

Tabelle 4-1:	Anwendungen von Seltene-Erden-Elementen in elektronischer Hardware	34
Tabelle 4-2:	Masse kritischer Metalle in der Fahrzeugelektronik eines durchschnittlichen Fahrzeugs aus dem Jahr 2014	37
Tabelle 4-3:	Prognose der RFID Antennenmaterialien im UHF Bereich (868/915 MHz)	39
Tabelle 4-4:	Zusammensetzung typischer RFID Tags basierend auf ISO/IEC TR 24729-2:2007	40
Tabelle 4-5:	Zusammensetzung eines RFID Tags (Beispiel)	41
Tabelle 4-6:	Materialbedarf für eine durchschnittliche Variante eines RFID-tags von 32 cm ²	41
Tabelle 4-7:	Abschätzung und Trendextrapolation der Anzahl RFID Tags pro Jahr	42
Tabelle 4-8:	Extrapolation des Materialbedarfs für 32 cm ² RFID-tags in Deutschland	43
Tabelle 4-9:	Indikative Materialzusammensetzung von Smartphones	45
Tabelle 4-10:	Indikative Materialzusammensetzung von Tablets	46
Tabelle 4-11:	Gesamter Materialbedarf von Smartphones und Tablets im Verhältnis zur weltweiten Primärproduktion von Rohstoffen	47
Tabelle 4-12:	Beispiele für in E-Textilien integrierte Komponenten und Materialien	48
Tabelle 4-13:	Massenbilanz für exemplarische Server und Enterprise-Storage (VDI)	57
Tabelle 4-14:	Massenbilanz für einen exemplarischen Rack-Server (Ökodesign-Vorstudie)	58
Tabelle 4-15:	IKT- und Infrastrukturkomponenten in Kommunikationsnetzwerken	59
Tabelle 4-16:	Auswahl typischer IKT- und Infrastrukturkomponenten im Mobilfunknetz	60
Tabelle 4-17:	Global IP-Verkehrsvolumen pro Monat nach Jahren und Segmenten	63
Tabelle 4-18:	Prognostizierter jährlicher Stromverbrauch von Festnetz, WLAN und Mobilfunknetzen	64

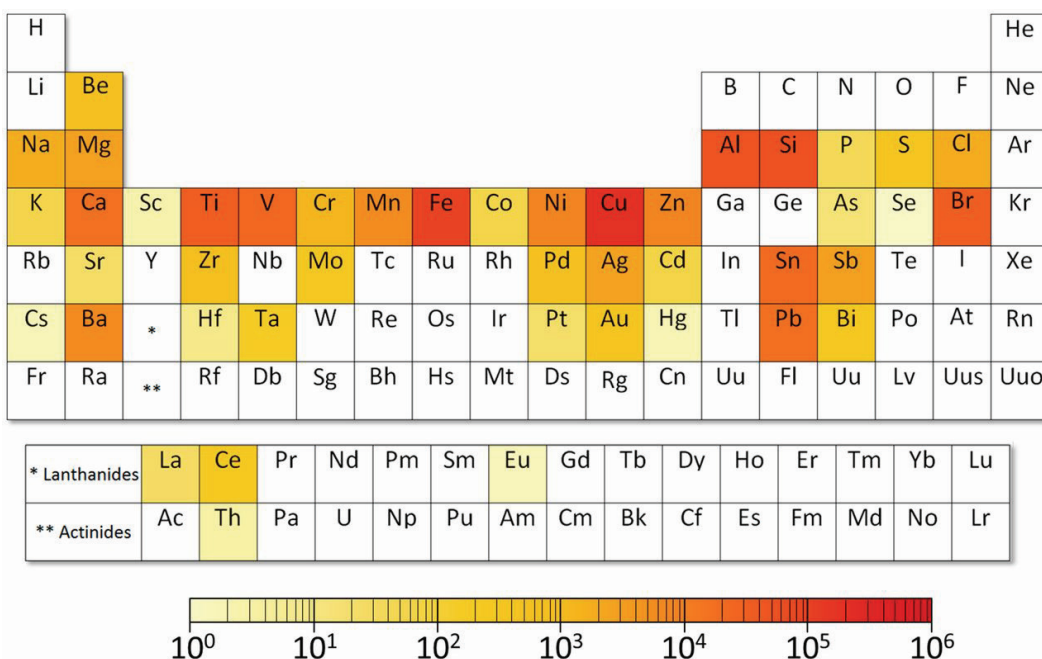
1. Einleitung

1.1. Problemstellung und Zweck der Studie

Die Digitalisierung bezeichnet einen technologischen Strukturwandel, der durch eine zunehmende Computerisierung und digitale Vernetzung gekennzeichnet ist. Dieser Trend betrifft fast alle Bereiche der Technosphäre, angefangen von technischen Infrastrukturen, industriellen Produktionsanlagen und Verwaltungen bis hin zu Haushalten und deren Ausstattung mit Konsumgütern. Zugleich steigt auch die Anzahl der Menschen, die regelmäßig digitale Geräte bzw. digitale Dienste benutzen. Obwohl Digitaltechnologien keine neue Erfindung sind (digitale Rechenmaschinen gibt es schon seit über einem halben Jahrhundert), so hat die Digitalisierung mittlerweile eine enorme Allgegenwärtigkeit in Wirtschaft und Gesellschaft erreicht. Nicht nur für Menschen in Industrieländern, sondern auch in Entwicklungs- und Schwellenländern ist die Nutzung digitaler Geräte unverzichtbar in der Wirtschaft und im täglichen Leben geworden.

Die materielle Basis der Digitalisierung ist die Informations- und Kommunikationstechnologie (IKT) sowie weitere elektronische Geräte wie Mikrocontroller, Sensoren, Aktuatoren und Hilfskomponenten wie Netzteile, Ladegeräte, Akkumulatoren und Optoelektronik. Es ist bekannt, dass digitale Technologien ein komplexes Inventar an Materialien enthalten. Insbesondere zu nennen sind Halbleitermaterialien (vorrangig Silizium) sowie Metalle und Kunststoffe. Einige der in digitalen IKT genutzten Materialien gelten aufgrund ihrer relativen Knappheit als versorgungskritische Ressourcen. Die in digitalen Produkten verwendeten Materialien sind in der Literatur und in der öffentlichen Diskussion unter verschiedenen Bezeichnungen bekannt, beispielsweise als strategische Metalle, Spezialmetalle, Technologiemetalle, Spurenmetalle bzw. Dotierungselemente. Im Gegensatz zu Eisenmetallen für Maschinen und Baumaterialien werden für die Herstellung von Hightech-Produkten vergleichsweise geringe Metallmengen pro Produkt benötigt (siehe Abbildung 1-1).

Abbildung 1-1: Übersicht über den Gehalt an Elementen in einer IKT Leiterplatte

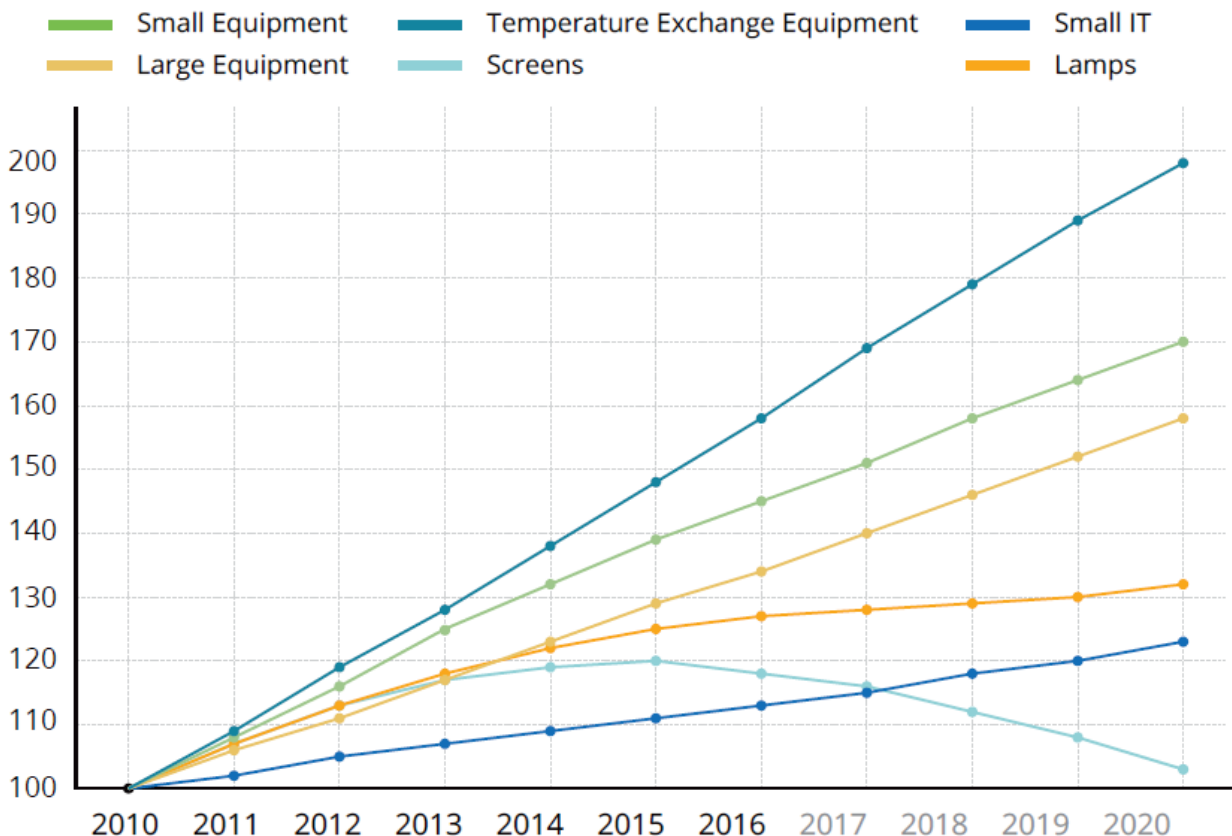


* Konzentration dargestellt in ppm
 Quelle: (Graedel et al. 2015)

Gleichwohl ist die Nachfrage nach Technologiemetallen enorm gestiegen, weil die gewünschte Performance digitaler Geräte (z.B. Geschwindigkeit der Datenverarbeitung) hohe Anforderungen an die Materialeigenschaften stellt. Technologische Innovation im IKT-Bereich ist ein wesentlicher Treiber für die wachsende Ressourcenintensität der Digitalisierung. Ein weiterer Grund ist das Marktwachstum des IKT-Sektors. Obwohl moderne IKT auf Produktebene zu einer erheblichen Steigerung der Ressourcenproduktivität geführt hat (z. B. aufgrund der Miniaturisierung von Digitalgeräten), hat dies nicht zu einem allgemeinen Rückgang des Ressourcenverbrauchs des IKT-Sektors beigetragen, weil die Massenproduktion von zumeist kurzlebigen Hightech-Produkten ressourcenintensiv ist.

Ein Indiz für den enormen Anstieg des Ressourcenverbrauchs der IKT liefert ein Blick auf das Ende des Lebenszyklus dieser Produkte. Es wird geschätzt, dass im Jahr 2017 weltweit Elektroabfälle mit einer Gesamtmasse von 46 Millionen Tonnen angefallen sind (Baldé et al. 2017). Dies entspricht etwa 6,1 kg pro Erdbewohner. Bei einer jährlichen Wachstumsrate von 3 bis 4% könnte die globale Menge an Elektroschrott bis 2021 auf 52,2 Millionen Tonnen steigen (ebd.) (siehe Abbildung 1-2). Der Anteil der kleinen digitalen IKT Endgeräte (wie z.B. Smartphones) weist dabei einen Anteil von 3,9 Millionen Tonnen am derzeitigen weltweiten Elektroschrott-Aufkommen auf. Die gegenwärtige Entstehung von Elektroschrott ist naturgemäß ein Resultat der technischen Innovationen der Vergangenheit und verdeutlicht den Ressourcenverbrauch früherer IKT Generationen.

Abbildung 1-2: Aufkommen an verschiedenen Kategorien von Elektronikabfällen (in Prozent bezogen auf das Jahr 2010)



Quelle: Baldé et al. (2017)

Die globale IKT-Industrie hat insgesamt einen hohen Anteil am Verbrauch natürlicher Ressourcen. In den letzten 50 Jahren wurden weltweit mehr natürliche Ressourcen verbraucht als je zuvor in der Menschheitsgeschichte (US EPA 2009).

Ein wesentlicher Grund für die hohe Ressourcenintensität der IKT ist, dass sich viele der genutzten Rohstoffe durch einen hohen ökologischen Rucksack auszeichnen. Dieser resultiert aus den energie- und materialintensiven Prozessen bei der Gewinnung und Weiterverarbeitung von Rohstoffen sowie den Fertigungsprozessen in der Halbleiterindustrie. Eingerechnet des gesamten Lebenszyklus' der IKT Hardware verursacht die Digitalisierung demzufolge wesentlich höhere Material- und Energieflüsse als die in Abbildung 1-2 dargestellten Stoffmengen, die direkt in der Hardware enthalten sind. Trotz des starken Zuwachses bei digitalen Geräten und Infrastrukturen gibt es bisher kaum einen systematischen Überblick über die der Digitalisierung zuzurechnende globale Ressourceninanspruchnahme.

Vor diesem Hintergrund ist das Ziel des Kurzgutachtens eine qualifizierte Abschätzung zur Entwicklung des globalen Bedarfs an Energie und Ressourcen der Digitalisierung. Konkret werden dabei die digitalen Infrastrukturen, also Rechenzentren, Netzwerke und Übertragungsstrukturen sowie IKT-Endgeräte (PC, Laptop, Tablets, Smartphones, Thin Clients, Router etc. aber auch spezifische Endgeräte des Internet der Dinge wie Sensoren und Aktoren) einbezogen. Mit Blick auf den zeitlichen Untersuchungsrahmen werden dabei die aktuell sichtbaren Entwicklungen in einem Zeithorizont bis 2025 betrachtet. Die ursprünglich gesetzte Zielsetzung einer Extrapolation des globalen Ressourcenbedarfs durch die Digitalisierung wurde aufgrund der Zielsetzung der schwierigen bzw. unzureichenden Informationslage nicht weiter verfolgt.

1.2. Begriffsbestimmung Digitalisierung

In der gegenwärtigen öffentlichen Debatte um die Digitalisierung steht der Begriff als Metapher für revolutionäre Veränderungen in der Wirtschaft wie auch im täglichen Leben des einzelnen Menschen. Durch die weitreichende Nutzung digitaler Informations- und Kommunikationstechnologien weist diese digitale Transformation ähnlich massive gesellschaftliche Auswirkungen auf wie in früheren Zeiten die Einführung der Dampfmaschine, der Eisenbahn oder der Fließbandfertigung. Durch die zunehmende digitale Vernetzung und Verarbeitung und Auswertung großer Datenmengen (Big Data) lassen sich immer mehr Dinge und Vorgänge automatisieren und somit optimieren. Zentral sind dabei nicht nur die digitalisierte und vernetzte Computertechnik sondern auch die darin einprogrammierten Steueralgorithmen. Die Optimierung wird zunehmend von Software selbst durchgeführt (machine learning). Digitalisierung und Automatisierung sind sehr weitgehende Begriffe und umfassen viele Technologiebereiche, wie zum Beispiel cyberphysikalische Systeme die in der Vision von Industrie 4.0 eine zentrale Rolle spielen. Besonders diskutiert werden in diesem Zusammenhang z.B. autonome Fahr- oder Flugzeuge und 3d Drucker. Oft wird für die Zukunft von einer weitgehenden Durchdringung des alltäglichen Lebens und des Arbeitens mit automatisierten digitalen Technologien ausgegangen.

Diese metaphorische Verwendung des Begriffes Digitalisierung für diese Transformationen geht weit über dessen ursprüngliche Definition hinaus. Im eigentlichen Sinne bezeichnet der Begriff Digitalisierung zunächst einmal den Prozess der Erfassung, Verarbeitung, Speicherung von **Informationen in digitaler Form**. Damit ist die Darstellung von Informationen als diskreter Zustand von Signalen (Übertragungsmedien) oder physikalischen Eigenschaften (Speichermedien) gemeint. Im Gegensatz zu analogen Signalen, welche eine Information als stufenlosen Zustandswert transportieren, wird eine digitale Information als abgestufter Zustandswert eines Signals interpretiert. Im einfachsten Fall hat eine digitale Information nur zwei mögliche Zustandswerte: Null und Eins. Diese Technik wird als „binär“ (Zweiersystem, z.B. Signal Aus und Signal An) bezeichnet und ist die Grundlage aller heute gebräuchlichen digitalen Technologien. Als Trägersignal digitaler Informationen können verschiedenartige physikalische Eigenschaften genutzt werden, beispielsweise

se ein Stromfluss in einem Transistor, Feldstärke in einem Kondensator, Magnetisierung eines Speichermediums oder Lichtstärke in der Optoelektronik.

Die Nutzung digitaler Techniken für die **Informationsverarbeitung** hat gegenüber der analogen Technik bedeutende Vorteile. Digital dargestellte Daten lassen sich störungsfreier erfassen, übertragen und wiedergeben als analoge Signale. Außerdem lassen sich Daten in digitaler Form maschinell sehr kostengünstig verarbeiten (mittels elektronischer Rechenmaschinen „**Computer**“) und das mit hoher Geschwindigkeit und Präzision. Ein wesentliches Merkmal digitaler Datenverarbeitung ist der Umstand, dass digitale Daten sowohl Informationen an sich als auch Steueranweisungen zur maschinellen Informationsverarbeitung („Algorithmus“) darstellen können. Diese Tatsache ermöglicht es, universell programmierbare Computer (sogenannte Turingmaschinen) zu konstruieren, welche in der Lage sind, ein in Form digitaler Daten vorliegendes Programm („**Software**“) auszuführen, welches digitale Daten verarbeitet. Dies wäre mit analogen Techniken nahezu unmöglich. Aus diesen Gründen hat sich die digitale Informationsverarbeitung seit ihrer erstmaligen Anwendung in den vierziger Jahren des 20sten Jahrhunderts immer weiter durchgesetzt und analoge Technologien inzwischen weitgehend verdrängt.

Digitale Datenverarbeitung und Übertragung wird üblicherweise unter dem Begriff **Informations- und Kommunikationstechnik (IKT)** zusammengefasst. Gegenüber der zuvor verwendeten analogen Technik ermöglicht die Digitaltechnologie aufgrund ihrer Kosteneffizienz und ihrer Skalierbarkeit eine weitgehende Durchdringung fast aller gesellschaftlichen Tätigkeiten, sowohl auf Ebene individueller Handlungen (z.B. Nutzung von Mobiltelefonen) als auch auf Makroebene (z.B. computergesteuerter Börsenhandel). Dieser Prozess wird als **digitale Transformation** bzw. „digitaler Wandel“ bezeichnet, weil die Nutzung digitaler Technologien mittlerweile in fast allen Bereichen der Ökonomie und des täglichen Lebens die dominierende Methode der Informationsverarbeitung ist. Aus dieser technischen Transformation haben sich fundamentale Veränderungen in Wertschöpfungsketten und Konsumprozessen ergeben. Digitale Technologien ermöglichen durch Automatisierung und Optimierung von Produktionsprozessen in der Regel enorme Effizienzgewinne, welche auch zu einer effizienteren Bewirtschaftung energetischer und materieller Rohstoffe beitragen können. Eine weitreichende Strategie zur **Effizienzsteigerung** der Ökonomie durch IKT-Einsatz wird als „Dematerialisierung“ bezeichnet. Darunter versteht man die Hoffnung auf eine weitreichende Substitution material- und energieintensiver Wertschöpfungsprozesse durch virtuelle Aktivitäten, z.B. Senden einer Textnachricht anstelle eines Briefes (Bits statt Atome) (Picot 1999).

Solche Effizienzsteigerungen auf Basis von Beschleunigungs- und Optimierungseffekten lassen sich als Kernstück der bisher zu beobachtenden digitalen Transformation herausstellen. Darüber hinaus ist es möglich, dass digitale Technologien zukünftig noch weiter reichenden Einfluss auf den Verbrauch energetischer und materieller Ressourcen haben werden. Mit zunehmender Leistungsfähigkeit der IKT wird es möglich, dass computergesteuerte Entscheidungsprozesse mehr und mehr über die Menge und die Geschwindigkeit des Energie- und Rohstoffverbrauchs einer digitalisierten Gesellschaft bestimmen. Digital programmierte **Algorithmen** beeinflussen bereits heute in maßgeblicher Weise Entscheidungen, die einzelne Menschen bis hin zur gesamten Gesellschaft als Grundlage für ihr Handeln treffen (Beispiel „Blockchain“ als technische Grundlage für Kryptowährungen). Der zunehmende Einsatz automatisierter Entscheidungsprozesse mit softwarebasierten Agenten, bis hin zum Einsatz sogenannter „**Künstlicher Intelligenz**“ führt dazu, dass die Betriebsweise von Maschinen und technischen Infrastrukturen nicht mehr unmittelbar von Menschen gesteuert wird sondern von Computern.

Dieser Gedanke impliziert eine Erweiterung der Bedeutung des Begriffs Digitalisierung: Zunehmend wird darunter nicht mehr vordergründig der physikalische Vorgang der digitalen Informationsverarbeitung verstanden sondern vielmehr die Verlagerung menschlicher (analoger) Beurtei-

lung von Informationen und Entscheidungen auf maschinelle digitale Informationsverarbeitung mittels Algorithmen. Hinzu kommt die stark zunehmende Verbreitung von computergesteuerten und vernetzten Maschinen, Anlagen, Fahrzeugen und Robotern, nicht nur in der Industrie sondern auch in Haushalten. Aufgrund solcher digitalen Endgeräte dehnt sich der Aktionshorizont der IKT von der virtuellen Sphäre auf die gesamte physische Umwelt aus. Computergenerierte Entscheidungen führen damit unmittelbar zu energie- und ressourcenrelevanten Vorgängen in der Realität. Beispielsweise werden autonom fahrende Autos nicht nur die konkrete Verkehrssituation beurteilen, sondern auch andere Aspekte optimieren, z.B. Routenplanung, Kapazitätsauslastung, Energiepreise etc.

Die deutsche Bundesregierung verbindet mit dem Begriff Digitalisierung vor allem die Nutzungsmöglichkeiten der digitalen Vernetzung und Kommunikation. In ihrer „Digitalen Agenda 2014 – 2017“ umfasst die Zukunftsvision den Ausbau digitaler Infrastrukturen sowie die Verfügbarkeit digitaler Dienste wie ortsunabhängige elektronische Kommunikation, Internet basierter Handel, Telemedizin und digitale Dienstleistungsangebote der öffentlichen Verwaltung (BMW i et al. 2014). Insbesondere betont die Bundesregierung die Förderung von Wachstumspotenzialen für die Wirtschaft infolge der intelligenten Produktion und Logistik sowie Innovationspotenziale bei intelligenten Produkten. Deshalb soll die Digitalisierung in der Produktion (z.B. Industrie 4.0, Autonomik, 3D-Druck) sowie bei Dienstleistungsinnovationen und Geschäftsmodellen (z.B. Big Data- und Cloud-Anwendungen) aktiv unterstützt werden.

Das Ausmaß dieser **Transformation** durch digitale Vernetzung und computergestützte Automatisierung hat einen **gravierenden Strukturwandel** in weiten Teilen der industriellen Wertschöpfungsketten und im Dienstleistungssektor zur Folge (Roland Berger Strategy Consultants und BDI 2015). Aufgrund der erwarteten radikalen Effekte und dem Ausmaß der Auswirkungen auf die Gesellschaft wurde dafür neue Begriffe geprägt, beispielsweise **digitale Revolution** oder **Industrie 4.0**. Dieser Trend könnte in Zukunft nicht nur substantielle Auswirkungen auf die Effizienz von Wertschöpfungsprozessen haben, sondern auch zu **Induktionseffekten** führen, insbesondere wenn digitale Technologien zur Stimulation des Konsums eingesetzt werden.

Mit Blick in die Zukunft lässt sich der Begriff Digitalisierung auf beinahe alle Lebensbereiche und ökonomischen Sektoren anwenden, da es immer mehr Anwendungsmöglichkeiten digitaler Technologien geben wird. Die gegenwärtig genutzten **technischen Grundlagen** der digitalen Technologien, insbesondere die **siliziumbasierte Elektronik**, werden weiterhin eine wesentliche Rolle spielen. Mittelfristig (bis 2025) sind keine grundlegenden Veränderungen dieser Basistechnologie der IKT zu erwarten. Das heißt, diese Art von digitaler IKT wird bis auf weiteres auch die Grundlage für alle dem Begriff Digitalisierung zuzurechnenden Anwendungen und Services bleiben. Langfristig allerdings könnte der Begriff Digitalisierung einen weiteren grundsätzlichen Bedeutungswandel erfahren und demzufolge auch alle dieser Technologie zuzuordnenden Auswirkungen auf energetische und materielle Ressourcen. Der technische Fortschritt im Bereich **Quanten-Computing** sowie quantenbasierter Datenübertragung könnte die heutige digitale Informationsverarbeitung in Zukunft obsolet machen, zumindest in den Kernbereichen großer Infrastruktureinrichtungen zur Datenverarbeitung und -übertragung. Quantentechnologie basiert auf quantenmechanischen Vorgängen (Superpositionsprinzip, Quantenverschränkung) und ist inhärent **nicht-digital**. Anstelle mit herkömmlichen binären Bits können Informationen mittels quantenmechanischer Überlagerungszustände, sogenannter „Quantenbits“ abgebildet und verarbeitet werden. Auch andere in der Forschung entwickelte nicht-digitale Methoden der Datenverarbeitung, wie z.B. „DNA-Computing“, könnten zukünftig die digitalen Technologien in zentralen Anwendungsbereichen ersetzen oder zumindest ergänzen.

Vor dem Hintergrund zukünftig denkbarer technologischer Umbrüche wird der Begriff Digitalisierung im Rahmen dieser Studie weit gefasst und schließt alle Anwendungen maschinengestützter programmierbarer Informationsverarbeitung mit ein, unabhängig von ihrer physikalischen Basis.

1.3. Konzeptueller Rahmen für das Literaturscreening

Zur Abschätzung des globalen Bedarfs der Digitalisierung an stofflichen und energetischen Ressourcen werden die vorliegenden Informationen in einem konzeptionellen Rahmen strukturiert, der sich an drei Ebenen der Umweltwirkung von IKT orientiert (European Information Technology Observatory (EITO) 2002; Hilty 2008):

- Effekte erster Ordnung: Beinhaltet alle Ressourceneffekte, die sich aus dem Produktlebenszyklus der IKT-Hardware ergeben, einschließlich der Produktion, Anwendungsphase und Entsorgung. Hierunter fällt zum einen das unmittelbare Materialinventar digitaler Hardware und Infrastrukturen sowie zusätzlich der materielle Rucksack dieser Materialien aus deren Herstellungsprozessen.
- Effekte zweiter Ordnung: Die Nutzung von IKT beeinflusst indirekt die Ressourceneffizienz anderer Prozesse wie Verkehr oder industrielle Produktion. Hierzu zählen neben dem Einfluss der IKT auf die Menge der durch andere Prozesse verbrauchten Ressourcen auch die Nutzungshäufigkeit und -dauer dieser Prozesse.
- Effekte dritter Ordnung: Aufgrund der weit verbreiteten Nutzung von IKT im täglichen Leben können sich ökonomische Gegebenheiten und Lebensstile verändern, was indirekt Auswirkungen auf die Wirkungen erster und zweiter Ordnung hat. Sogenannte Rebound-Effekte bezeichnen die Möglichkeit eines Mehrverbrauchs von Ressourcen, der durch IKT-bedingte Einspareffekte an anderer Stelle ausgelöst werden kann.

Das Screening der vorliegenden Literaturquellen erbrachte relevante Informationen hauptsächlich bezüglich der Effekte erster Ordnung. Konkret verfügbar sind quantitative Informationen hauptsächlich zum Materialinventar von Elektronikschrott (WEEE) sowie (mit Einschränkungen in der Detailliertheit der Daten) zum Materialinventar verschiedener diskreter Elektronikprodukte und Komponenten. Ebenfalls verfügbar sind Resultate verschiedener ökobilanzieller Studien zu IKT. Allerdings sind diese Ergebnisse für den gegebenen Zweck der Studie nur bedingt verwendbar, da sich die Ökobilanzergebnisse jeweils nur im Zusammenhang der jeweiligen Studie und angewendeten Methodik sinnvoll beurteilen lassen.

Für eine quantitative Abschätzung der durch IKT verursachten globalen Ressourcenströme mittels Massenbilanzansatz ist die vorliegende Datengrundlage nicht ausreichend. Erforderlich dafür wären erstens hinreichend detaillierte und aktuelle Daten zum Materialinventar der relevanten IKT-Produktgruppen. Zweitens wären statistische Daten zum weltweiten IKT-Markt (z.B. Anzahl jährlich verkaufter Produkte je Gerätetyp, Anzahl genutzter Hardware im Bestand) erforderlich. Während Materialinventardaten mit Abstrichen in der Aktualität aus diversen WEEE Studien grundsätzlich verfügbar sind, stehen statistische Daten zum globalen IKT-Markt nur sehr punktuell zur Verfügung. Aus diesen Gründen lässt sich der Massenbilanzansatz im Rahmen dieses Kurzgutachtens nicht sinnvoll einsetzen.

Die Literaturoswertung erbrachte nur wenige konsistente Informationen zu den Effekten zweiter und dritter Ordnung. Soweit überhaupt thematisiert, lassen sich die Informationen zu indirekten Ressourceneffekten der Anwendung digitaler Technologien in der Regel nicht verallgemeinern. Dies ist die Folge der speziellen Annahmen verschiedener Fallstudien zum jeweils betrachteten sachlichen, räumlichen und zeitlichen Bezugsrahmen. Aus diesen Gründen wurde der oben skiz-

zierte konzeptueller Rahmen lediglich für das Literaturscreening eingesetzt, jedoch mangels Datengrundlage in der Auswertung nicht weiter verfolgt.

1.4. Vorgehensweise

Vorhandene Studien und Veröffentlichungen wurden systematisch ausgewertet. Dazu wurde eine Onlineabfrage wissenschaftlicher Literaturdatenbanken sowie Internetsuchmaschinen anhand von Schlagworten in Deutsch und Englisch durchgeführt. Die aufgefundene Literatur wurde zunächst anhand der Titel und Autorenschaft vorselektiert und die verbleibenden Treffer dann anhand der Kurzzusammenfassung nach Relevanz geprüft. Hierbei war zu berücksichtigen, dass in der vorhandenen Literatur jeweils nur Teilaspekte von Umwelt- und Ressourcenindikatoren thematisiert werden und der Betrachtungsrahmen jeweils zeitlich, räumlich und / oder sachlich sehr divers ist (bspw. nur Rechenzentren, Einbezug der IKT-Netze, welche „Endgeräte“ inkl. IoT). Außerdem liegen der Literatur auch sehr unterschiedliche Zugänge und Betrachtungsrahmen zugrunde, so dass sich die Ergebnisse vorhandener Studien nur schwer vergleichen lassen. Um dennoch Aussagen im Sinne der oben beschriebenen Zielsetzung ableiten zu können, wurden die in den Studien jeweils zugrunde gelegten Annahmen, Treiber und Einflussfaktoren so ausgewertet, dass eine Zusammenführung und Extrapolation der in den Einzelstudien betrachteten Entwicklungen möglich war. Dabei zu treffende Annahmen und Vereinfachungen wurden berücksichtigt um die Unsicherheit bzw. die Bandbreiten der Aussagen darzustellen.

Die aus der Literatur ermittelten rohstoffbezogenen Bedarfe der Digitalisierung wurden bewusst nicht zu einer einzelnen Kennzahl verdichtet, da dies für eine der Sachlage angemessene Politikberatung wenig aussagekräftig erscheint. Vielmehr wurde eine Differenzierung und Clusterbildung typischer Rohstoffe vorgenommen. Diese wurde von der Methode Berichts „Deutschland 2049 – Auf dem Weg zu einer nachhaltigen Rohstoffwirtschaft“ hergeleitet.

2. Innovationen im Bereich der digitalen Transformation

2.1. Politische Agenda

Im Rahmen der **Hightech-Strategie der Bundesregierung** taucht Industrie 4.0 unter dem Aktionsfeld Digitale Wirtschaft und Gesellschaft auf. Als Ziel wird die Unterstützung von Wirtschaft und Wissenschaft bei der Umsetzung von Industrie 4.0 definiert. Deutschland soll als Leitanbieter für die technische Umsetzung und für zukünftige Produktionsstandorte von Industrie 4.0 positioniert werden. Ein Schwerpunkt wird dabei auf IT-Sicherheit gelegt. „Gleichzeitig werden die Auswirkungen auf den Arbeitsmarkt und die verschiedenen Beschäftigtengruppen in den Blick genommen, um sie im Interesse der Unternehmen und Beschäftigten gestalten zu können.“ (BMBF 2014)

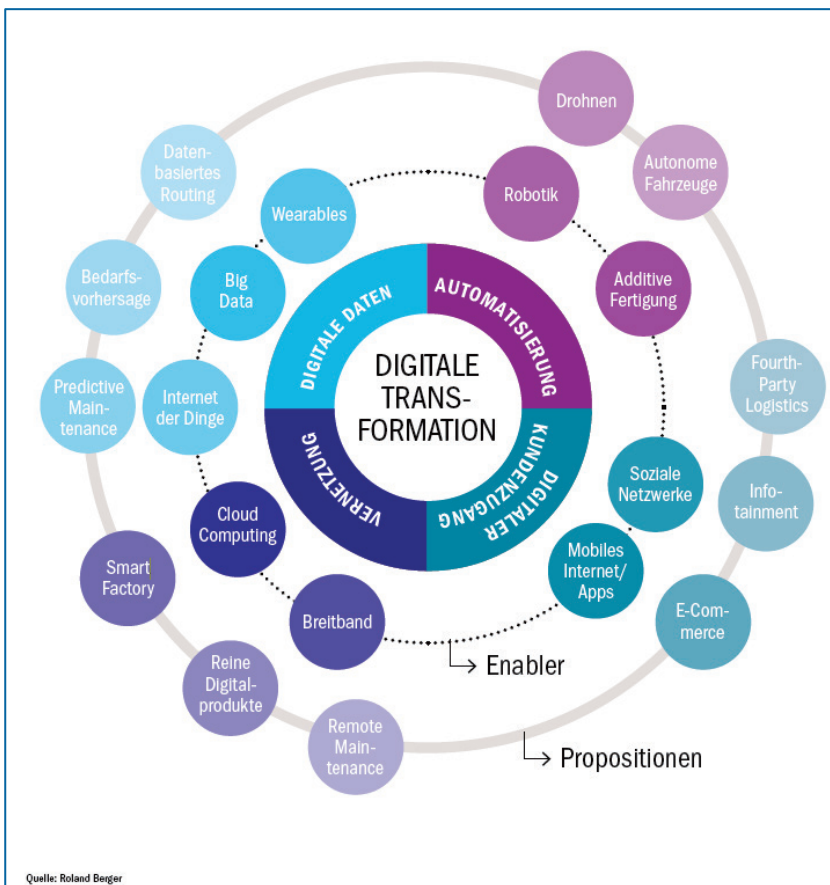
Auch in der **Digitalen Agenda 2014 – 2017** wird Industrie 4.0 benannt. Die Agenda zielt darauf ab, die Rahmenbedingungen für eine schnelle Umsetzung des Zukunftsprojekts Industrie 4.0 zu verbessern. Industrie 4.0 wird dabei als Möglichkeit gesehen, die Produktivität deutscher Unternehmen zu erhöhen: „Mit dem Übergang zu einer Industrie 4.0 können Unternehmen ihre Produktivität laut Schätzungen um 30 Prozent steigern. Der mit der Digitalen Agenda einzuleitende Prozess soll dazu beitragen, diese Chancen für Deutschland in den Bereichen Industrie 4.0, 3D, Smart Services, Big Data und Cloud Computing weiter zu erschließen.“ (Bundesregierung 2014). Die Entwicklung, zeitnahe Einführung und Erprobung sowie Weiterentwicklung vernetzter Produktion sollen als Grundlage dazu dienen, Deutschland als Leitanbieter zu etablieren und digitales Wachstumsland Nr. 1 in Europa zu werden. Im Rahmen der Hightech-Strategie der Bundesregierung ist Industrie 4.0 offiziell als Zukunftsprojekt ins Leben gerufen worden (BMWi 2014).

In dem im Spätsommer 2016 veröffentlichten **integrierten Umweltprogramm des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB)** werden sowohl Chancen als auch Risiken von Industrie 4.0 aufgeführt. Die Umsetzung von Industrie 4.0 wird darin mit einer starken Veränderung von Geschäftsprozessen assoziiert, deren umweltentlastendes Potenzial noch nicht sicher vorhergesagt werden kann. Risiken werden z.B. in einem Anstieg des Ressourcenbedarfs oder den negativen gesundheitlichen Auswirkungen durch elektromagnetische Felder gesehen. Die Möglichkeit, durch die erhobenen zusätzlichen Daten Aussagen über die Nachhaltigkeitsperformance von Produkten und Prozessen zu machen, wird hingegen als Chance bewertet. Auch neue Formen des Konsums, die über das Internet ermöglicht werden (z.B. Online-Tausch-Plattformen), werden als Chance beschrieben. Das BMUB sieht die Vermittlung von Nachhaltigkeitskompetenzen im Rahmen von Aus-, Fort- und Weiterbildung als wesentliche Bedingung für die erfolgreiche Realisierung der beschriebenen Chancen. Ein Förderprogramm soll helfen, den beschriebene Bedarf nach nachhaltigkeitszentrierten Bildungsangeboten, abzudecken (BMUB 2016).

2.2. Digitalisierungstrends in der Industrie

Der Bundesverband der Deutschen Industrie (BDI) hat neben der Vernetzung drei weitere Hebel der digitalen Transformation identifiziert: Digitale Daten, Automatisierung und digitaler Kundenzugang. Für jeden der vier Hebel werden mehrere als „Enabler“ bezeichnete technische Voraussetzungen benannt, die aus Sicht des BDI für die Umsetzung notwendig sind (siehe Abbildung 2-1).

Abbildung 2-1: Vier Treiber der digitalen Transformation



Quelle: Roland Berger Strategy Consultants und BDI 2015¹

Die Digitalisierung in zahlreichen Anwendungsfeldern hat in den vergangenen Jahren zu großen strukturellen und kulturellen Veränderungen innerhalb der Gesellschaft geführt. So hat beispielsweise die Möglichkeit des Online-Shoppings eine signifikante Veränderung des Einkaufsverhaltens bewirkt, der Einsatz von Computern und digitaler Infrastruktur in Unternehmen die Arbeitswelt entscheidend geprägt und das Angebot von Sharing-Plattformen wie Airbnb auch das Reisen verändert. Die internetgetriebene Digitalisierung mit zunehmender Automatisierung bei der Produktion von Gütern und Dienstleistungen, auch diskutiert unter dem Begriff Industrie 4.0, wird die Welt im 21. Jahrhundert maßgeblich beeinflussen.

Im gewerblichen Nutzungsumfeld ist die Digitalisierung der Geschäftsprozesse mittels „Enterprise Content Management“ (ECM) oder Software für das Prozess-Management noch nicht sehr weit fortgeschritten. Laut (Bitkom 2016a) setzen in Deutschland bisher nur 40 Prozent der Unternehmen aller Branchen auf eine Digitalisierungsstrategie. Dabei ist die Digitalisierung von Dokumenten der von 51 Prozent der Unternehmen bisher am häufigsten verwendete Nutzungszweck von ECM. Weitere 14 bis 25 % der Unternehmen haben demnach die Umstellung auf digitale Lösungen konkret geplant. In 2016 nutzten 16 Prozent der Internetnutzer Cloud-basierten Produktivtools, z.B. Office-Programme, zur Bearbeitung und Speicherung von Texten, Tabellenkalkulation, Präsentationen oder anderen Dokumenten (Bitkom 2016b). Cloud-basierte Software ermöglicht es

¹ Der Begriff Enabler bezeichnet befähigende Technologien. Der Begriff Propositionen mögliche Anwendungen digitaler Technologie.

zwar unabhängig von Gerätetyp und Ort zu arbeiten aber diese Funktionen lassen sich aus Ergonomiegründen nach wie vor besser an Geräten mit großem Display erledigen.

Industrie 4.0

Die computergestützte Automatisierung der Produktion von Gütern und Dienstleistungen hat sich als charakteristisches Merkmal für die industrielle Wertschöpfung im 21sten Jahrhundert herauskristallisiert. Während computergestützte Fertigung bereits im ausgehenden 20sten Jahrhundert eine wichtige Rolle spielte, geht die heutige Form der industriellen Digitalisierung weit über die damals realisierbaren Möglichkeiten hinaus. Mit der Nutzung internetbasierter Technologien zur Vernetzung von Maschinen und Produktionsanlagen in Echtzeit ergeben sich völlig neue Konzepte für die Planung und Organisation von Fertigungsprozessen. Diese Konzepte werden mit dem Begriff *Industrie 4.0* zusammengefasst und bezeichnen die Vision einer industriellen Fertigung der Zukunft, bei der digitale Daten und Algorithmen das essenzielle Merkmal und wichtigste Ressource darstellen.

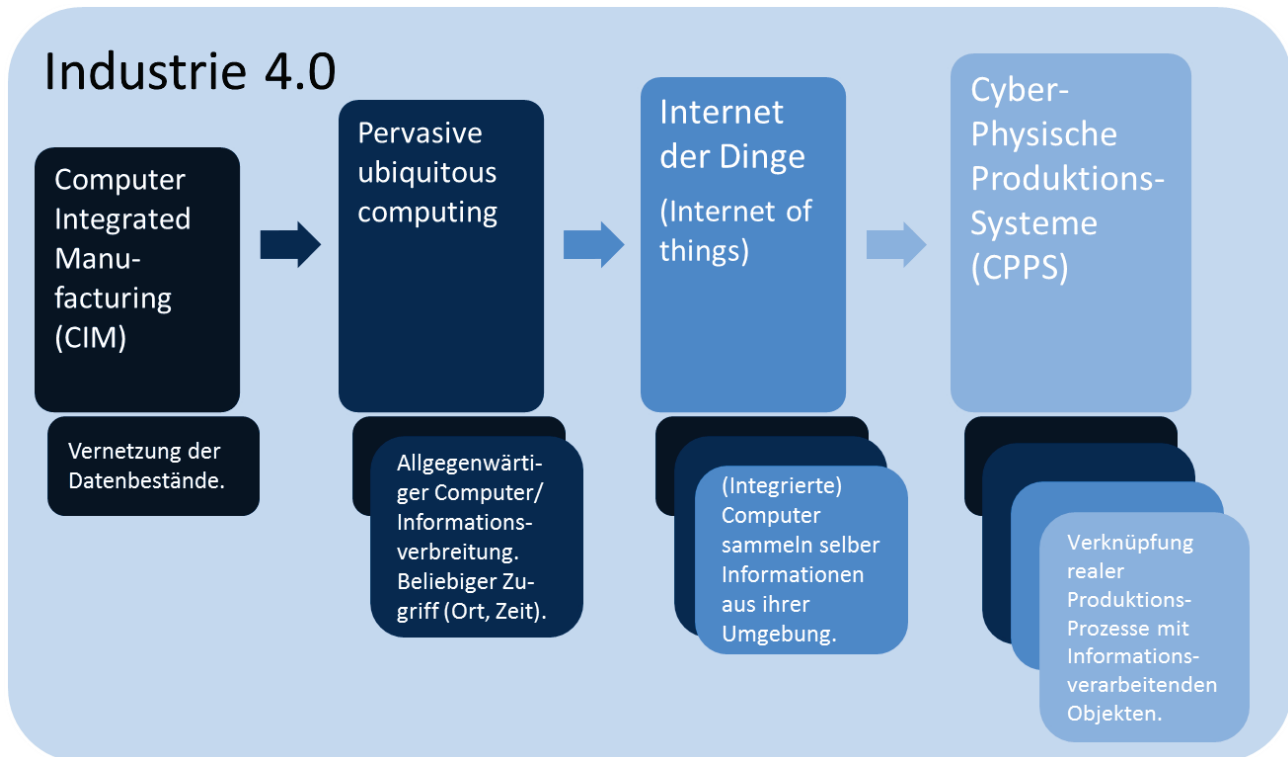
Für den Begriff Industrie 4.0 existiert bisher keine einheitliche Definition. Geprägt wurde der Begriff im Rahmen der Hannover Messe 2011 als Bezeichnung für die gegenwärtig stattfindende digitale Transformation, welcher die Eigenschaften einer „vierten industriellen Revolution“ beigemessen wird (Reinsprecht 2013). Eine umfassende Beschreibung bietet die Arbeitsdefinition der Plattform Industrie 4.0 (2013), auf die in vielen Publikationen und Statements verwiesen wird (Ittermann et al. 2015). Industrie 4.0 wird dort definiert als *eine neue Steuerungsmöglichkeit der Wertschöpfungskette, von der Idee über Auftrag, Entwicklung, Fertigung, der Auslieferung an Endkunden bis zum Recycling – einschließlich der damit verbundenen Dienstleistungen*. „Basis ist die Verfügbarkeit aller relevanten Informationen in Echtzeit durch Vernetzung der an der Wertschöpfung beteiligten Instanzen sowie die Fähigkeit, aus den Daten zu jedem Zeitpunkt optimalen Wertschöpfungsfluss abzuleiten. Durch die digitale Vernetzung von Menschen, Objekten und Systemen entstehen dynamische, echtzeitoptimierte und selbst organisierende, unternehmensübergreifende Wertschöpfungsnetzwerke, die sich nach unterschiedlichen Kriterien wie bspw. Kosten, Verfügbarkeit und Ressourcenverbrauch optimieren lassen.“ (Ittermann et al. 2015).

Allerdings hat sich die Interpretationen und das Verständnis des dem Begriff Industrie 4.0 zugrundeliegenden technischen und ökonomischen Konzepts seit der Einführung stark diversifiziert. Der Begriff Industrie 4.0 wird vor allem in Deutschland verwendet (VDI Zentrum Ressourceneffizienz 2017). Im internationalen Kontext wird die Digitalisierung der industriellen Fertigung mit englischsprachigen Begriffen wie *smart factory*, *factories of the future*, oder auch als Geschäftsmodell „Big Data“ bezeichnet.

Die technischen Grundlagen für eine Industrie 4.0 haben sich über die letzten Jahrzehnte zunächst langsam, im Zeitverlauf mit zunehmender Geschwindigkeit entwickelt. Die autonomen Produktionssysteme, die die technologische Grundlage der Industrie 4.0 bilden, knüpfen dabei an bestehende Automatisierungskonzepte an. In den 1980er und 1990er Jahren wurde bereits die fortschreitende Vernetzung der Datenbestände unter dem Stichwort *Computer Integrated Manufacturing (CIM)* diskutiert und zumindest teilweise realisiert (Hirschen-Kreinsen 2014). Ein Beispiel ist der Einsatz von *Computer Aided Design (CAD)* in Entwicklungs- und Konstruktionsprozessen. Die Ablage der digital erstellten Objektdarstellungen in einer bereichsübergreifenden Datenbank ermöglicht den Zugriff und die Verwendung von allen Mitarbeitern des Unternehmens (Wirtschaftslexikon 2015). Neuartige technologische Konzepte wie *Internet of things* und *Cyber-Physical Production-Systems* sind als technische Weiterentwicklungen des *Pervasive / Ubiquitous Computing* anzusehen (Hirschen-Kreinsen 2014) (siehe Abbildung 2-2). Trotz der Anknüpfung an solche existierenden Technologien wird die nun erwartete industrielle Gesamtanwendung als Automatisierungs-

sprung bezeichnet, der alle bisherigen Entwicklungen zur Prozessautomatisierung in ihren Auswirkungen weit übersteigt. Ermöglicht wird dies durch eine neue Intensität der Vernetzung der digitalen mit der realen Welt (Hirschen-Kreinsen 2014), mit Hilfe des Internets des 21. Jahrhunderts.

Abbildung 2-2: Entwicklungstrends technologischer Konzepte im Zusammenhang mit der digitalen Transformation



Quelle: Eigene Darstellung

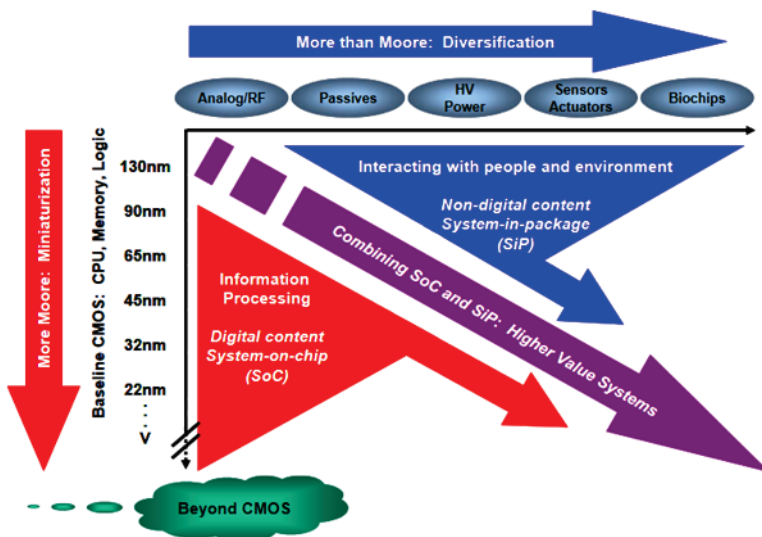
2.3. Hardwaretrends im IKT Sektor

Die technologischen Innovationen in der Halbleiterindustrie bestimmen nach wie vor die Entwicklungen auf den Marktsektoren der PCs und Notebooks. Die Industrie verfolgt eine seit einigen Jahren etablierte Roadmap zur weiteren Leistungssteigerung der aktiven Halbleiterbauelemente, insbesondere bei Prozessoren (CPU), Grafikprozessoren (GPU) und Systemspeichern (DRAM). Seit den frühen 70er Jahren folgt der Innovationspfad in der Halbleiter-Industrie dem sogenannten Mooreschen Gesetz (Moore's Law), welches besagt, dass sich die Anzahl der pro Flächeneinheit herstellbaren Transistoren bei integrierten Schaltkreisen (ICs) etwa alle zwei Jahre verdoppelt. Dies wird durch immer weitere Miniaturisierung der Strukturgrößen bei der Halbleiterfertigung erreicht wodurch bei ICs ein exponentielles Wachstum der Transistordichte erzielt wird. Zudem treten in den letzten Jahren verstärkt halbleiterbasierte Massenspeicher (Solid State Drives, SSD) auf dem Markt in Erscheinung. Letztere bestehen aus Halbleitermaterialien und enthalten keine beweglichen Teile mehr. Dies bewirkt nicht nur die Steigerung der Leistungsfähigkeit von Computern sondern auch ein besseres Kosten - Leistung Verhältnis.

Durch das Moor'sche Gesetz hatten die Chiphersteller (Integrated device manufacturers, IDM) bisher die volle Kontrolle über das Tempo der technologischen Innovationen und konnten das Marschtempo der Computer-Industrie vorgeben. Systemintegratoren (Computer Hersteller) hingegen bauten die jeweils neu auf den Markt kommenden Generationen von ICs in neue und immer leistungsfähigere Computersysteme ein. Allerdings hat die rasche Abfolge von neuen Generationen bei Prozessoren auch zur Folge, dass die Systemintegratoren kaum in der Lage waren bestehende Computersysteme zu optimieren bevor schon die nachfolgende IC Generationen auf den Markt kam (International Technology Roadmap for Semiconductors 2015). Eine der Konsequenzen der raschen Abfolge neuer IC Generationen ist neben der progressiven Obsoleszenz² von Computerhardware auch der Mangel Aufwärtskompatibilität der angebotenen Computersysteme. So ist die Nachrüstbarkeit älterer Computer oftmals dadurch limitiert, dass die Systeme nur begrenzte Menge an RAM adressieren können oder inkompatibel zu externen Schnittstellen werden.

Die Situation der Computerindustrie hat sich in den letzten Jahren allerdings stark gewandelt. Systemintegratoren sind heute in der Lage, integrierte Schaltung zu designen und zu realisieren um mehrere Funktionalitäten in einem einzigen Chip (so genannte System on Chip, SOC) oder sogar einem einzigen Paket (System in Package, SIP) zu integrieren. Dies ist effizienter und kostengünstiger als mehrere getrennte ICs (zum Beispiel Mikroprozessor, Grafik-Prozessor, mehrere Speichertypen, USB etc.) auf einer Leiterplatte zu montieren. Dieser Innovationstrend geht einher mit dem Markterfolg von Design-dominierten mobilen IKT Endgeräten wie Tablets, E-Book-Reader, und Smartphones. Das erlaubt den heutigen Systemintegratoren viel mehr als früheren PC Anbietern das Tempo der Innovation für die Elektronikindustrie zu bestimmen (Arden et al. 2012). Die System on Chip (SOC) und System in Package (SIP) Architekturen werden deshalb als zukünftige Treiber der Entwicklung betrachtet und werden die Diversifikation der IKT Gerätetypen weiter vorantreiben (ibid.) (vgl. Abbildung 2-3).

Abbildung 2-3: Trends der Systemintegration digitaler Funktionen gemäß der Internationalen Technology Roadmap für Halbleiter



Quelle: Arden et al. 2012

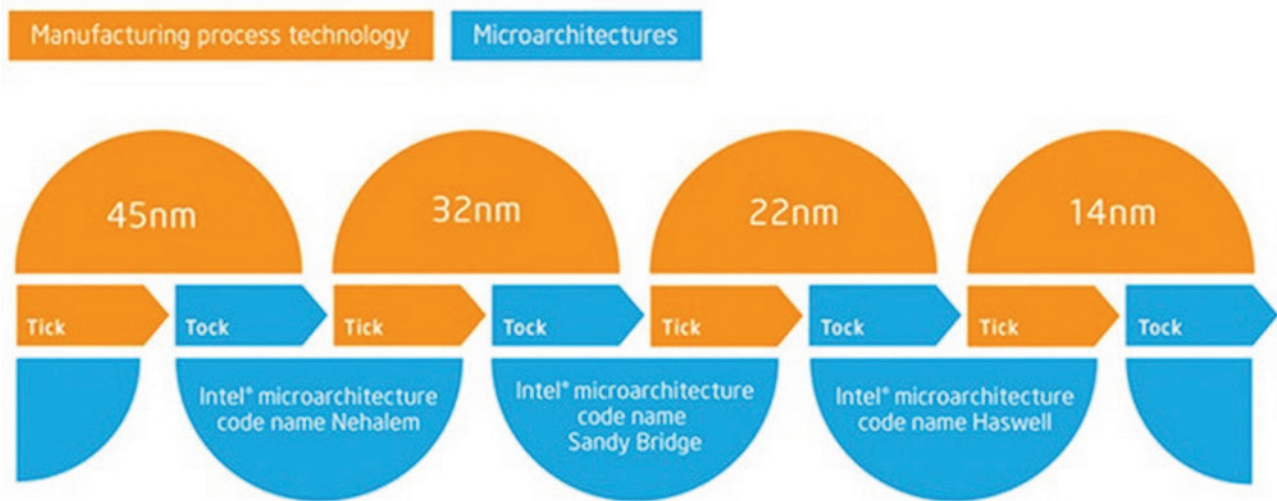
² Verkürzung der Hardwarelebensdauer durch relative Veralterung installierter Hardware im Vergleich zum aktuellen Stand der Technik.

Im Folgenden werden die mittelfristig absehbaren technischen Innovationen bei den einzelnen Hardwarekomponenten kurz zusammengefasst. Die IEEE Computer Society hat für 2016 die folgenden Trends bezüglich der IKT-Hardware ausgemacht:

Speicher und Speichermedien: Fortschritte bei der Entwicklung neuer Formen von nichtflüchtigen Speichern, die versprechen mehr Daten zu geringeren Kosten zu speichern und deutlich weniger Strom zu verbrauchen. Intel und Micron hatten bereits 2016 eine als „Optane“ bezeichnete völlig neue Speichertechnologie basierend auf einem 20nm-Prozess auf den Markt bringen (IEEE Computer Society 2016). Diese solid-state Technologie basiert auf einzelnen nichtflüchtigen Speicherzellen in einem dreidimensionalen Gitter angeordnet sind. 3D XPoint Speicher sollen eine Les- und Schreibgeschwindigkeit von über 20 Gbps erreichen. Diese Geschwindigkeit erreicht Werte, welche bisher nur von flüchtigen Speichertechnologien (RAM) erreicht wurden. Intel zufolge wird Optane deshalb den Unterschied zwischen flüchtigen und nichtflüchtigen Speichern (RAM und SSD) aufheben. Stattdessen werden zukünftige Computer die Optane Speicher sowohl als Arbeitsspeicher als auch als Massespeicher nutzen. Deshalb sollen Intels Optane Speichermodule in Form von DDR4 DIMM Speicherriegeln auf den Markt kommen und elektronisch und physisch mit DDR4 Slots kompatibel sein. Damit wäre es durchaus möglich, dass typische Computer in einigen Jahren keine anderen Datenspeicher als ein 3D-XPoint Arbeitsspeicher haben werden. Dieser hält die Laufzeitdaten des Betriebssystems auch im Aus-Zustand ohne Energie für Refresh-Zyklen zu verbrauchen wie das bei heutigem DDR3 RAM der Fall ist. HDDs und SSDs würden dadurch obsolet. Jedenfalls ist klar, dass diese 3D Xpoint Technologie nur dann ihre Potenziale voll ausschöpfen kann wenn die Speicheradressierung im Computer komplett neu organisiert wird. Dies erfordert eine völlig neue Hardwarearchitektur (z.B. CPU) sowie neukonzipierte Betriebssysteme und Anwendungssoftware (Labs 2016).

Logic ICs (CPU): Die bis vor einigen Jahren geltende Trajektorie der Innovationen im Halbleitersektor basierte auf der immer weiter voranschreitenden Miniaturisierung der Halbleiter Strukturen (Transistoren) auf CMOS Chips, zu denen die Hauptprozessoren sowie Grafikprozessoren gehören. Diese durch das Moor'sche Gesetz bestimmte Innovations-Roadmap wird beim CPU Hersteller Intel seit einigen Jahren in Form eines sogenannten „Tick-Tock“ Zyklus der Produktentwicklung realisiert (Abbildung 2-4). Dabei steht jeder „Tick“- Zyklus für die periodische Umstellung der Halbleiterfertigung („fab“) auf eine jeweils weiter miniaturisierte Dimension des Chip-Designs.

Abbildung 2-4: Intels Innovationszyklen in der CMOS Fertigung



Quelle: (Intel Corporation k.A.)

Bei jedem Miniaturisierungsschritt erfolgt eine Umstellung der Produktionstechnologie (Lithografie). Mit dieser wird eine existierende CPU Mikroarchitektur skaliert (verkleinert). Der typische Anstieg der Transistordichte ermöglicht neue Funktionen, höhere Leistungsstufen und eine höhere Energieeffizienz. Im anschließenden „Tock“-Zyklus wird eine neue Mikroarchitektur entwickelt, welche die neuen Möglichkeiten der Fertigungsprozessstechnologien ausnutzt. In diesem Zyklus wird versucht, die Funktionsdichte Leistung und Energieeffizienz der jeweiligen Prozessorgeneration zu optimieren. Gleichzeitig werden neue Designkonzepte der Halbleiterfertigung eingeführt, wie z.B. die als „3D tri-gate Transistors“ (Intel) bzw. FinFETs (AMD) bezeichnete Technologie. Solche Innovationen sollen nicht nur Schritt halten mit der vom Moor'schen Gesetz vorgegebenen Roadmap sondern auch die CPU Leistung verbessern und die elektrische Verlustleistung reduzieren. Allerdings haben sich in den letzten Jahren die Einführungsintervalle pro Silizium fab-Prozess branchenweit von 2 Jahres Intervallen auf einen 3 Jahres Rhythmus verlangsamt. Der Grund ist eine von Intel neu eingeführte dritte Phase (Refresh-Phase) zur Konsolidierung der Mikroarchitektur.

Der gegenwärtige den PC Markt dominierende Stand der Technik (Node) in der Halbleiterfertigung ist 14nm, das heißt, die Strukturbreite der Transistoren (half-pitch) liegt bei 14nm. Im aktuellen Tick-Zyklus wird diese Prozessorarchitektur auf 10nm skaliert. 14nm CPUs sollen von Intel ab 2018 unter dem Namen „Cannonlake“ auf den Markt angeboten werden und sind zunächst für high-end Anwendungen relevant. Der aktuelle „Tock Zyklus“ beinhaltet eine Weiterentwicklung der Prozessorarchitektur. Intels öffentlich kommunizierte Pläne legen nahe, dass der 10nm Node bis etwa 2020 genutzt werden wird und anschließend von einem 5nm Node ersetzt wird. Für die Halbleiterfertigung in Dimensionen unter 10 nm wird gegenwärtig die EUV-Lithografie (Extreme Ultraviolet Lithografie) entwickelt. Aus heutiger Perspektive ist unklar wie die Entwicklung der Computertechnologie danach weiter geht da die Miniaturisierung in Dimensionen unter 5nm auf physikalische Grenzen stößt.

2.4. Erläuterung häufig diskutierter Technikkonzepte

Viele der heute bekannten digitalen Anwendungen sind zunächst nicht zielgerichtet auf ihren Rolle im Kontext der digitalen Transformation hin geplant und vorangetrieben worden, sondern haben sich aus einer technischen Innovation heraus (Technology Push Modell) oder als Nischenanwen-

dung (Market Pull) entwickelt. Nachdem mit der Zeit das Ausmaß und der Einfluss der beschriebenen Entwicklungen realisiert wurden, gibt es nun zunehmend Bestrebungen, den Transformationsprozess gezielt zu gestalten. Im Folgenden werden einige Teilaspekte technologischer Innovationen kurz erläutert, welche sich in den Kontext der digitalen Transformation einfügen.

2.4.1. Pervasive Computing

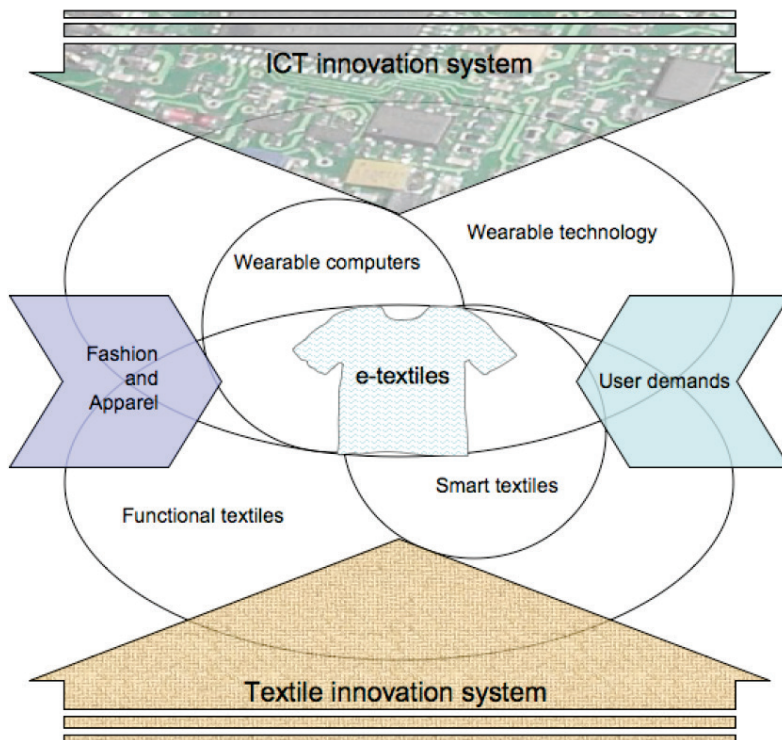
Der Begriff Pervasive / Ubiquitous Computing bezeichnet das Eindringen der Computertechnologie in Bereiche des Alltags bezeichnet, in denen sie bisher nicht präsent war und in denen sie möglicherweise auch gar nicht als Computertechnologie erkannt wird. Die Digitalisierung macht jeden Gegenstand, in den sie Einzug hält, zum potenziellen Bestandteil eines Informations- und Kommunikationssystems. Zusammen mit dem Trend zur drahtlosen digitalen Vernetzung, der mit dem Mobilfunk eingeleitet wurde, zeichnet sich die Vision allgegenwärtiger, aber nahezu unsichtbarer Computer ab, die untereinander Daten austauschen und uns in allen Bereichen des Lebens diskret unterstützen (Hilty et al. 2005). Basierend auf seinen Entwicklungen am Xerox-Forschungszentrum im Silicon Valley, propagierte Mark Weiser seit 1991 den allgegenwärtigen Computer (Langheinrich und Mattern). Dieser ermöglicht eine „[...] Allgegenwärtigkeit von Informationsverarbeitung und damit einhergehend der jederzeitige Zugriff auf Daten von beliebiger Stelle aus.“ (Mattern 2005) (Matterno.J.). Ein praktisches Beispiel dieses digitalen Systems ist der Einsatz von elektronischen Etiketten in einem Telekommunikationsunternehmen in Hong Kong, um die Position bestimmter Einrichtungsgegenstände jederzeit in Echtzeit lokalisieren zu können. Die erhobenen Daten dienen anschließend als Grundlage, die Nutzung der Ressourcen auszuwerten (Fleisch et al. 2003).

2.4.2. Wearable computing und Smarte Textilien

Ein Innovationstrend im Zusammenhang mit dem Konzept des Ubiquitous Computing betrifft die Integration von Elektronikkomponenten in Alltagsgegenstände, um diese „schlau“ (smart) zu machen (Schneegass und Amft 2017). Das Konzept der „Smarten“ Textilien bezieht sich auf die Einbettung analoger oder digitaler elektronische Geräte in Kleidungsstücke oder technische Textilien. Diese Technikvision dieser konvergieren Innovationen aus dem IKT Bereich und der Textilbranche werden als elektronische Textilien (E-Textilien), intelligente Textilien oder „Wearables“ bezeichnet. In den letzten Jahren hat sich ein Hype um solche textilen Produkte mit digital erweiterter Funktionalität entwickelt. Zu den ambitioniertesten Ansätzen für intelligente Textilien gehört der Trend, Textilien als Plattform für IKT zu nutzen. Textile integrierte Sensoren und Aktoren, Beleuchtungselemente und elektronische Geräte sind einige der grundlegenden Technologien für E-Textilien (Schwarz et al. 2010). Wearable Computing weist auf eine weitreichende Vision von Computing-Geräten hin, die in Kleidungsstücke eingebettet sind, sind unaufdringlich aber allgegenwärtig im täglichen Leben präsent sind (Hilty et al. 2005). Hot Spots der Innovation bei smarten Textilien sind die Marktsegmente Verbraucherbekleidung, Gesundheitswesen, Arbeitsbekleidung und Militär.

Einige Smart Textil Produkte wurden bereits vor einigen Jahren kommerzialisiert (z.B. in Jacken eingebauter MP3-Player und Solarzellen). Obwohl sich diese Technologie heute noch in einem Frühstadium der Kommerzialisierung befindet, wird sie sich möglicherweise schon in wenigen Jahren auf dem Weg zum Massenmarkt im Textil- und Bekleidungssektor befinden (Rogan 2014). In 2017 haben global führende Unternehmen des Digitalsektors begonnen gemeinsam mit bekannten Marken der Fashionbranche smarte Textilien auf dem Konsumentenmarkt zu platzieren.

Abbildung 2-5: Smarte Textilien als konvergierende Technologie des IKT Sektors und der Textilbranche



Quelle: (Köhler 2013a)

2.4.3. Internet der Dinge

Der Begriff Internet der Dinge (engl. Internet of Things - IoT) wurde erstmals 1999 von Kevin Ashton, einem Mitarbeiter des Massachusetts Institute of Technology (MIT), verwendet. Schon damals hatte er die Vision, dass Computer nicht länger nur von Menschen eingespeiste Ideen und Informationen verarbeiten, sondern selbst Informationen über ihre Umgebung sammeln. Dies geschieht mit Hilfe von Sensoren, die ein Sehen, Hören und Riechen der Umgebung ermöglichen (Ashton 2009). In der praktischen Umsetzung bedeutet das, dass z.B. ein Thermostat nicht länger nur dazu genutzt wird, die Raumtemperatur auf einen eingestellten Wert zu regeln. Zusätzlich erfasst es mit Hilfe eines Bewegungsmelders, ob sich noch jemand im Raum befindet, oder fragt online die Wettervorhersage ab und reagiert entsprechend darauf (Tißler 2013). Helene Gill, Mitglied der National Science Foundation in den USA, führte 2006 den Begriff „Cyber-Physical Systems“ ein. Sie bezeichnet die „Verknüpfung von realen Objekten und Prozessen mit informationsverarbeitenden (virtuellen) Objekten und Prozessen über offene, teilweise globale und jederzeit miteinander verbundene Informationsnetze.“ (acatech 2012). „In einer Konkretisierung von CPS wird vielerorts von cyberphysischen Produktionssystemen (CPPS) gesprochen.“ (Ittermann et al. 2015)

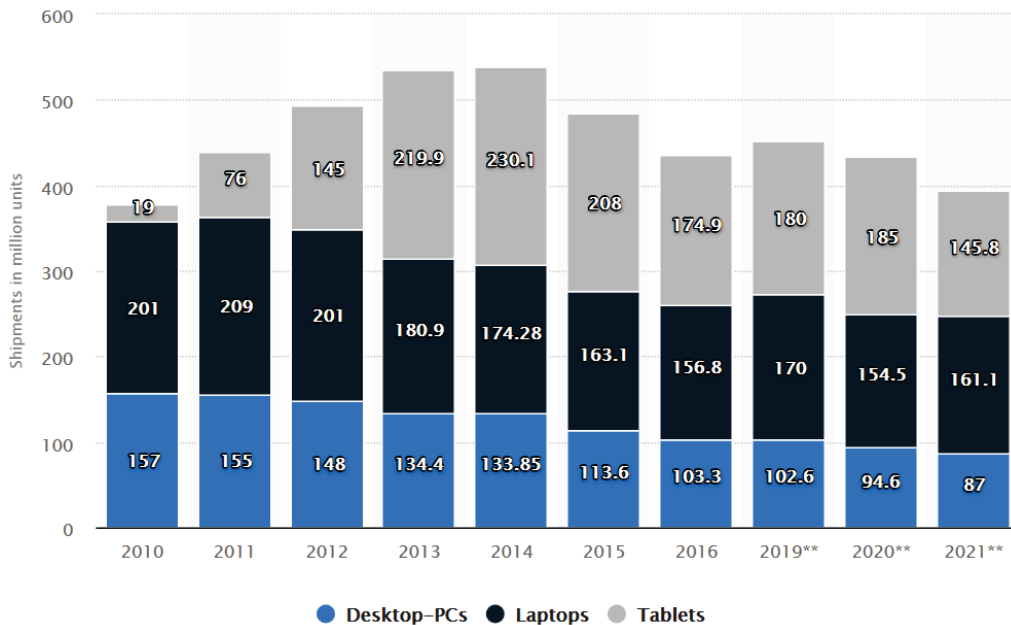
3. Marktentwicklungen im IKT Sektor

3.1. Personal Computer und Laptops

Der Absatz PCs und Notebooks entwickelte sich in den letzten Jahren rückläufig. Seit etwa 2011 weisen die jährlichen Verkaufszahlen der auf dem Weltmarkt abgesetzten PCs und Notebooks jedoch einen rückläufigen Trend auf. Im Zeitraum von 2011 bis 2015 sank der jährliche Absatz von PCs um fast 100 Millionen Stück. Abbildung 3-1 zeigt die rückläufige Entwicklung des weltweiten Absatzes für stationäre Desktop Computer, Mobile PCs (Notebooks) und Tablets. Der für das Jahr 2021 prognostizierte Absatz 87 Millionen Stück stationäre Desktop PCs liegt nur noch bei 56 Prozent des eine Dekade zuvor (2011) erzielten Absatzes. Eine ähnliche Tendenz zeigt sich bei Notebooks. Hier ist der Absatzrückgang nicht ganz so stark, liegt aber dennoch mit 161 Millionen Stück nur noch bei 77% des zehn Jahre zuvor erzielten Absatzes. Im Kontrast dazu wird im selben Jahr (2021) ein Absatz von bis zu 156 Millionen Stück Tablet Computern erwartet. Dieser Gerätetyp war erstmals gegen 2010 auf dem Massenmarkt anzutreffen und hatte bereits wenige Jahre danach (2014) seinen Zenit erreicht.

In Deutschland lag der Ausstattungsgrad von privaten Haushalten mit PCs im Jahr 2015 bei 86 Prozent (Statista 2016). Demnach werden Endgeräte wie PCs und Notebooks vom nahezu allen Computernutzern (99%) zum Surfen im Internet genutzt. 83% der Nutzer benutzen daneben auch das Smartphone bzw. Tablet-Computer als Internet Access Device. PCs und Notebooks sind nach wie vor die Gerätegruppen mit der größten Nutzungsintensität. Laut den Ergebnissen einer Umfrage in Deutschland (ebd.) verbringen durchschnittliche Internetnutzer an Werktagen etwa 3,25 Stunden am PC/Notebook im Internet. Die Computernutzung in der öffentlichen Verwaltung ist vorrangig durch die Verwendung von stationären Arbeitsplatzlösungen mit PCs geprägt. In Deutschland sind im öffentlichen Dienst ca. 4,6 Millionen Personen beschäftigt. Hiervon ist ein großer Teil der Beschäftigten an Computerarbeitsplätzen tätig (Statistisches Bundesamt 2013). Allerdings sind bei Arbeitsplatzcomputern durchaus Verdrängungseffekte durch den Einsatz von Thin Clients und Zero Clients möglich. Im gewerblichen Anwendungskontext werden PCs teilweise durch Thin Clients ersetzt. Trotzdem sich auch sich diesem Marktsegment in der letzten Zeit kein deutliches Wachstum gezeigt (IDC 2016a). Thin Clients werden auf absehbare Zeit wahrscheinlich weiter ein Nischenprodukt bleiben, wobei durch eine zunehmende Adaption von Desktop-as-a-Service-Lösungen zusätzliche Impulse für diese Gerätetypen geben können.

Abbildung 3-1: Trend des weltweiten Absatzes von PCs, Laptops und Tablets sowie Projektion der Absatzentwicklung bis 2021



Quelle: (Statista 2018d)

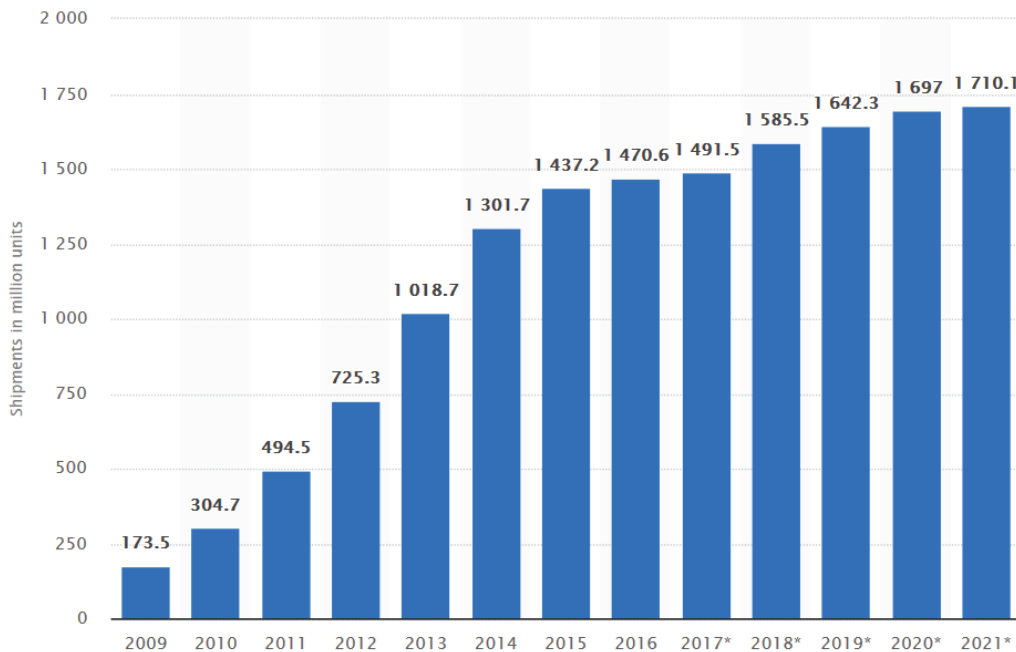
3.2. Smartphones und Wearable Devices

Die hauptsächliche Ursache für den Verdrängungsprozess stationärer und (konventioneller) mobiler IKT Endgeräte ist im Markterfolg der Smartphones zu suchen. Der Trend hin zur Nutzung leichter mobiler Endgeräte wird sich auch in den kommenden Jahren fortsetzen, wie Abbildung 3-2 verdeutlicht. Aus den beobachteten Markttrends lässt sich schlussfolgern, dass (zumindest im Marktsegment für private Konsumenten) die Bedeutung von stationären PCs und Notebooks zugunsten der mobilen Tablet und Smartphones weiter abnehmen wird. Allerdings wird das Marktsegment stationäre Desktop-PCs in absehbarer Zeit nicht weiter einbrechen oder gar verschwinden. Nach der gegenwärtigen Phase der Marktkorrektur ein etwas geschrumpfter aber relativ stabiler Markt erwartet. Notebooks werden auch zukünftig Veränderungen des Form-Faktors erleben wobei sogenannte Convertibles noch stark zulegen könnten zu Lasten der klassischen Tablets.

Die Abbildung 3-2 erklärt den Rückgang von PCs und Notebooks mit einem deutlichen Anstieg der erwarteten Verkaufszahlen bei Smartphones. Der Informationsdienst IDC erwartet im Jahr 2020 weltweit einen Absatz von rund 250 Millionen Desktop und Notebook PCs. Im Vergleich dazu wird im selben Jahr eine siebenfach höhere Anzahl an verkauften Smartphones erwartet. Die Nutzung von Smartphones nehmen in der ganzen Welt weiterhin rasant zu (Manhart et al. 2017). Während Smartphones bis 2007 nur einen sehr kleinen Nischenmarkt besetzten, wird geschätzt, dass im Jahr 2016 2,16 Milliarden Menschen ein Smartphone nutzten. Das bedeutet, dass 46,4% aller Mobiltelefonnutzer und 29% der Weltbevölkerung ein Smartphone nutzen (eMarketer 2014a). Vergleichbare Entwicklungen sind bei Tablets zu beobachten: Tablet-PCs wurden nur in Nischenmärkten verkauft und genutzt, eine Situation, die sich 2010 mit Apples iPad geändert hat. Heute wird geschätzt, dass 1,20 Milliarden Konsumenten oder 16% der Weltbevölkerung ein Tablet verwenden (eMarketer 2014b). Dieses rasante Wachstum führte (und verursacht immer noch) zu hohen Verkaufszahlen für beide Produktgruppen: Nach Angaben des Marktforschungsunternehmens IDC

wurden im Jahr 2015 weltweit 1,433 Milliarden Smartphones und 206,8 Millionen Tablets verkauft (IDC 2016b,) (IDCÉÉ). Die Internationale Energieagentur erwartet, dass bis 2020 weltweit fast 6 Milliarden Smartphones und mehr als 20 Milliarden online verbundene IoT-Geräte in Gebrauch sein werden (IEA 2017).

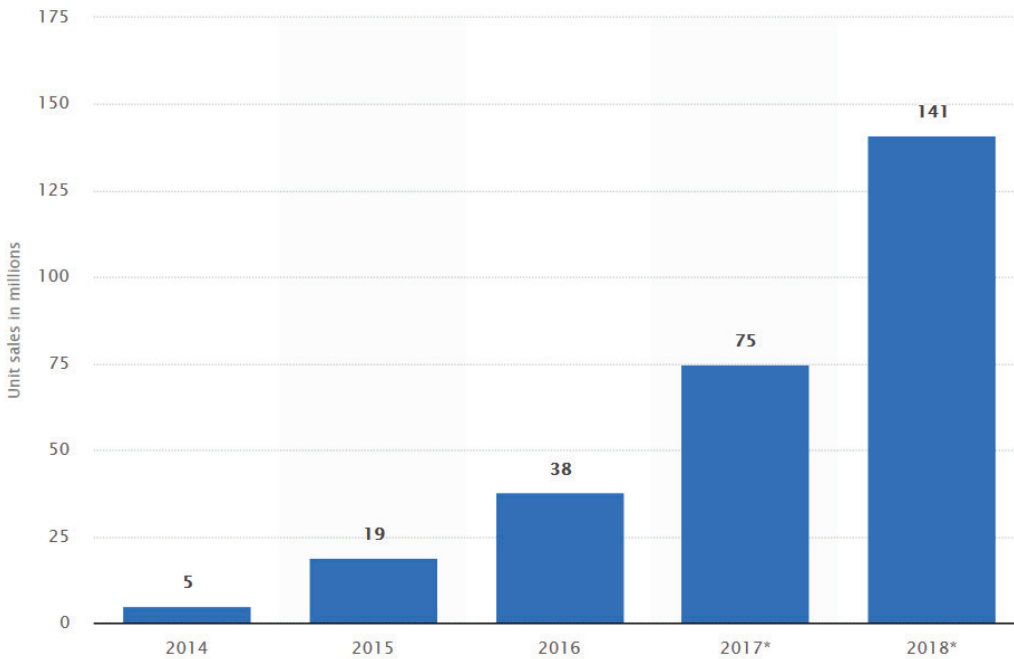
Abbildung 3-2: Trend des weltweiten Absatzes von Smartphones sowie Projektion der Absatzentwicklung bis 2021



Quelle: (Statista 2018a)

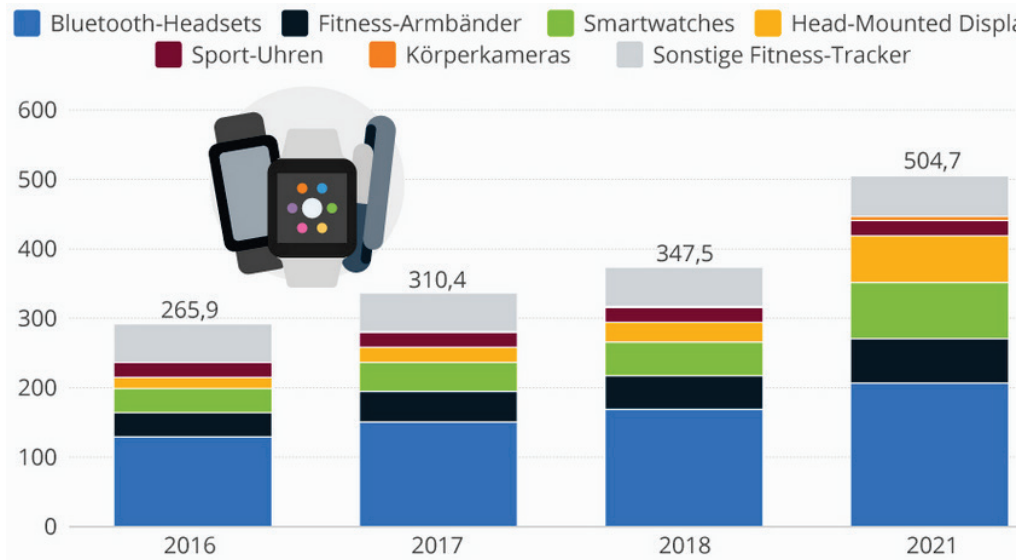
Deutliche Wachstumspotenziale im IKT Markt werden vor allem in den Marktsegmenten Wearable Devices sowie Smarte Textilien erwartet. Solche smarten Produkte zeichnen sich durch ihre kleine Bauform und drahtlose Vernetzung aus. Smartwatches beispielsweise werden vor allem als ständig verfügbare Ergänzung zum Smartphone genutzt aber werden nicht als gleichwertiger funktionaler Ersatz für letztere angesehen. Trotzdem wird für die kommenden Jahre ein deutlicher Zuwachs der weltweiten Verkaufszahlen für Smartwatches bzw. anderen wearable Produkttypen erwartet (Abbildung 3-3 und Abbildung 3-4). Dazu gehören alle möglichen Arten von tragbaren digitalen Geräten, die sich am Körper oder der Kleidung befestigen lassen. Allerdings entwickelt sich die Produktgruppe sehr heterogen, so dass sich verschiedene Projektionen zur künftigen Marktdurchdringung bei Wearables teilweise erheblich unterscheiden (vgl. Abbildung 3-4, Abbildung 3-5). Der erwartete Zuwachs in der Nutzung von Wearables schlägt sich auch im Anstieg des zu übertragenden Datenvolumens nieder. Weltweit wird der von Wearables generierte digitale Datenverkehr von geschätzten 68 Petabyte (Peta = 10^{15}) pro Monat im Jahr 2017 auf etwa 335 Petabyte pro Monat im Jahr 2020 zunehmen (Statista 2018e).

Abbildung 3-3: Trend der weltweiten Verkaufszahlen für Smartwatches



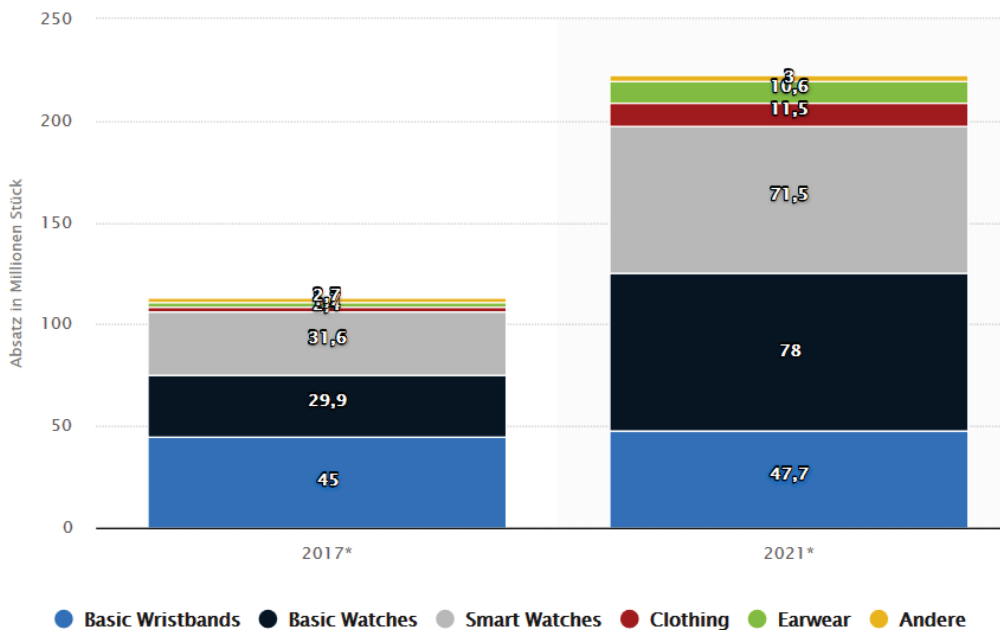
Quelle: (Statista 2018b)

Abbildung 3-4: Projektion des weltweiten Absatzes von Wearable Devices (in Millionen)



Quelle: (Brandt 2017)

Abbildung 3-5: Projektion des weltweiten Absatzes von Wearable Devices (in Millionen)

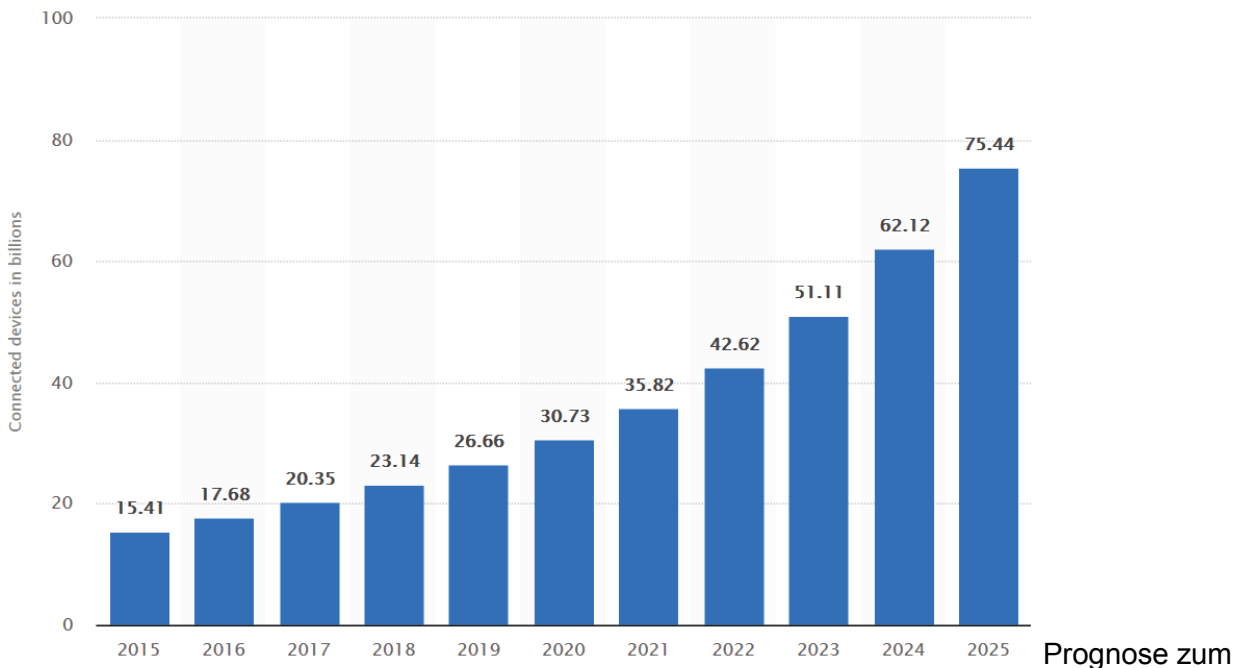


Quelle: (Statista 2018f)

3.3. Internet der Dinge

Zum Marktsegment Internet der Dinge bzw. Pervasive Computing werden vor allem die mit digitalen Funktionen erweiterten Alltagsgegenstände und Haushaltsgeräte gerechnet, aber auch Wearables, wie z.B. Smarte Textilien können zu dieser Kategorie gerechnet werden. Prinzipiell fallen darunter alle mit dem Internet verbundenen Geräte mit einer eigenen IP-Adresse. Dazu gehören auch smarte Thermostaten, smarte Rauchmelder wie auch vernetzte Haushaltgeräte, vernetzte Spielzeuge sowie Haushalt- und Serviceroboter. Die *International Federation of Robotics* (IFR 2017) schätzt, dass im Zeitraum von 2016 bis 2019 weltweit mehr als 42 Millionen privat genutzte Haushaltroboter verkauft werden. Dazu zählen z.B. Staubsaug- oder Rasenmäroboter. Die Industrie sieht im gesamten Marktsegment Internet der Dinge ein erhebliches Wachstumspotenzial für die kommenden Jahre. Abbildung 3-6 zeigt eine Trendprojektion für alle in diesem Bereich subsumierten Technologiesegmente. Aufgrund der außerordentlichen Heterogenität der physischen Erscheinungsformen von IoT oder Pervasive Computing Produkten lässt sich keine sinnvolle Aussage zur Marktentwicklung in Absatzzahlen und den daraus resultierenden Stoffströmen herleiten. Als gemeinsames Merkmal der IoT Produkte lässt sich jedoch das im Internet übertragene Datenvolumen dieser Produkte feststellen. Vor allem diese Entwicklung hin zur Maschine-zu-Maschine Kommunikation im Internet der Dinge geht einher mit einem markanten Zuwachs der übertragenen Datenmengen.

Abbildung 3-6: Anzahl der weltweit installierten Internet of Things Geräte (in Milliarden)



Volumen der jährlich generierten digitalen Datenmenge

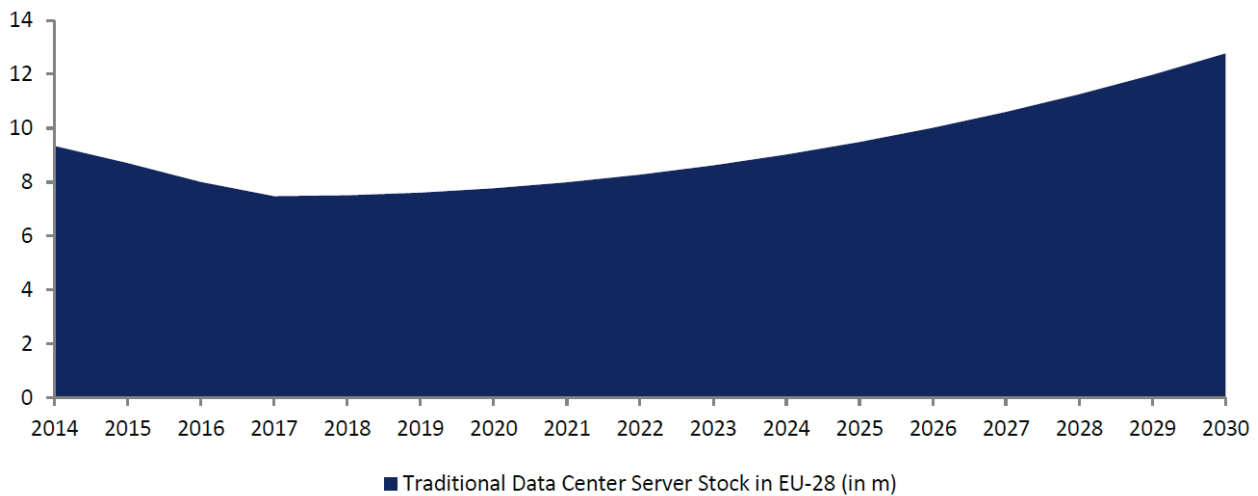
Quelle: (Statista 2018c)

3.4. Server und Speichersysteme

Die Datenverarbeitung in Rechenzentren erfolgt durch sogenannte *Server*. Server sind spezielle Computer, die in der Regel in Schränken (*Racks*) angeordnet und mit dem Datennetz verbunden sind. Neben Speichersystemen (*Storage*) und den Netzwerkgeräten stellen Server den funktionellen Kern eines Rechenzentrums dar. Die Marktentwicklung von Servern kann daher stellvertretend für die Entwicklung der Rechenzentren heran gezogen werden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass Server, genau wie fast alle anderen IKT-Komponenten, mit jeder Generation leistungsfähiger werden. Weshalb die reine Anzahl an Servern nur indirekt mit der Rechenleistung und der verarbeiteten Datenmenge zusammen hängen.

In der Untersuchung zur Entwicklung von Ökodesign-Anforderungen für Server (Berwald et al. 2015) werden die Verkaufszahlen von Servern weltweit und in Europa untersucht. Im Jahr 2013 wurden weltweit rund 8,7 Millionen Server verkauft, wovon ca. 20% nach oder innerhalb Europas verkauft wurden und der Rest in anderen Teilen der Welt. Ausgehend von den verschiedenen Server-Bauformen, deren Marktentwicklung und deren technischen Lebensdauer wird für Europa (EU-28) ein jährlicher Bestand an installierten Servern berechnet und eine Prognose bis zum Jahr 2030 vorgenommen (siehe Abbildung 3-7). Danach steigt der Bestand an installierten Servern in Europa ausgehend von 9,3 Millionen Stück im Jahr 2014 auf 12,8 Millionen im Jahr 2030. Die Studie weist darauf hin, dass die zukünftigen Server in ihrer Funktionalität nicht mit denen aus dem Jahr 2013 vergleichbar sind. Als weltweite Bestandszahl an Servern zitiert die Studie von Berwald et al. 2015 einen Report des Marktforschungsinstituts Gartner und nennt eine weltweite Anzahl von rund 42 Millionen Stück im Jahr 2013.

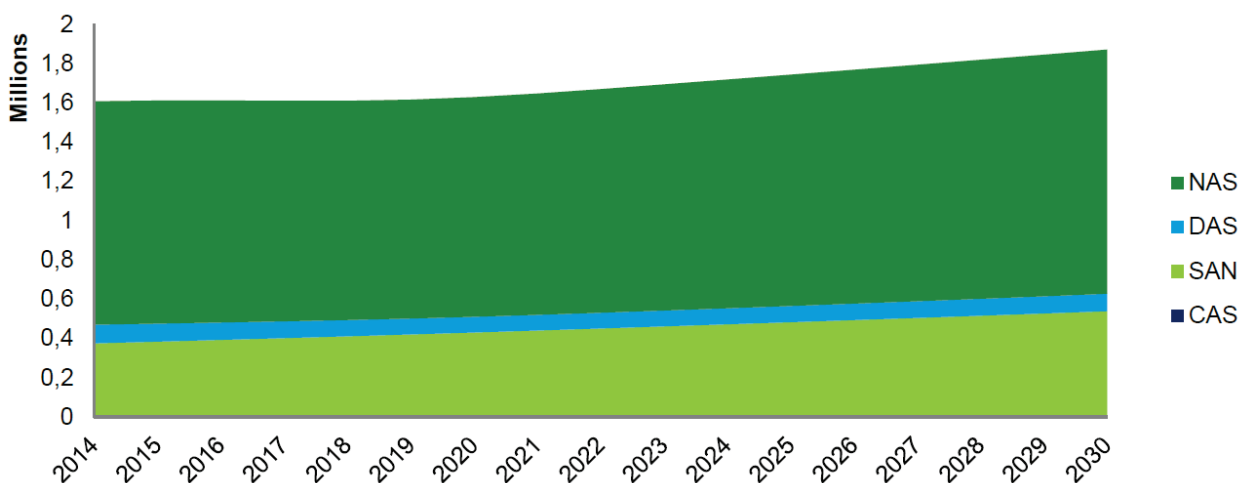
Abbildung 3-7: Prognose zum Bestand installierter Server in Europa (EU-28)



Quelle: Berwald et al. 2015

Eine vergleichbare Berechnung stellt die Ökodesign-Vorstudie von Berwald et al. 2015 für den Bestand an Unternehmens Speichersystemen (Storage) an. Ausgehend von einem Bestand an 1,6 Millionen Speichersystemen, steigt der Bestand in Europa (EU-28) im Jahr 2030 auf insgesamt 1,9 Millionen Einheiten. Dabei wird in die unterschiedlichen Systeme Network Attached Storage (NAS), Direct Attached Storage (DAS), Storage Area Network (SAN) und Content-Addressed Storage (CAS) unterschieden. Nicht unterschieden wird in der Darstellung dagegen in den Typ des Speichersystems (rotierende Festplatte oder Halbleiterspeicher) sowie in die Größe des Systems, d.h. Speicherkapazität.

Abbildung 3-8: Prognose zum Bestand installierter Speichersysteme in Europa (EU-28)



Quelle: Berwald et al. 2015

Rückblickend auf die Jahre 2009 bis 2013 nennt die o.g. Studie den Umsatz, verkaufte Stückzahlen und Kapazität von externen Speichersystemen (siehe Abbildung 3-9). Ein durchschnittliches Speichersystem im Jahr 2009 wies dabei eine Kapazität von 8,5 Terabyte (Tera = 10^{12}) auf und

erreichte im Jahr 2013 eine durchschnittliche Kapazität von 22,6 Terabyte. Die gesamte Speicherkapazität der verkauften Systeme stieg in Europa von rund 1,9 Exabyte (Exa = 10¹⁸) im Jahr 2009 auf rund 5,1 Exabyte im Jahr 2013. Dies entspricht einer durchschnittlichen jährlichen Kapazitätssteigerung von 22 Prozent.

Abbildung 3-9: Umsatz, Stückzahlen und Kapazität von externen Speichersystemen in Europa (EU-28) von 2009 bis 2013

	2009	2010	2011	2012	2013
Revenue (million USD)	3 618	4 124	4 521	4 576	4 591
Revenue year-to-year Change %		14.0%	9.6%	1.2%	0.3%
Shipments	216 005	282 510	260 722	238 018	223 419
Shipments year-to-year Change %		30.8%	-7.7%	-8.7%	-6.1%
Capacity (PB)	1 834	2 794	3 584	3 946	5 056
Capacity year-to-year Change %		52.3%	28.3%	10.1%	28.1%

Quelle: Berwald et al. 2015

3.5. Fazit aus der Literaturrecherche zu Markttrends

Aus den öffentlich verfügbaren Informationen über Marktanalysen und Trendprojektionen im IKT Bereich lässt sich ableiten, dass bei den Marktteilnehmern ein hohes Erwartungspotenzial hinsichtlich der möglichen Wachstumspotenziale vorherrscht. Obwohl die klassischen IKT Marktsegmente (Personal Computer und Laptops) eine gewisse Marktsättigung aufweisen und die Absatzzahlen weltweit stagnieren, liegen hohe Erwartungen an die Marktchancen auf neuen digitalen Technologien und Geschäftsmodelle. Dies wird insbesondere bei den erwarteten hohen Absatzzahlen von vernetzten elektronischen Kleingeräten deutlich, die neue Geschäftsfelder eröffnen sollen.

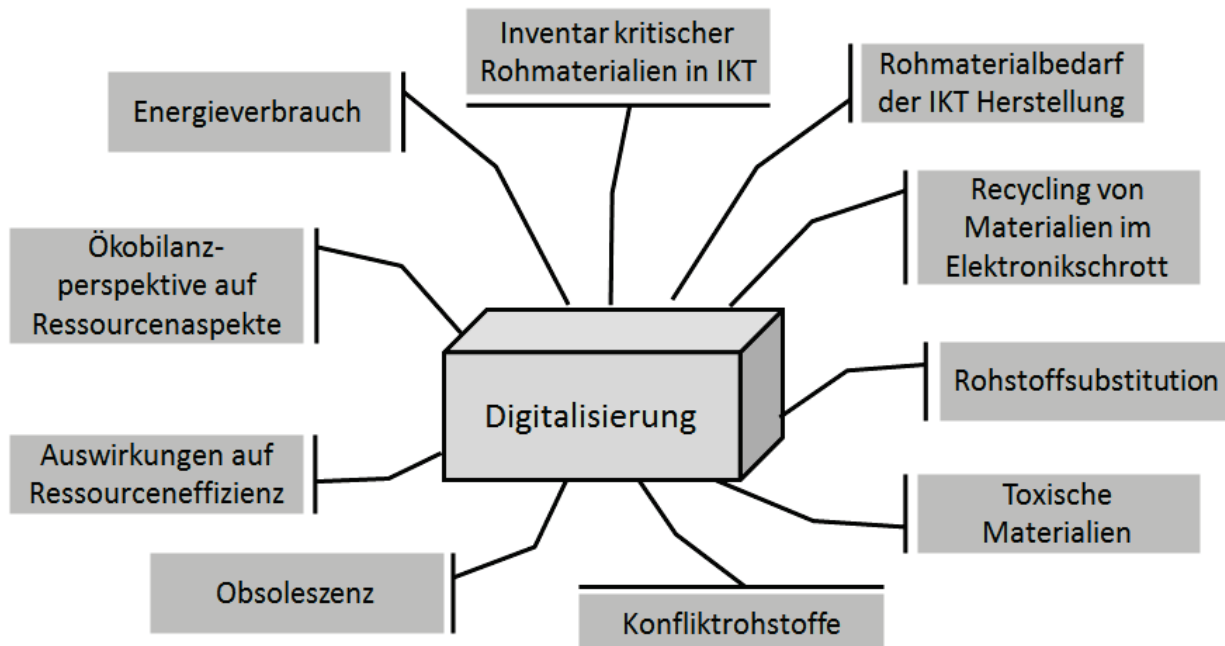
Allerdings reicht die verfügbare Datengrundlage zu den globalen Absatzzahlen für IKT Geräte und Dienstleistungen nicht für eine konkrete Abschätzung der in IKT Produkten gebundenen stofflichen und energetischen Ressourcen aus. Die für diesen Zweck erforderliche Differenzierung nach diskreten Produkttypen und deren physischen Eigenschaften ist aus den vorliegenden Datenquellen nicht ableitbar. Des Weiteren mangeln die meisten Marktstudien einer transparenten Erläuterung von Datenquellen und Methode. Solche Metainformationen sind für eine Umrechnung von marktbezogenen Informationen auf stoffstrombezogene Informationen der physischen Digitaltechnologie unerlässlich. Ein weiteres Hindernis für die konkrete Berechnung der Ressourcenaspekte der digitalen Technologien ist die relative Unzugänglichkeit von proprietären Marktstudien für die öffentlich finanzierte Forschung. Die hohen Kosten dieser Datenquellen zu den Absatzzahlen der verschiedenen IKT Produktkategorien behindert eine Gesamtabschätzung des globalen Rohstoffbedarfs selbst in Fällen, da deren Materialzusammensetzung bekannt ist.

Zusammenfassend bleibt festzustellen, dass sich eine Abschätzung des globalen Ressourcenverbrauchs der Digitalisierung mittels Massebilanzansatz auf Basis der vorliegenden Daten und Prognosen zu Absatzzahlen von IKT Geräten allenfalls punktuell bewerkstelligen lässt.

4. Ressourcenaspekte digitaler Technologien und Anwendungen

Die Ressourcenaspekte digitaler Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT) werden in der ausgewerteten Literatur von zahlreichen unterschiedlichen Perspektiven thematisiert. In der Regel beziehen sich die jeweiligen Studien nur auf bestimmte Teilaspekte der Digitalisierung, wobei häufig digitale Produkte und Technologien im Zentrum der Betrachtung stehen und seltener die mit deren Hilfe erbrachten Dienste.

Abbildung 4-1: Auswahl typischer Perspektiven auf Ressourcenaspekte von IKT in der Literatur



Quelle: eigene Darstellung

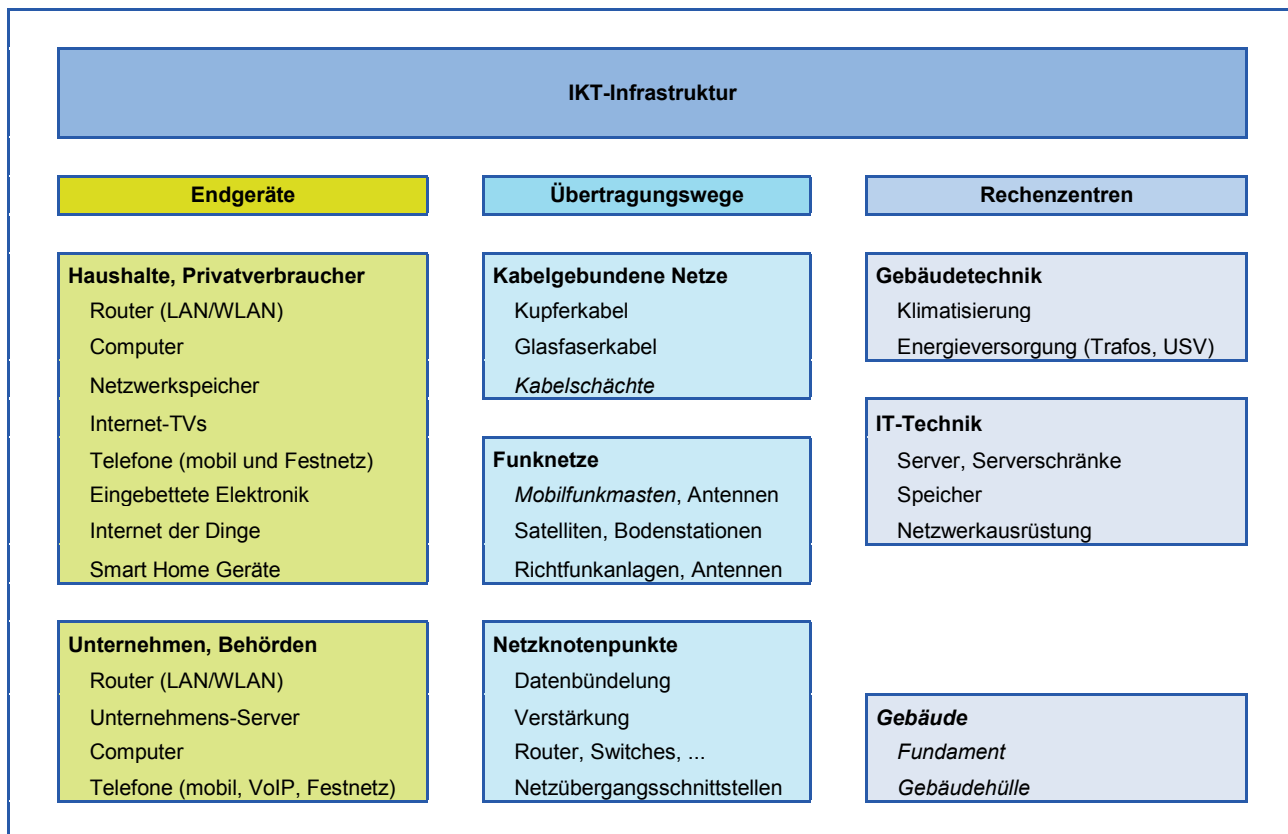
Eine Übersicht über den globalen Bedarfs an Energie und Ressourcen der Digitalisierung und eine Abschätzung der weiteren Entwicklung des Ressourcenbedarfs ist jedoch aus keiner der berücksichtigten Literaturquellen ersichtlich. Die meisten vorliegenden Untersuchungen der Ressourcenrelevanz digitaler Technologien beziehen sich auf den Verbrauch energetischer Ressourcen oder auf eine Auswahl als (versorgungs-)kritischer Rohstoffe (insbesondere Edelmetalle und Seltene Erden Elemente (SEE)). Zudem haben nahezu alle verfügbaren Studien hinsichtlich ihres technologischen Betrachtungsrahmens eine rückwärts gerichtete Perspektive, das heißt sie betrachten die stofflichen und energetischen Aspekte vergangener Technologiegenerationen. Dies trifft insbesondere auf Studien zu, welche die Ressourcenaspekte von Elektronikschrott (WEEE) bzw. deren Recycling thematisieren. Generell ist festzustellen, dass auch Studien zu aktuellen Technologiegenerationen (bezogen auf den Veröffentlichungszeitpunkt) zumeist mit Datengrundlagen zu bereits veralteten oder gar obsoleten IKT Generationen erstellt wurden. Davon betroffen sind vor allem ökobilanzielle Studien, die zumeist auf Daten aus generischen Inventardatenbanken zurückgreifen.

Vorwärtsschauende Studien zur technologischen Innovation im IKT Sektor beziehen die Auswirkungen auf den Ressourcenbedarf kaum in Betracht. Es konnte im Rahmen des Literaturscreening keine Studie identifiziert werden, die ein umfassendes Bild zum Rohstoffbedarf heutiger und künf-

tiger Digitaltechnik ermöglicht. Hochrechnungen auf den globalen Ressourcenbedarf und Extrapolationen zukünftiger Entwicklungen sind deshalb allenfalls punktuell vorhanden und lassen keine verallgemeinernden Rückschlüsse zu. Aus diesen Gründen sind die im Folgenden präsentierten Zusammenfassungen der Ergebnisse ausgewählter Studien lediglich als Schnappschüsse zum Kenntnisstand über Ressourcenaspekte der IKT zu verstehen.

Die Gliederung in den nachfolgenden Kapiteln erfolgt entsprechend der Systematik, die für die IKT-Infrastruktur bei (Trapp et al. 2017) verwendet wird. In dieser Studie im Auftrag des Umweltbundesamtes wird der Ressourcenaufwand für die IKT-Infrastruktur für Deutschland abgeschätzt. Es erfolgt dazu eine Unterteilung in *Endgeräte*, *Übertragungswege* und *Rechenzentren*, die in der nachfolgenden Kapitelstruktur sinngemäß übernommen wird. Abbildung 4-2 zeigt die weitere Untergliederung der IKT-Infrastruktur in IKT-Geräte, Gebäudetechnik und Bauwerke. Die Bauwerke (Kabelschächte, Mobilfunkmasten, Gebäude) sind im engeren Sinn keine IKT-Technik und werden in der hier vorliegenden Untersuchung nicht weiter betrachtet.

Abbildung 4-2: Untergliederung der IKT-Infrastruktur in Geräte und Bauwerke



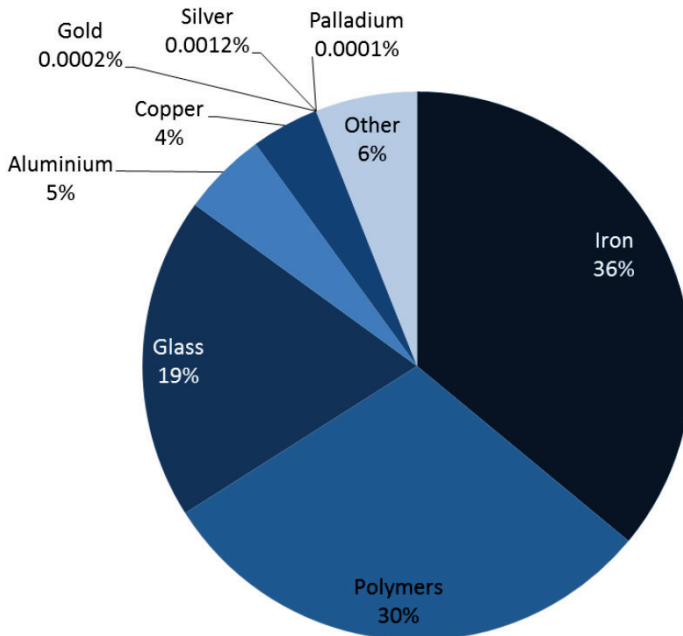
Quelle: geänderte Darstellung auf Grundlage von (Trapp et al. 2017)

4.1. In digitalen Endgeräten gebundene Ressourcen

Die Hardware der Informations- und Kommunikationstechnologien steht als stoffliche Manifestation der Digitalisierung im Zentrum der überwiegenden Anzahl von Studien, welche die Ressourcenaspekte der Digitalisierung thematisieren. Geräte zum Speichern, Übertragen und Verarbeiten von digitalen Informationen zeichnen sich durch eine komplexe stoffliche Zusammensetzung metallischer und nichtmetallischer Materialien aus. Wäger et al. 2015 geben die durchschnittliche Materialzusammensetzung eines im Elektronikschrott (Referenzjahr: 2010) zu findenden IKT-Endgeräts

wie folgt an: Stahl bzw. Eisen (Fe), Aluminium (Al) und Kupfer (Cu), Polymere (hauptsächlich ABS, PC, PC / ABS, PE, PS und SAN1) und Glas (siehe Abbildung 4-3).

Abbildung 4-3: Relative Massenverteilung der in Elektronikschrott (IKT-Geräte) enthaltenen Materialien



Quelle: (Wäger et al. 2015)

Zeitgenössische elektronische High-Tech-Produkte sind in hohem Maße von kritischen Rohstoffen abhängig geworden. Insbesondere digitale IKT enthält eine Vielzahl von Spezial- und Edelmetallen (Hagelüken und Meskers 2010). Leiterplatten, auf denen Mikrochips montiert sind, enthalten Metalle wie Kupfer, Silber und Gold. Die Metalle dienen als elektrische Verbindungen und wärmeverteilende Kontaktstrukturen zum Korrosionsschutz. Kleine Kondensatoren enthalten das knappe Metall Tantal. Ferritkerne von Hochfrequenzspulen können oxydische Verbindungen von Seltenerden-Elementen (SEE) enthalten. Obwohl viele dieser knappen Elemente pro Gerät nur in winzigen Mengen enthalten sind, spielen sie für die Funktion digitaler Hardware eine unverzichtbare Rolle. Beispielsweise bestehen Transistoren, die Grundbausteine der heutigen Silizium-basierten Mikroelektronik, aus kristallinem Silizium, das winzigen Mengen (zwischen 0,1 bis 100 ppm) an Dotierungselementen enthält (Aluminium, Bor und Gallium; sogenannte Akzeptoratome für p-Typ-Halbleiter) und Antimon, Arsen und Phosphor (Donoratome für n-Typ-Halbleiter)). Optoelektronische Bauelemente wie Leuchtdioden (LEDs), Mikrowellengeneratoren und Dünnschichtsolarzellen verwenden dotiertes Galliumarsenid (GaAs) als Substratmaterial. Dotierelemente sind wesentlich, um die gewünschte Funktion für solche Komponenten zu erreichen. Gemeinsame Dotierungselemente für GaAs sind:

- Cadmium, Magnesium, Silizium und Zink (Akzeptoratome für p-Halbleiter)
- Selen, Silizium, Schwefel und Tellur (Donoratome für n-Halbleiter)

Optische Glasfaserdatenleitungen sind mit seltenen Erden wie Dysprosium, Erbium, Neodym, Praseodym, Thulium und Ytterbium dotiert (Bass 2010). Tabelle 4-1 gibt einen Überblick über die Ein-

satzgebiete von Seltene-Erden-Elementen³ im elektronischen und elektrischen Sektor. Viele funktionelle Elektronikkomponenten, die in Tabelle 4-1 genannt werden, spielen in digitalen Infrastrukturen eine wesentliche Rolle (z. B. Rechenzentren und optische Glasfasernetze im Internet).

Tabelle 4-1: Anwendungen von Seltene-Erden-Elementen in elektronischer Hardware

Scandium (Sc)	Gasentladungslampen, Hochleistungs-Aluminium-Scandium-Legierungen
Yttrium (Y)	Leuchtstoffe in Kathodenstrahlröhren (CRT), Sauerstoffsensoren in Autoabgassystemen, YAG-Laser, Komponenten von Oxid-Supraleitermaterialien
Lanthanum (La)	Optische Linsen in digitalen Kameras, Glas mit hohem Brechungsindex für optische Fasern, anodisches Material in Nickel-Metallhydrid-Batterien.
Cerium (Ce)	Bestandteil von Leuchtstoffen in TV- und Computerbildschirmen und Leuchtstofflampen.
Praseodymium (Pr)	Permanentmagnete, Optoelektronik: optischer Schalter, optischer Verstärker
Neodymium (Nd)	Permanentmagnete für Elektromotoren und -generatoren, Mikrofone, Lautsprecher, Festplatten, Keramik Kondensator (dielektrische Schicht), Nd-YAG-Festkörperlaser
Promethium (Pm)	Beta-strahlungsquelle (verwendet in Nuklearbatterien)
Samarium (Sm)	Permanentmagnete, Festkörperlaser, Infrarotlicht absorbierendes optisches Glas
Europium (Eu)	Bestandteil von Leuchtstoffen in TV- und Computerbildschirmen, Triphosphors in Leuchtstofflampen, Dotierung in Leuchtstoffen für weiße LED
Gadolinium (Gd)	Permanentmagnete, magnetoptische Filme, Mikrowellentechnologie, grüne Leuchtstoffe für CRT- und Radarbildschirmen, wiederbeschreibbare CD-RW
Terbium (Tb)	Festkörpervorrichtungen, z.B. Kristallstabilisator von Brennstoffzellen, Sensoren, Flachbildschirm-lautsprecher, grüne Leuchtstoffe in Leuchtstoffen und LEDs
Dysprosium (Dy)	Permanentmagnete, Lasermaterialien, Festplatten, Antriebsmotoren für Hybridfahrzeuge
Holmium (Ho)	Festkörperlaser, Mikrowellengeräte, optische Glasfasern
Erbium (Er)	Optoelektronik: optische Glasfasern, Erbium-dotierte Faserverstärker, Faserlaser
Thulium (Tm)	YAG-Laserstäbe, Hochtemperatursupraleiter, keramische magnetische Materialien
Ytterbium (Yb)	optische Fasern, Festkörperlaser

Quelle: (Köhler 2013b)

Die weltweite Nachfrage nach diesen Elementen nimmt aufgrund der typischen Massenproduktion von High-Tech-Produkten rapide zu. Das Prinzip der „Economy-of-Scale“, das den Hightech-Sektor bestimmt, stimuliert den Massenkonsum von elektrischen und elektronischen Produkten. Gleichzeitig wächst die Marktgröße aufgrund des Bevölkerungswachstums und des wirtschaftlichen Aufschwungs in Schwellenländern (z. B. Indien, China und Brasilien). So haben beispielsweise das rasante Wachstum des Mobilfunksektors und die weit verbreitete Verbreitung von Smartphones und Tablets im Konsumentenmarkt zu einer weltweit wachsenden Nachfrage nach solchen Elementen geführt (Soneji 2009). Gegenwärtige Innovationstrends im Hightech-Sektor treiben die

³ d.h. Elemente der Lanthanidengruppe im Periodensystem der Elemente

Nachfrage nach Technologiemetallen weiter voran. Infolgedessen steigt der Wettbewerb um diese kritischen Elemente unter den verschiedenen neuen Technologien (Angerer et al. 2009).

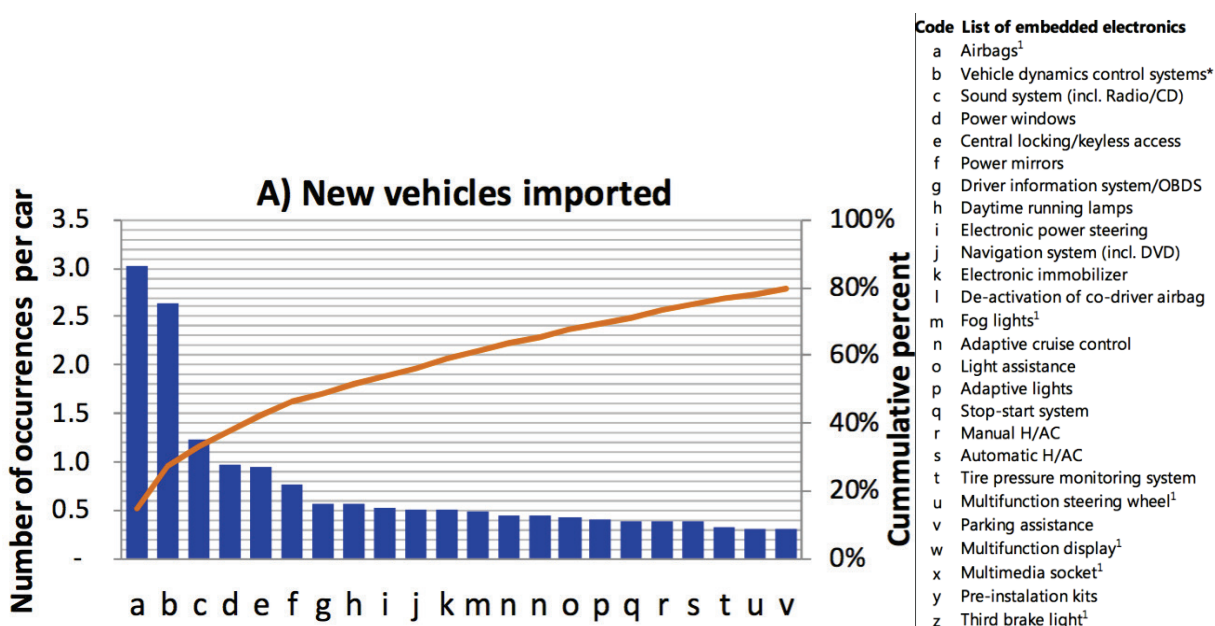
4.1.1.1. Eingebettete Elektronik

Automobilelektronik

Moderne Automobile stellen weltweit ein relevantes Anwendungsgebiet für eingebettete Elektronik dar. Obwohl nicht alle elektronischen Steuerungskomponenten in Fahrzeugen auf digitaler Technik beruhen (einige periphere Module enthalten analoge Komponenten), steigt das Ausmaß der Digitalisierung im Automobilbereich stetig. Im Durchschnitt machen die in Automobile eingebetteten elektronischen Steuerungskomponenten etwa 30% der gesamten Fahrzeugkosten aus. Dieser Kostenanteil wird bis 2030 voraussichtlich auf bis zu 50% steigen (Restrepo et al. 2017). Eingebettete elektronische Komponenten bestehen vor allem aus Leiterplatten mit mikroelektronischen Schaltkreisen, welche typischerweise eine Anzahl kritischer Materialien enthalten.

Eine Materialflussanalyse der Automobilelektronik des gesamten Pkw-Bestands der Schweiz zeigte, dass der in der Studie berücksichtigte Fahrzeugbestand (etwa 4 Millionen PKW) Material in einer Gesamtmasse von etwa 6,1 Mt enthält (ebd.). Es zeigte sich eine direkte Korrelation zwischen dem Herstellungszeitpunkt der Fahrzeuge und der Anzahl der eingebetteten elektronische Kontrollsystemen: Je jünger das Fahrzeug ist, desto höher ist die Anzahl der Elektronikkomponenten und damit verbundener Sensoren und Aktuatoren. Ein Großteil dieser Aktuatoren (dabei handelt es sich i.d.R. um kleine Gleichstrommotoren mit starken Permanentmagneten) kann nur deshalb sinnvoll im Fahrzeug eingesetzt werden, weil digitale Steuerelektronik ihnen einen Anwendungszweck verschafft. Als Enabling Technologie induziert die Digitalisierung in diesem Beispiel also weiteren Technikeinsatz, welcher ebenfalls Ressourcen benötigt. Nach Einschätzung von Restrepo et al. (2017) wird erwartet, dass in den kommenden Jahren die in Fahrzeugelektronik verwendeten Mengen an kritischen Materialien (KM) dramatisch ansteigen werden.

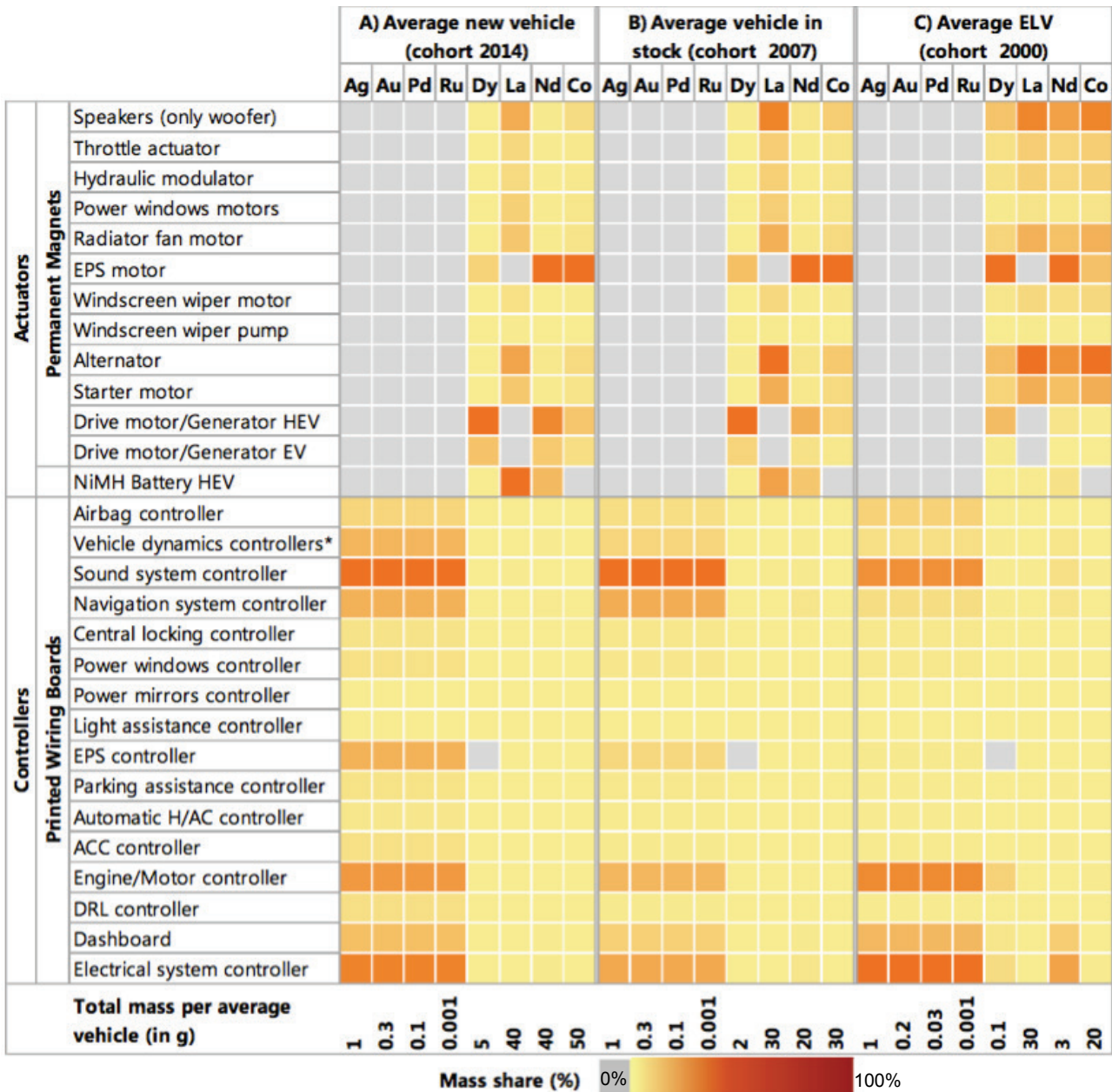
Abbildung 4-4: **Stuerelektronik in PKW (2014 von der Schweiz importiert)**



Quelle: Restrepo et al. 2017

Die Verteilung der kritischen Ressourcen in diesen elektronischen Steuerungskomponenten hängt von der Art der Hardware ab. Seltene Erde Elemente (SEE) finden sich vor allem in nicht-digitalen Komponenten wie Motoren und Lautsprechern. Die größten Mengen für SEE-Masse in Neufahrzeugen sind eingebettete elektronisch gesteuerte Aktuatormotoren und Generatoren. Gold, Silber und Platinmetalle sind vorrangig im Bordnetzcontroller (Sicherungskasten), der Soundsystem-Controller (Radio), der Navigationssystem-Controller und der Motor- / Motorcontrollern enthalten. Diese Materialkonzentration ähnelt sich bei den meisten PKW unabhängig vom Typ.

Abbildung 4-5: Vorkommen ausgewählter kritischer Materialien in PKW-Elektronik*



Quelle: Restrepo et al. 2017 (* Angaben bezogen auf 2014 von der Schweiz importierte Fahrzeuge)

Die Gesamtmasse der kritischen Metalle in Neufahrzeugen (2014) ist mehr als fünffach so hoch als bei Altfahrzeugen (ELV). In allen pro Jahr in die Schweiz importierten Neufahrzeugen sind beispielsweise 25 t SEE enthalten während in Altfahrzeugen pro Jahr nur 3 t anfallen. Ungefähr die Hälfte des

Massenzuwachses resultiert aus der 3-fach größeren Anzahl von neu importierten Fahrzeugen (im Vergleich zu Altfahrzeugen), während die andere Hälfte auf eine höhere Masse an kritischen Metallen in neuen Fahrzeugen zurückzuführen ist. Es ist daher zu erwarten, dass sich die Menge an kritischen Metallen in Altfahrzeugen in den kommenden 15 bis 20 Jahren um den Faktor 2 erhöhen wird.

Tabelle 4-2: Masse kritischer Metalle in der Fahrzeugelektronik eines durchschnittlichen Fahrzeugs aus dem Jahr 2014

Element	Median der Masse pro KFZ in g	Gesamtmasse in allen weltweit in 2014 hergestellten KFZ in t
Dysprosium	5	338.910
Lantan	40	2.711.281
Neodymium	36	2.440.153
Kobalt	50	3.389.102
Palladium	0,04	2.711
Ruthenium	0,0007	47
Silber	0,7	47.447
Gold	0,2	13.556

Quelle: Restrepo et al. 2017, Supporting information Quelle: Eigene Hochrechnung auf Basis von (OICA, 2017)

Tabelle 4-2 zeigt eine Hochrechnung der von (Restrepo et al. 2017) ermittelten Mengen an kritischer Metalle pro KFZ auf die weltweite Anzahl in 2014 hergestellter Passagierfahrzeuge (67,7 Mio. Stück) (OICA 2017). In dieser Abschätzung wurde allerdings eine mögliche Transition der gegenwärtigen PKW-Technologie mit Verbrennungsmotoren zu computergesteuerten Elektrofahrzeugen noch nicht berücksichtigt. Zukünftige selbstfahrende Fahrzeuge würden wesentlich mit leistungsfähigeren digitalen Steuerungssystemen ausgestattet sein als heutige PKW. Dadurch wird sich die Menge an KM pro PKW deutlich erhöhen.

RFID-Technologie

RFID (englisch: radio-frequency identification) ist eine Technologie zum automatischen und berührungslosen Identifizieren von Objekten mittels elektromagnetischer Koppelung. RFID wird als Basistechnologie im Zusammenhang mit sogenannten ‚Cyber-Physical Systems‘ beschrieben. Diese ermöglichen eine Verschmelzung der virtuellen Welt (Informationssysteme) mit der realen Welt der materiellen Dinge. Die RFID Technologie dient primär der berührungslosen Identifikation von Objekten (z.B. Verpackungen) bei der Herstellung oder während der Vertriebsphase. Darin liegt ein Effizienzsteigerungspotenzial durch Automatisierung von Prozessen (Buchert et al. 2015).

Die RFID Technologie besteht im Wesentlichen aus 2 Komponenten, einerseits der passiven Transponder-Einheit (genannt: *Tag*), die ohne Batterie auskommt, und andererseits aus dem aktiven Lesegerät, welches vom Tag berührungslos Daten auslesen (oder auch schreiben) kann. Die RFID Sender-Empfänger-Systeme zeichnen sich dadurch aus, dass die zur Identifizierung verwendete passive Komponente (das RFID-Tag) ohne permanente Energiezufuhr auskommt und

dadurch sehr stark miniaturisiert werden kann. Das ermöglicht die unauffällige Unterbringung der RFID-Tags in kleinstem Volumen, zum Beispiel in Etiketten auf Verpackungen oder in Textilien. Bei Annäherung eines (oder mehrerer) Tags an ein Lesegerät werden die Tags zeitweise aktiviert und übertragen eine elektronische Identifikationsnummer (ID) gemäß eines standardisierten Datenaustauschprotokolls. Diese ID-Nummer kann mit einer externen Datenbank abgeglichen werden um weiterführende Beschreibungen über das mit dem RFID Tag verbundene Objekt zu erhalten. Damit lassen sich Objekte wie Werkstücke, Produkte, oder Abfallmaterialien schnell und automatisiert erfassen sowie charakterisieren. Die Technologie ermöglicht damit massive Steigerungen der Effizienz in Logistikprozessen entlang der Wertschöpfungskette sowie bei Abfallbehandlungsprozessen.

Die technischen Varianten der RFID Systeme unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Materialzusammensetzung und Energieverbrauch in der Betriebsphase deutlich voneinander. Ein Transponder besteht im Wesentlichen nur aus einem Mikrochip und einer winzigen metallischen Antenne.

Es gibt zahlreiche technischen Varianten von Transpondern, die sich hinsichtlich der Bauformen und Größe der Antennen, der Chips und der Art des Trägermaterials unterscheiden (Erdmann et al. 2009). Je nach Frequenzbereich der Funkwellen⁴ unterscheidet sich die Bauform und Größe der Antennen, der Chips und die Art des Trägermaterials. Außerdem entscheiden die jeweiligen Anwendungsgebiete der RFID Tags über die Größe und Bauform (robust oder Leichtgewicht) der Tags. Die Größe der Lesegeräte hingegen wird von der gewünschten Reichweite/Geometrie des Auslesebereichs sowie der erforderlichen Mobilität bzw. Integration in die Infrastruktur der Umgebung bestimmt.

Die materielle Beschaffenheit der Transponder richtet sich nach den funktionalen Anforderungen des jeweiligen Anwendungszwecks. Die auf dem Markt existierenden Transpondertypen unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Größe und Leistungsfähigkeit erheblich voneinander. Kommerzielle RFID-Typen decken ein weites Spektrum technisch und ökonomisch sinnvoller Materialzusammensetzungen ab. So existieren zwar zahlreiche Varianten zur Substitution der Antennenmaterialien (z.B. Aluminium statt Kupfer) aber die jeweils erforderlichen funktionellen Eigenschaften der RFID Transponder lassen in der Regel keine große Designfreiheit hinsichtlich Materialauswahl. Bei Anwendungen für den Massenmarkt ist außerdem die Optimierung der Transponderpreise ein kritischer Erfolgsfaktor für die kommerzielle Tragfähigkeit der jeweiligen RFID Systeme. Bei RFID-Transpondern für die Kennzeichnung der Verpackungen von Einzelhandelsgütern werden die Hersteller deshalb in der Regel ein technologisch mögliches Minimum an Material- und Herstellungskosten anstreben. Dies bedeutet, dass solche Transpondertypen (Smart Labels) im gegenwärtigen Umfeld technologischer Möglichkeiten nur ein sehr geringes Potenzial zur Materialeinsparung aufweisen.

Marktübliche RFID Transponder enthalten gedruckte oder geätzte Kupfer-basierte Antennen auf Polymer- oder Papiersubstraten. Kostengünstige aber weniger robuste Varianten enthalten Aluminium als Antennenmaterial. Hingegen werden hochwertige Transponder mit silberhaltigem Antennenmaterial hergestellt. In diesem Fall werden die Antennen mit Hilfe additiver Herstellungsverfahren (Drucktechnologien) auf ein Polymersubstrat gedruckt. Dies geschieht mittels Ink-jet oder Screen-printing von elektrisch leitfähiger Tinte. Diese leitfähigen Tinten erhalten Silber in Form von Nanopartikeln, welche nach dem Drucken durch photo-thermische Aushärtung in eine leitfähige Dickschicht (thick film) umgewandelt werden (Koptioug et al. 2018; Babar et al. 2012). Zukünftige technologische Innovationen im Bereich der Polymerelektronik werden möglicherweise den Einsatz siliziumbasierter Chips auf RFID-Tags obsolet machen. Hingegen ist ein Ersatz der Metalle

⁴ häufige RFID Systeme arbeiten mit 868/915 MHz (UHF) oder Mikrowellen (2,45 oder 5,8 GHz)

durch leitfähige Polymere in den Antennen bis auf weiteres unwahrscheinlich, weil letztere eine im Vergleich zu Kupfer und Silber zu geringe Leitfähigkeit aufweisen.

Die stoffliche Zusammensetzung der RFID-tags hängt sehr stark von der Bauform und dem Anwendungsbereich ab. Robuste Tags für Industrieanwendungen sind üblicherweise grösser und schwerer als Einwegtags auf Verpackungsmaterialien für Handelsgüter. Im Textilbereich werden textile RFID-tags in Etiketten von Kleidungsstücken integriert. Die Antennen für flexible Tags können auch mit Druckverfahren auf Papier oder Folie aufgebracht werden. Vor dem Hintergrund extremen Heterogenität der RFID Technologie sind repräsentative Studien über die Materialien und deren Mengen in RFID Systeme nicht verfügbar vgl. Angerer et al. 2009. Erdmann und Hilty 2009 stützen sich in einer Studie zur Auswirkung von RFID-tags in Recyclingprozessen auf eine Szenarienanalyse. In diesem Kontext werden Annahmen über die durchschnittliche Zusammensetzung von RFID-tags abgeleitet (Tabelle 4-4) und Prognosen für zukünftige RFID-Stoffströme bis 2026 modelliert. Eine Studie von RAND macht Angaben über die prognostizierte Entwicklung von RFID-Antennenmaterialien bis 2026 (Tabelle 4-3). Diese Prognosen gehen von einem starken Einfluss der Rohstoffpreise auf Materialauswahl und Design der Tags aus. Es herrscht ein empfindlicher Preisdruck auf die generelle Entwicklung im RFID Markt und der Trend zu kostengünstigen Massenprodukten begünstigt die Auswahl preisgünstiger Materialien (wie Aluminium) und kostengünstige Herstellungsverfahren (leitfähige gedruckte Antennen auf Silberbasis).

Tabelle 4-3: Prognose der RFID Antennenmaterialien im UHF Bereich (868/915 MHz)

Shares of antenna materials in % for HF & UHF labels combined												
Year	2011			2016			2021			2026		
Scenarios	Cu	Ag	Al	Cu	Ag	Al	Cu	Ag	Al	Cu	Ag	Al
Al domination	9	1	90	7	1	92	5	1	94	3	1	96
Cu domination	9	1	90	11	1	88	13	1	86	15	1	84
Ag domination	9	1	90	9	2	89	9	3	88	9	4	87

Quelle: Schindler et al. 2012

Tabelle 4-4: Zusammensetzung typischer RFID Tags basierend auf ISO/IEC TR 24729-2:2007

Komponente	Material	Masse [mg]		
		76,2 mm * 76,2 mm Tag	15 mm * 97 mm Tag	15 mm * 148 mm Tag
Deckschicht	PP	270	65	100
	Papier	525	130	200
Klebstoff	Acrylat	115	30	45
IC	Silizium	0,5	0,5	0,5
ACP	Epoxy-basiertes Material	0,8	0,8	0,8
ACP Metall	Nickel	0,1	0,1	0,1
Klebstoff	Polyurethan	40	10	15
Antenne	Kupfer	340	105	140
	Aluminium	50	15	20
	Silber (gedruckt)	36,3*	10,9	14,5*
	Bonding Agent (gedruckt)	15,3*	4,6	6,1*
Substrat	PET	410	100	155
Klebstoff	Acrylat	155	40	60
Gesamt	Tag (ohne Deckschicht)	Cu: 1021,4 Al: 731,4 Ag: 733,0*	Cu: 286,4 Al: 196,4 Ag: 196,9	Cu: 401,4 Al: 281,4 Ag: 282,0*

Quelle: Angerer et al. 2009

Die Materialzusammensetzung eines modellhaften RFID Tags (entsprechend der Annahmen zur spezifischen Einheit) berechnet sich aus den Angaben von Angerer et al. 2009 und Schindler et al. 2012 wie folgt: Es wird ein Mittelwert der Masse per Fläche aus den drei in Tabelle 1 verzeichneten Tags gebildet. Der Durchschnittswert der Fläche beträgt 32 cm² und entspricht damit der Annahmen zur spezifischen Einheit. Die daraus berechneten Materialmengen sind in Tabelle 3 verzeichnet (Menge 1). Zum Vergleich werden die Prozentangaben zu Antennenmaterialien von Schindler et al. 2012 (Szenario „Ag domination“) auf eine durchschnittliche Antenne mit 0,25g Gewicht umgerechnet (Menge 2). Zu beachten ist der Umstand, dass die in den Quellen angegebenen Metalle nicht als Materialgemisch auf ein und demselben Tag vorliegen sondern einen Durchschnittswert über verschiedenartige Tags abbilden. Die Antenne eines einzelnen Tags besteht immer nur aus jeweils einem Metall, je nach zugrunde liegender Technik.

Tabelle 4-11 zeigt ein Beispiel für die Materialzusammensetzung eines passiven RFID tags mit Abmessungen von 93 x 23 mm für die Verwendung mit einer HDPE Transportverpackung für den Gemüsehandel.

Tabelle 4-5: Zusammensetzung eines RFID Tags (Beispiel)

Component	Materials	Percentage (%)	Weight (g)
Substrate	Paper	39.36	0.2302
	PET	31.07	0.1818
	Adhesive	24.20	0.1417
Antenna	Aluminium	5.32	0.0310
Chip	Silicon	0.05	0.0003
Total		100	0.5850

Quelle: Aliaga et al. 2011

Tabelle 4-6: Materialbedarf für eine durchschnittliche Variante eines RFID-tags von 32 cm²

Komponente	Material	Menge 1	Menge 2
Antenne	Aluminium	0,403 g	0,217 g
Antenne	Kupfer	0,569 g	0,0225 g
Leitpaste	Nickel	0,0001 g	0,0001 g
Antenne	Silber	0,404 g	0,010 g
Mikrochip	Silizium	0,0005 g	0,0005 g

Quelle: eigene Berechnung auf Basis von Angerer et al. 2009 und Schindler et al. 2012

Die Tabellen Tabelle 4-5 und Tabelle 4-6 verdeutlichen die enorme Bandbreite der möglichen Materialzusammensetzung in verschiedenen RFID Tags. Aus Gründen der Plausibilität im Kontext des hier angenommenen Verwendungszwecks (low-cost Tags für Verkaufsverpackungen) wird die Menge 2 als Basis für weitere Berechnungen verwendet (Begründung: Einsatz kostengünstiger Print-Verfahren mit silberbasierten Leitpasten bei low-cost Tags).

Mehrere Studien (Angerer et al. 2009), (Schindler et al. 2012) kommen zu dem Schluss, dass die Technologie eine wichtige Funktion bei Güterlogistik & Stoffstrommanagement spielt (vor allem im Rahmen von Lieferketten). (Björk et al. 2011) haben festgestellt, dass ca. 58% der befragten Unternehmen RFID-Technologie anwenden um Materialien, Güter und Produkte automatisiert zu verfolgen und diese Prozesse im Rahmen eines Umweltmanagements zu optimieren. In der EU wird für 2015 ein Verbrauch von jährlich bis zu 200 Milliarden RFID Tags geschätzt (RAND, 2012). (IDTechEx 2017) prognostiziert ein Wachstum des RFID Markts auf 30.2 Milliarden US-Dollar in 2024. Es wird von einer zukünftigen Marktdurchdringung der RFID Technik in fast allen Marktsegmenten bzw. Produktgruppen sowie auf Verpackungen ausgegangen. Treiber des möglichen Marktdurchbruchs sind unter anderem die Lager- und Regalbewirtschaftung beim Einzelhandel. Die Technologie ist eine Voraussetzung für bessere Kosteneffizienz und bessere Datengrundlage für Lieferkettenmanagement und Stoffstromüberwachung in Echtzeit. Sie könnte auch eine tragende Rolle für kosteneffizienteres Recycling einnehmen wenn bestimmte Voraussetzungen (z.B. Standardisierung, Kunden-Akzeptanz, Recyclingtechnologien) vorhanden sind.

Tabelle 4-7: Abschätzung und Trendextrapolation der Anzahl RFID Tags pro Jahr

Jahr	Stückzahlen Dtl	Stückzahlen Retail Welt	Marktgröße Welt
2007	93 Mio.		
2009		1,98 Mrd.	
2010		2,31 Mrd.	\$5.63 Mrd.
2012	900 Mio.	3 Mrd.	\$6.96 Mrd.
2014		3 Mrd. (nur in Kleidung)	\$8.89 Mrd.
2017	6340 Mio.		
2022	24000 Mio.		
2025	60 Mrd.	200 Mrd	\$27.31 Mrd.
Quellen:	(Erdmann et al. 2009)	IDTechEx	IDTechEx
2050 (extrapoliert)	1 ^{exp 14}	3,3 ^{exp 14}	\$500 Mrd.

Quelle: eigene Berechnung

Aus den oben zitierten Quellen lässt sich auf Basis einer kühnen Trendextrapolation eine weitere Steigerung der Nutzung von RFID Tags in Deutschland ableiten. Diese rein rechnerische Extrapolation ergibt eine Stückzahl von 10^{14} bis 10^{15} Tags im Jahr 2015. Dies ist ein extrem optimistisches Szenario und dürfte nur bei umfassender Einführung des „Internet der Dinge“ Realität werden. Ein realistischeres Szenario dürfte etwa in der Größenordnung von 10^{13} Tags im Jahr 2050 liegen (= 1 Mio. Stück pro Einwohner und Jahr).

Tabelle 4-8: Extrapolation des Materialbedarfs für 32 cm² RFID-tags in Deutschland

Material	Menge per Tag	Menge 2013 in t/a	Menge 2025 in t/a	Menge 2050 in t/a
Tag V1		1Mrd	60 Mrd.	10 ^{exp 13}
Aluminium	0,403 g	403	24180	4030000
Kupfer	0,569 g	569	34140	5690000
Nickel	0,0001 g	0,10	6	1000
Silber	0,404 g	404	24240	4040000
Silizium	0,0005 g	0,50	30	5000
Tag V2				
Aluminium	0,217 g	217	13020	2170000
Kupfer	0,0225 g	22,5	1350	225000
Nickel	0,0001 g	0,1	6	1000
Silber	0,010 g	10	600	100000
Silizium	0,0005 g	0,5	30	5000

Quelle: eigene Berechnung

4.1.1.2. Digitale Endgeräte

Elektronische Geräte enthalten eine breite Vielfalt von Materialien, einschließlich vieler elementarer Substanzen, die allgemein als kritisch angesehen werden und die nur in kleinen Mengen abgebaut werden. Beispielsweise werden für die Produktion von Mobiltelefonen etwa 60 verschiedene Stoffe benötigt. Die in Mobiltelefonen enthaltenen elektronischen Bauteile wie zum Beispiel Akku, Gehäuse, Display und Leiterplatten bestehen aus einem Gemisch aus Kunststoffen, Metallen, Glas und Keramik. Etwa 25% des Gewichts entfallen auf Metalle, wobei Kupfer, Eisen und Aluminium, den größten Anteil der Masse ausmachen. Aus Sicht der Ressourcenverfügbarkeit und der Umweltauswirkungen der Ressourcenbereitstellung sind jedoch andere Metalle wesentlich relevanter. Dazu zählen Edelmetalle wie Silber und Gold sowie Palladium und Platin und außerdem kritische Rohstoffe, wie zum Beispiel Kobalt, Gallium, Indium und Wolfram und Seltene Erde Elemente wie Neodym. Außerdem ist der Herstellungsprozess digitale Endgeräte mit einem hohen Ressourcenaufwand verbunden. Beispielsweise verursacht die Herstellung eines etwa 80 g schweren Mobiltelefons einen ökologischen Rucksack von 75,3 Kilogramm. (IZMF 2014).

Abbildung 4-6: Übersicht über Elemente, die in Mobiltelefonen enthalten sind

Elemente im Mobiltelefon

1 H Wasserstoff																	2 He Helium
3 Li Lithium	4 Be Beryllium											5 B Bor	6 C Kohlenstoff	7 N Stickstoff	8 O Sauerstoff	9 F Fluor	10 Ne Neon
11 Na Natrium	12 Mg Magnesium											13 Al Aluminium	14 Si Silicium	15 P Phosphor	16 S Schwefel	17 Cl Chlor	18 Ar Argon
19 K Kalium	20 Ca Calcium	21 Sc Scandium	22 Ti Titan	23 V Vanadium	24 Cr Chrom	25 Mn Mangan	26 Fe Eisen	27 Co Cobalt	28 Ni Nickel	29 Cu Kupfer	30 Zn Zink	31 Ga Gallium	32 Ge Germanium	33 As Arsen	34 Se Selen	35 Br Brom	36 Kr Krypton
37 Rb Rubidium	38 Sr Strontium	39 Y Yttrium	40 Zr Zirkon	41 Nb Niob	42 Mo Molybdän	43 Tc Technetium	44 Ru Ruthenium	45 Rh Rhodium	46 Pd Palladium	47 Ag Silber	48 Cd Cadmium	49 In Indium	50 Sn Zinn	51 Sb Antimon	52 Te Tellur	53 I Jod	54 Xe Xenon
55 Cs Cäsium	56 Ba Barium	57-71 La-Lu Lanthanoide	72 Hf Hafnium	73 Ta Tantal	74 W Wolfram	75 Re Rhenium	76 Os Osmium	77 Ir Iridium	78 Pt Platin	79 Au Gold	80 Hg Quecksilber	81 Tl Thallium	82 Pb Blei	83 Bi Bismut	84 Po Polonium	85 At Astat	86 Rn Radon
87 Fr Francium	88 Ra Radium	89-71 Ac-Lr Actinoide	104 Rf Rutherfordium	105 Db Dubnium	106 Sg Seabergium	107 Bh Bohrium	108 Hs Hassium	109 Mt Meitnerium	110 Ds Darmstadtium	111 Rg Roentgenium	112 Cn Copernicium	113 Uut Ununtrium	114 Uuq Ununquadium	115 Uup Ununpentium	116 Uuh Ununhexium	117 Uus Ununseptium	118 Uuo Ununoctium
Lanthanoide			57 La Lanthanum	58 Ce Cer	59 Pr Praseodym	60 Nd Neodym	61 Pm Promethium	62 Sm Samarium	63 Eu Europium	64 Gd Gadolinium	65 Tb Terbium	66 Dy Dysprosium	67 Ho Holmium	68 Er Erbium	69 Tm Thulium	70 Yb Ytterbium	71 Lu Lutetium
Actinoide			89 Ac Actinium	90 Th Thorium	91 Pa Protactinium	92 U Uran	93 Np Neptunium	94 Pu Plutonium	95 Am Americium	96 Cm Curium	97 Bk Berkelium	98 Cf Californium	99 Es Einsteinium	100 Fm Fermium	101 Md Mendelevium	102 No Nobelium	103 Lr Lawrencium

■ Elemente, die im Handy vorkommen können.

Quelle: (IZMF 2014)

Smartphones und Tablets sind Beispiele für wirklich globalisierte IKT Produkte: Mit jährlichen Verkaufszahlen von mehr als einer Milliarde Geräten werden sie in allen Teilen der Welt und quer durch alle Bevölkerungsgruppen genutzt. Tabelle 4-9 gibt einen Überblick über die Materialzusammensetzung von Smartphones und Tabelle 4-10 über Tablets. Die Daten beider Tabellen basieren auf verschiedenen Literaturquellen und ausgewählten Messungen (Manhart et al. 2017). Die Inhaltsdaten sind nur von indikativer Natur und können von Modell zu Modell erheblich variieren. Es muss betont werden, dass in beiden Tabellen Datenlücken zu verschiedenen Substanzen bestehen. Insbesondere gibt es keine Daten für den Gehalt an Beryllium und Lithium, die beide häufig in elektronischen Geräten verwendet werden. Während Beryllium unter anderem in der Chip-Produktion verwendet wird, ist Lithium ein Hauptmaterial für die Li-Ionen-Batterien, die heutzutage praktisch in allen Mobiltelefonen und Tablets enthalten sind. Die Tabellen zeigen das Materialinventar auf elementarer Ebene, zumindest in Bezug auf die verschiedenen Metalle. Infolgedessen werden organische Verbindungen wie PVC und Flammschutzmittel nicht als solche behandelt. Zusätzlich zu diesen Datenlücken kann die Materialzusammensetzung im Laufe der Zeit variieren, was sich nicht unbedingt in den Daten widerspiegelt. Daher können die Daten und Informationen in diesen Tabellen nur für grobe Schätzungen verwendet werden.

Tabelle 4-9: Indikative Materialzusammensetzung von Smartphones

Material	Hauptanwendungsbereich		Gehalt pro Gerät	Gehalt aller weltweit im Jahr 2014 verkauften Smartphones
Aluminium	Al	Gehäuse	22,18 g	28.851 t
Kupfer	Cu	Verdrahtung, elektromagnetische Abschirmung, Leiterplatten, Lautsprecher, Vibrationsalarm	15,12 g	19.665 t
Plastik	-	Gehäuse	9,53 g	12.397 t
Magnesium	Mg	Gehäuse	5,54 g	7.213 t
Kobalt	Co	Lithium-ion Batterie	5,38 g	7.002 t
Zinn	Sn	Lote	1,21 g	1.573 t
Eisen (Stahl)	Fe	Gehäuse	0,88 g	1.149 t
Wolfram	W	Vibrationsalarm	0,44 g	569 t
Silber	Ag	Solder paste, printed circuit board	0,31 g	397 t
Neodymium	Nd	Magneten in Lautsprechern	0,05 g	65 t
Gold	Au	Electronic components, printed circuit board	0,03 g	39 t
Tantal	Ta	Kondensatoren	0,02 g	24 t
Palladium	Pd	Electronic components, printed circuit board	0,01 g	14 t
Praseodymium	Pr	Magneten in Lautsprechern	0,01 g	13 t
Indium	In	Display	0,01 g	7 t
Yttrium	Y	LED-backlights	0,0004 g	0,5 t
Gallium	Ga	LED-backlights	0,0004 g	0,5 t
Gadolinium	Gd	LED-backlights	0,0002 g	0,3 t
Europium	Eu	LED-backlights	0,0001 g	0,1 t
Cer	Ce	LED-backlights	0,00003 g	0,03 t
Andere	-	Glas, Keramik, Halbleiter....	99,29 g	129.181 t
			160 g	208.160 t

Quelle: Manhart et al. 2017

Tabelle 4-10: Indikative Materialzusammensetzung von Tablets

Material	Hauptanwendungsbereich	Gehalt pro Gerät	Gehalt aller weltweit im Jahr 2014 verkauften Tablets
Glas	- Display	66,53 g	15.275 t
Aluminium	Al Gehäuse	56,59 g	12.994 t
Kupfer	Cu Verdrahtung, elektromagnetische Abschirmung, Leiterplatten, Lautsprecher, Vibrationsalarm	40,79 g	9.366 t
Plastik	- Gehäuse	26,49 g	6.081 t
Kobalt	Co Lithium-ion Batterie	15,55 g	3.570 t
Magnesium	Mg Gehäuse	13,57 g	3.116 t
Zinn	Sn Lote	3,19 g	732 t
Eisen (Stahl)	Fe Gehäuse	2,44 g	559 t
Neodymium	Nd Magneten in Lautsprechern	0,60 g	137 t
Silber	Ag Solder paste, printed circuit board	0,31 g	70 t
Wolfram	W Vibrationsalarm	0,27 g	61 t
Praseodymium	Pr Magneten in Lautsprechern	0,15 g	34 t
Tantalum	Ta Kondensatoren	0,04 g	8,4 t
Gold	Au Electronic components, printed circuit board	0,03 g	6,9 t
Indium	In Display	0,02 g	4,9 t
Palladium	Pd Electronic components, printed circuit board	0,01 g	2,5 t
Yttrium	Y LED-backlights	0,002 g	0.4 t
Gallium	Ga LED-backlights	0,002 g	0.4 t
Gadolinium	Gd LED-backlights	0,001 g	0.2 t
Europium	Eu LED-backlights	0,0003 g	0,07 t
Cer	Ce LED-backlights	0,0001 g	0,02 t
Andere	- Glas, Keramik, Halbleiter....	204,43 g	46.938 t
		431 g	98.958 t

Quelle: Manhart et al. 2017

Diese Materialanforderungen werden im gleichen Zeitraum (2014) mit der gesamten Primärproduktion verglichen. Da die globalen Mining-Daten kein materialspezifisches Produktionsvolumen für Seltenerdelemente liefern, wurden für diese Überschlagsrechnung in Smartphones und Tablets enthaltenen Seltenerdelemente (Nd, Pr, Y, Gd, Eu, Ce) auf eine Zahl zusammengefasst.

Tabelle 4-11: Gesamter Materialbedarf von Smartphones und Tablets im Verhältnis zur weltweiten Primärproduktion von Rohstoffen

Material		Gehalt in allen Smartphones & Tablets in 2014	Weltprimärproduktion in 2014	Durchschnittlicher Recyclinganteil (global für alle Anwendungen)	Prozentsatz der Nachfrage an der Weltprimärproduktion
Aluminium	Al	41.845 t	49.300.000 t	> 25-50%	0,085%
Kupfer	Cu	29.031 t	18.700.000 t	> 10-25%	0,16%
Kobalt	Co	10.572 t	112.000 t	> 25-50%	9,4%
Magnesium	Mg	10.329 t	907.000 t	> 25-50%	1,1%
Zinn	Sn	2.305 t	296.000 t	> 10-25%	0,78%
Eisen (Stahl)	Fe	1.708 t	1.190.000.000 t	> 25-50%	0,00014%
Wolfram	W	630 t	82.400 t	> 25-50%	0,76%
Silber	Ag	467 t	26.100 t	> 25-50%	1,8%
Seltene Erden Element	REE	250 t	110.000 t	< 1% & 1-10%	0,25%
Gold	Au	46 t	2.860 t	> 25-50%	1,6%
Tantal	Ta	32 t	1.200 t	< 10-25%	2,7%
Palladium	Pd	17 t	190 t	> 25-50%	8,9%
Indium	In	12 t	820 t	> 25-50%	1,4%
Gallium	Ga	0.9 t	440 t	> 10-25%	0,21%

Quelle: Manhart et al. 2017

Die Analyse zeigt, dass Smartphones und Tablets recht bedeutende Anwendungsbereiche für Kobalt (~ 9,4% der weltweiten Primärproduktion) und Palladium (~ 8,9% der Weltprimärproduktion) darstellen. Die weltweite Produktion dieser beiden Produktgruppen ist auch ein relevanter Faktor für die weltweite Nachfrage nach Tantal, Silber, Gold, Indium und Magnesium (zwischen 1% und 3% der Weltprimärproduktion). Die berechneten Werte in Tabelle 4-11 basieren jedoch auf verschiedenen Annahmen und sollten nicht überbeansprucht werden. Sie sind nur Richtwerte und sollten vor der Entscheidungsfindung mit zusätzlichen analytischen Anstrengungen sorgfältig überprüft werden. Im Allgemeinen sind solche Industrieanteile an der globalen Materialnachfrage wichtige Hinweise auf den potenziellen Einfluss eines Sektors auf Upstream-Aktivitäten. Während andere Elemente (z. B. Kupfer, Aluminium) relevante Materialien für diese Gerätetypen sind, haben sie im Vergleich zu anderen industriellen Anwendungen dieser Materialien nur einen relativ geringen Anteil am globalen Bedarf.

Abbildung 4-7: Menge an Seltene Erde Elementen in verschiedenen Typen von digitalen Elektronikgeräten

Produkt	SEE	Menge in g/Gerät
DVD Player / DVD ROM/Driver	NdFeB	5
Hard disk drives (HDD)	NdFeB (Nd)	26 (6)
Lautsprecher (50-watt)	NdFeB	50
Mobiltelefon	Permanent Magnet	5
Mobiltelefon	Leuchtphosphor	0,006
Laptop	Leuchtphosphor	0,05 - 0,6
LCD TV	Leuchtphosphor	4,5 - 6
Plasma TV	Leuchtphosphor	100-125
LCD Display	Leuchtphosphor	1.5-2.5

Quelle: Liu et al. 2011

4.1.1.3. Wearable computing und Smarte Textilien

Smarte Textilien können als Beispiel für zukünftige Produkte des allgegenwärtigen Computing (pervasive computing) gelten, da diese Innovation darauf abzielt, Alltagsgegenstände (z.B: Kleidung) mit elektronischen Funktionen auszustatten. Elektronische Textilien mit digitalen Funktionen werden auch als Wearable Computers (anziehbare Computer) bezeichnet.

Beispiele für elektronische Baugruppen, die in Textilien eingebettet werden können, sind Sensoren, Aktuatoren, Beleuchtungselemente, elektronische Verarbeitungseinheiten und Komponenten zur Stromerzeugung und -speicherung (van Langenhove et al. 2012). Tabelle 4-12 gibt einen Überblick über textilintegrierte elektronische Komponenten und deren Anwendungszweck.

Tabelle 4-12: Beispiele für in E-Textilien integrierte Komponenten und Materialien

Components and application purpose	Examples of materials used
Electrically conductive fibres: - electrostatic dissipation, electro-magnetic shielding, electric wiring and contacting, sensor and actuator elements, power distribution	Copper, silver, gold
	Intrinsically conductive polymers (polypyrrole or polyanniline)
	Conductive polymer composites containing Nano-particles (e.g. silver-NP; carbon nanotubes)
Contacting and bonding elements	Solder alloys: tin, silver, copper, antimony, bismuth
	Conductive adhesives: silver particles
Embedded circuit boards: - mounting and interconnecting of electronic components, mechanical fixation and protection within the textile	Flexible substrata (e.g. silicon elastomers or polyimide film), metals (copper, silver, gold), fire retardants, lacquer

Electronically active devices: - providing ICT functionality (smartness)	ICT devices such as mp3-player, micro-controller and embedded periphery, antenna, RFID-tags, flexible displays and LEDs, etc.
Energy harvesting devices	Solar cells, photoadaptive polymers, piezoelectric materials, thermoelectric generators, (containing e.g. silicon, zinc-oxide, nanoparticles, nanowires)
Power storage	Rechargeable batteries (Li-ion)

Quelle: Köhler et al. (2010)

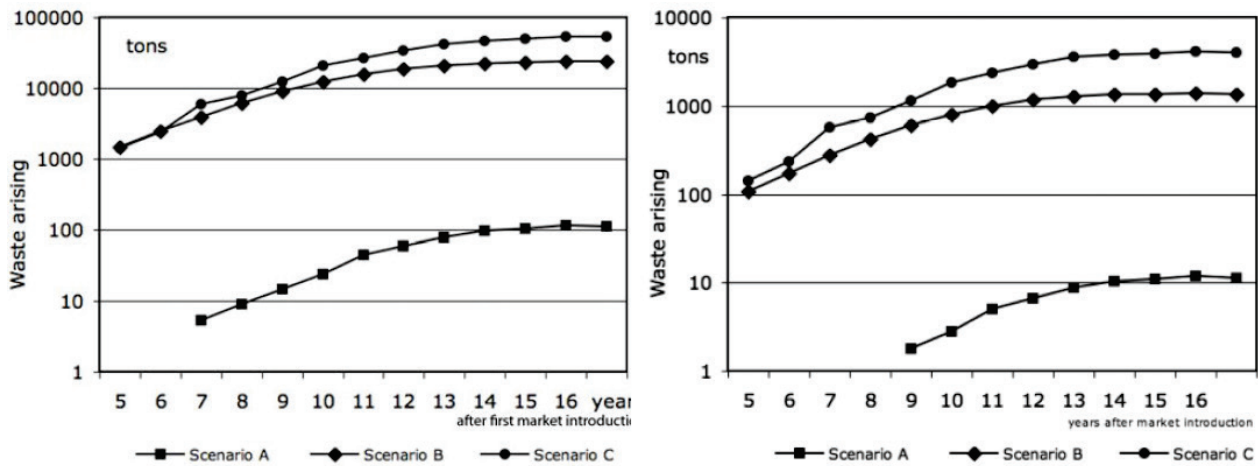
Der Metallgehalt von metallbeschichteten Fasern kann bis zu 40 Gewichtsprozent betragen. Gewebe mit eingewebten metallischen Fasern oder mit Silbertinte gedruckten Strukturen (z. B. Antennen) können einen Metallgehalt von bis zu 54 Gewichtsprozent aufweisen. Für e-Textilien mit anspruchsvollen Funktionen werden auch mit Edelmetallen, wie z.B. Gold und Platingruppenmetalle (PGM) beschichtete Fasern eingesetzt. Die Materialzusammensetzung der textilintegrierten Elektronikbaugruppen ist sehr ähnlich der von handelsüblichen elektronischen Komponenten. Allerdings erfordern e-Textilien im Vergleich zu kompakten Digitalgeräten tendenziell die Verwendung höherer Mengen an Metallen. Zum einen ist die textilintegrierte Elektronik über große Flächen verteilt. Zudem sind die elektronischen Strukturen in e-Textilien der Regel größer dimensioniert (redundante Strukturen und mäanderförmige Verdrahtung) um die Produkte fehlertolerant zu machen. Unter Ressourcengesichtspunkten kann man davon ausgehen, dass solche Produkte zu einem erheblichen Zuwachs im Verbrauch an biogenen Rohstoffen (Textilfasern) und mineralischen Rohstoffen (Elektronikkomponenten) führen könnten sofern diese Technologie den Massenmarkt erreicht. Moderne elektronische Produkte haben normalerweise eine relativ kurze Lebensdauer werden und am Ende ihrer Nutzungsdauer unvermeidlich zu Abfall.

Kritische Materialien, die in zukünftigen E-Textilien stark dispergiert vorliegen, werden sich wahrscheinlich kaum aus dem Abfall rezyklieren lassen weil ihre Konzentration im gesamten Stoffstrom von Alttextilien gering ist. E-Textilien sind deshalb ein Beispiel für High-Tech-Produkte mit Aussicht auf Massen Anwendungen, die zu einer zunehmenden Verschwendung kritischer Elemente führen.

Köhler et al. (2011) haben die Größenordnung zukünftiger Abfallströme durch E-Textilien unter der Annahme abgeschätzt, dass sich die Marktdiffusion von E-Textilien zukünftig ähnlich der von kleinen High-Tech-Geräten (wie beispielsweise Mobiltelefonen und Smartphones) in der Vergangenheit entwickelt. Ein Basisszenario der Marktdiffusion wurde konzipiert, indem historische Daten über die Absatzzahlen von Mobiltelefonen in Form von Szenarien extrapoliert wurden. Es wurde davon ausgegangen, dass die Marktdiffusion von E-Textilien einer sigmoiden Wachstumskurve ähnlich dem Mobilfunkmarkt in der Vergangenheit folgen wird. Dieses Marktsegment wuchs in Deutschland innerhalb von neun Jahren von 10% auf 90% der maximalen Marktgröße (K). Die jährliche Abfallmenge verschiedener Arten von e-Textilien wurde anhand von drei Anwendungsszenarien (Nischenmarkt (A); Branchenmarkt (B); Massenmarkt (C)) extrapoliert.

Abbildung 4-8 (links) zeigt den extrapolierten Abfallstrom kompletter e-Textilien (elektronische Komponenten zusammen mit textilen Materialien). Nach der ersten Einführung von E-Textilien auf dem Massenmarkt entstehen mit ca. 5 bis 7 Jahren Verzögerung erhebliche Abfallmengen. Abbildung 4-8 (rechts) zeigt den extrapolierten Massenstrom der in e-Textilien enthaltenen elektronischen Bauteile. In jedem Szenario wurde als Näherung eine jährliche Gewichtsabnahme der Elektronik um 2% angenommen, um einen Miniaturisierungstrend der elektronischen Bauteile einzube rechnen.

Abbildung 4-8: Extrapoliertes Aufkommen von obsoleten e-Textilien (links) und darin enthaltener Elektronik (rechts)



Quelle: Köhler et al. 2011

Die Fallstudie zeigt, dass der extrapolierte Abfallstrom alter E-Textilien in Deutschland in Szenario B (Elektrokardio-Shirt) 25 und in Szenario C (Outdoor-Jacke) 55 Kilotonnen (kt) 25 pro Jahr betragen kann. Textile Materialien tragen in diesem Abfallstrom den größten Anteil bei. Im Massenmarktszenario C würden e-Textilien etwa 5% des Gewichts unter den 1,13 Millionen Tonnen pro Jahr in Deutschland entsorgter Kleidung und Heimtextilien ausmachen. Die darin enthaltenen elektronischen Komponenten können eine Konzentration zwischen 7 Gewichts-% in Szenario B und 15 % in Szenario A (Feuerwehrranzug) ausmachen, der Rest besteht aus Textilien oder Kunststoff / Metallteilen (z. B. Knöpfe etc.). Die E-Abfallfraktion im Textilabfallstrom wird auf 1.300 Tonnen pro Jahr in Szenario B und 4.000 Tonnen in Szenario C geschätzt. Im Vergleich zum gesamten Textilabfallstrom erscheint das Aufkommen von textileingebettetem Elektronikschrott nicht sehr hoch. Allerdings erreicht dieser Abfallstrom eine ähnliche Größenordnung wie zu entsorgende Mobiltelefone zum gegenwärtigen Zeitpunkt in Deutschland.

Im globalen Maßstab wurde das prospektive Aufkommen von zu entsorgenden e-Textilien mit einer Größenordnung von einer Million Tonnen pro Jahr geschätzt. Dieser Abfallstrom würde je nach Art der in e-Textilien eingebetteten elektronischen Bauteile etwa 50 bis 150 kt Elektronikschrott enthalten.

Der Ressourcenbedarf für e-Textilien kann sich im Einklang mit den zuvor skizzierten Szenarien zur Massenanwendung dieser Produkte zu einem global relevanten Faktor entwickeln. (Köhler) skizziert folgendes Beispiel für den anzunehmenden Rohstoffbedarf eines bestimmten e-Textil Produkts: Elektrokardiogramm (EKG)-Sensor-Shirts werden entwickelt, um eine kontinuierliche Herzinfarkt Früherkennung älterer Benutzer zu ermöglichen. Diese Wearables enthalten silberbeschichtete textile Elektroden mit einem Silbergehalt von bis zu 3,6 g Silber pro Shirt. Angenommen, jeder zweite Bürger, älter als 50 Jahre in der Europäischen Union (etwa 100 Millionen Menschen), würde im täglichen Leben solche EKG-Sensor-Shirts verwenden. Dazu wären etwa 7 Sensorhemden pro Person erforderlich (eines pro Wochentag). Da der Zuverlässigkeit von EKG-Sensorhemden durch die Anzahl der Waschzyklen Grenzen gesetzt sind, müssten diese nach einer Nutzungsdauer von ca. einem Jahr entsorgt und durch neue ersetzt werden. Die Produktion von 700 Millionen EKG-Sensorhemden führt zu einem Silberbedarf von 2.520 Tonnen pro Jahr. Eine solche Nachfrage würde mehr als 12 Prozent des jährlichen Silberangebots auf dem Welt-

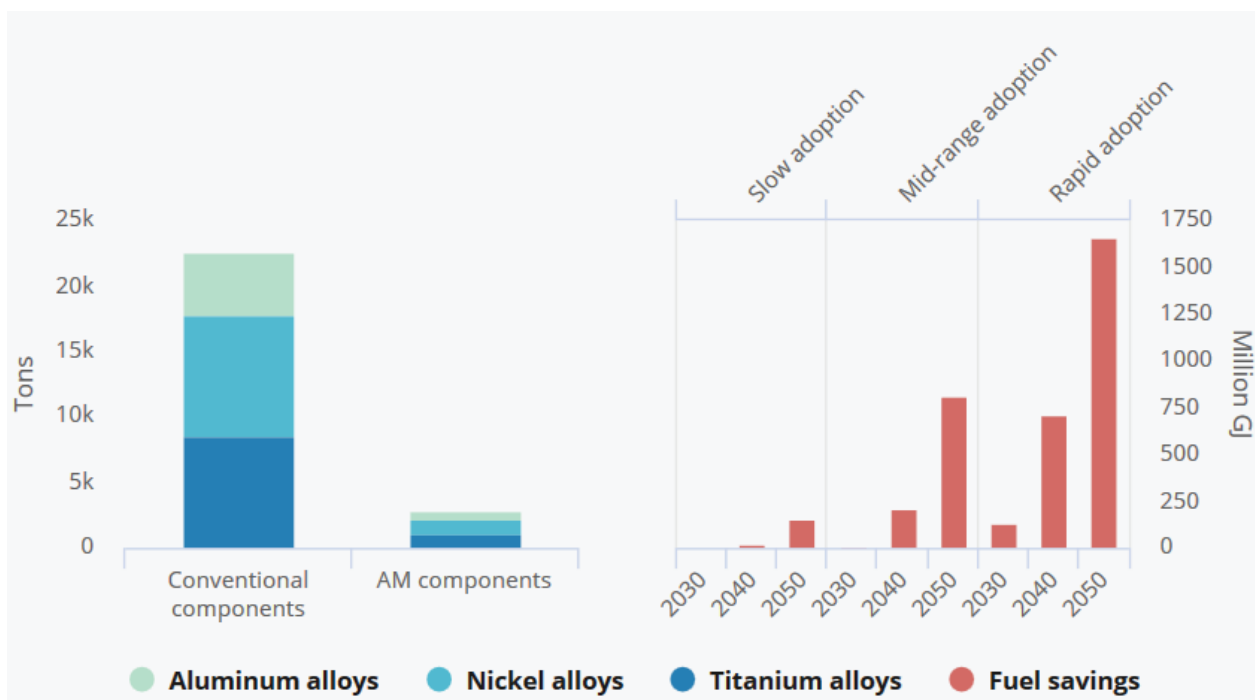
markt ausmachen (das sind laut (Brooks 2008) ca. 20.500 t). Wenn kein Recycling dieser entsorgten e-Textilien stattfindet, geht das Silber im Abfallstrom von Alttextilien oder im Hausmüll verloren.

4.1.2. Industrie 4.0

Es werden in der Literatur zu Industrie 4.0 teilweise hohe Erwartungen bezüglich der Potenziale der Digitalisierung für die Steigerung der Ressourcen- und Arbeitsproduktivität von industriellen Wertschöpfungsprozessen signalisiert. Zumindest ist die ein Verbesserung der Nutzung der technischen, organisatorischen und personellen Ressourcen von Betrieben ein Entwicklungsziel der Innovationen mit Industrie 4.0 (ifaa 2016). Allerdings geht es dabei es in den seltensten Fällen explizit um eine Steigerung der Energieeffizienz der Produktionsprozesse oder um eine effizientere Nutzung von Rohstoffen. (Huang et al. 2015) zeigen am Beispiel des 3D Drucks von Flugzeugteilen, dass sich die Verbräuche an Energie und Rohmaterial in Herstellungsprozessen mit Hilfe digital ermöglichter Technologien senken lassen (siehe Abbildung 4-9). Obwohl diese Effekte durch die Nutzung von Industrie 4.0 Technologien zweifellos erreichbar wären, existieren gegenwärtig noch kaum systematische Untersuchungen zum Thema.

Aus einer Serie von Fallstudien zieht das (VDI Zentrum Ressourceneffizienz 2017) die Erkenntnis, dass Einsparungen betrieblicher Ressourcen durch die Umsetzung von Maßnahmen der digitalen Transformation möglich sind. Die Einsparpotenziale werden auf etwa 25 Prozent geschätzt. Dieses Potenzial resultiert aus der Verringerung des Stromverbrauchs und des Materialeinsatzes sowie auch aus der Verminderung von Transporten, Lagerraum und der Vermeidung von Abfällen durch reduzierte Entstehung von Ausschuss. Allerdings wird konstatiert, dass es schwierig ist direkte Zusammenhänge zwischen Industrie 4.0 Einsatz und den Auswirkungen auf die Ressourceneffizienz zu ziehen (ebda).

Abbildung 4-9: Vergleich des Rohmaterialverbrauchs bei konventioneller Fertigung im Vergleich zu additiver Fertigung (3d Druck) von Flugzeugteilen



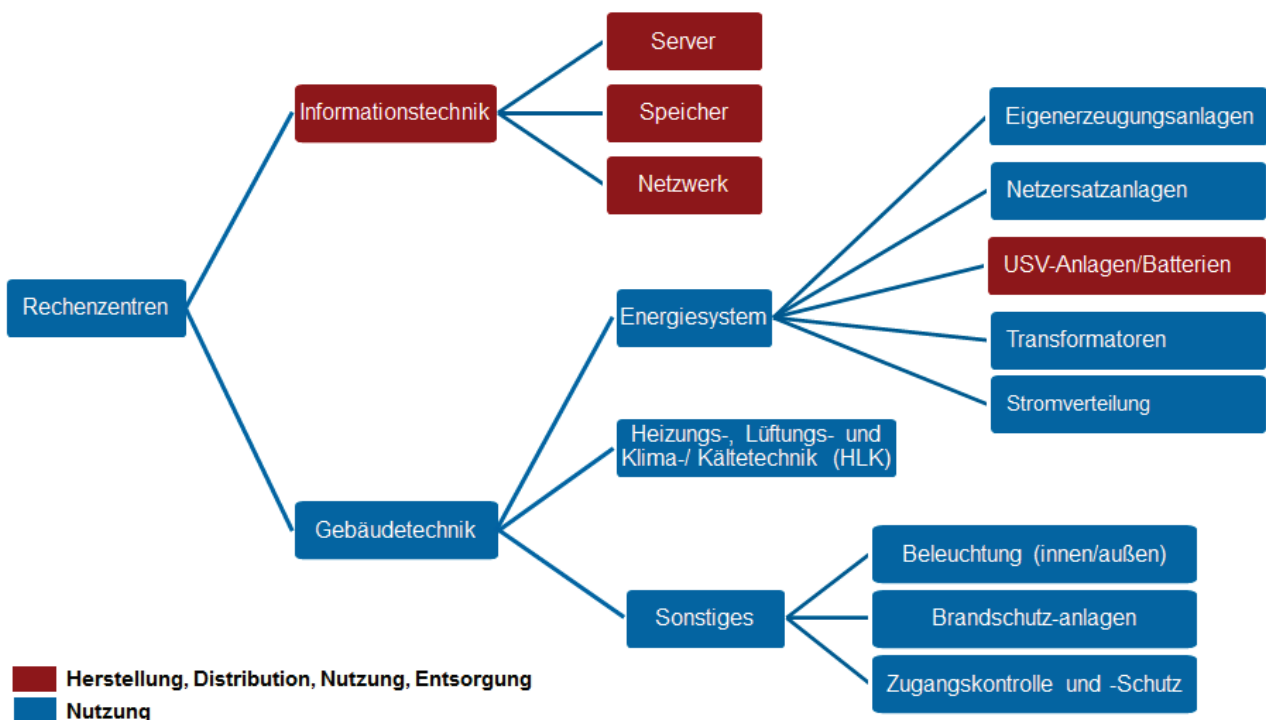
Quelle: (Huang et al. 2015)

4.2. Rechenzentren

Rechenzentren dienen der zentralen Verarbeitung und Aufbewahrung von digitalen Daten. Sie sind an Übertragungsnetze angeschlossen und sind damit durch (dezentrale) digitale Endgeräte erreichbar. Gemäß der bei Schödwell et al. 2018 genutzten Definition, ist „ein Rechenzentrum ein in sich geschlossenes System, das zentralisierte IT-Systeme (Hard- und Software) sowie die zum Betrieb erforderlichen Räumlichkeiten und gebäudetechnischen Versorgungs- und Sicherheitsinfrastrukturen umfasst, um die dauerhafte und zuverlässige Berechnung, Speicherung und Übertragung großer Mengen digitaler Daten zu ermöglichen.“

Geräte, die in Rechenzentren zum Einsatz kommen, sind sowohl Geräte der IT-Technik, wie Server, Speicher und Netzwerktechnik, als auch Gebäudetechnik, die für einen sicheren Betrieb der IT-Technik sorgt (siehe Abbildung 4-10). Unter die Gebäudetechnik fallen insbesondere das Energiesystem (Transformator, Stromverteilung, unterbrechungsfreie Stromversorgung, Netzersatzanlagen), die Klimatisierung, die die Wärme, die bei der Datenverarbeitung entsteht, abführt sowie Sonstige Technik, wie Überwachungseinrichtungen. Je nach Verfügbarkeitsklasse des Rechenzentrums sind die einzelnen Komponenten redundant ausgelegt, also mehrfach vorhanden, damit im Fall eines technischen Defektes oder einer gezielten Abschaltung bei Wartungsarbeiten jeweils Ersatzkomponenten zur Verfügung stehen.

Abbildung 4-10: Komponenten in einem typischen Rechenzentrum

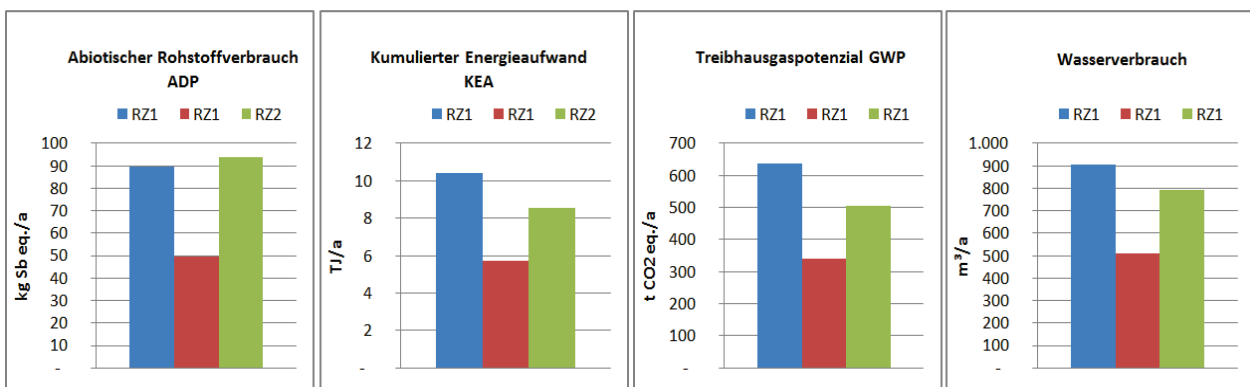


Quelle: Schödwell et al. 2018

Es gibt nur sehr wenige ökobilanzielle Untersuchungen, die den Ressourcenverbrauch von Rechenzentren analysieren (u.a. Whitehead et al. 2015). Eine Schwierigkeit an solchen Untersuchungen ist die Komplexität einer solchen technischen Anlage und die schlechte Datenverfügbarkeit zu der Vielzahl an eingesetzten technischen Komponenten. Hinzu kommt, dass Rechenzentren individuelle technische Ausstattungen und Größen besitzen, sodass eine einzelne Ökobilanz nicht stellvertretend für andere Rechenzentren herangezogen werden kann.

In der Untersuchung zur Beurteilung der Ressourceneffizienz von Rechenzentren von Schödwell et al. 2018 wird ein Bewertungsinstrument für Rechenzentren entwickelt, mit dem anhand der Anzahl der im Rechenzentrum eingebauten Server, Speichersysteme und weiterer Komponenten (siehe rot markierte Blöcke in Abbildung 4-10) sowie dem Energieverbrauch des Rechenzentrums der individuelle Ressourcenverbrauch grob berechnet werden kann. Die Systemgrenzen des Rechenzentrums umfassen nicht die Gebäudehülle. Der Ressourcenverbrauch wird anhand der Wirkungskategorien *Abiotischer Rohstoffverbrauch* (ADP), *Kumulierter Energieaufwand* (KEA), *Treibhausgaspotenzial* (GWP) und *Wasserverbrauch* berechnet. In Abbildung 4-18 werden die Ergebnisse aus der Studie für drei Testrechenzentren dargestellt.

Abbildung 4-11: Ressourcenverbrauch von drei Rechenzentren im Vergleich

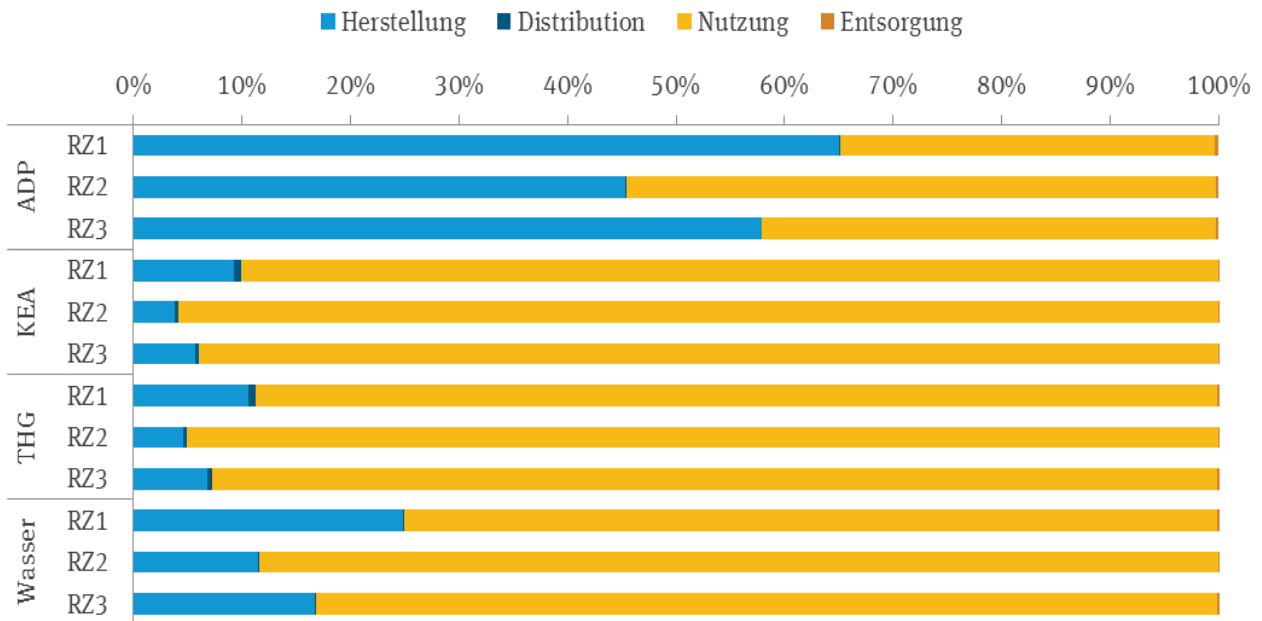


Quelle: eigene Darstellung nach Schödwell et al. 2018

In der Untersuchung von Schödwell et al. 2018 wird gezeigt, dass der Ressourcenverbrauch von Rechenzentren prinzipiell messbar ist, und mit der Größe bzw. Ausstattung und dem Energieverbrauch der Rechenzentren variiert. Eine Vergleichbarkeit der Rechenzentren ist erst dann gegeben, wenn die Leistungsfähigkeit der Rechenzentren (d.h. die Rechenleistung der Server, die Speichermenge und die Netzwerktaetigkeit) identisch ist bzw. durch Performance-Kennzahlen normiert werden kann.

Eine weitere Erkenntnis aus der Untersuchung ist, dass die verschiedenen Lebenszyklusphasen der Komponenten (Herstellung, Distribution, Nutzung und Entsorgung) unterschiedlich stark zum Ressourcenverbrauch beitragen. Bei Energieaufwand (KEA) und Treibhausgaspotenzial (GWP) dominiert eindeutig die Nutzungsphase, d.h. der Stromverbrauch zum Betrieb des Rechenzentrums (siehe Abbildung 4-12). Die Nutzungsphase trägt mit 90 – 95% den wesentlichen Beitrag zu KEA und GWP bei. Anders sieht es jedoch beim Rohstoffverbrauch (ADP) aus. Beim ADP beeinflusst die Herstellung der IKT-Komponenten die Bilanz etwa zur Hälfte. Zwischen 45 und 65% des abiotischen Rohstoffverbrauchs gehen auf die Herstellung der Komponenten zurück, der Rest stammt überwiegend aus der Nutzungsphase. Aus diesen Ergebnissen kann abgeleitet werden, dass bei Rechenzentren (wie auch bei anderen IKT-Geräten) zur Beurteilung des Ressourcenverbrauchs die Herstellung der Geräte nicht vernachlässigt werden darf und eine ausschließliche Betrachtung des Energieverbrauchs in der Nutzungsphase zu kurz greift.

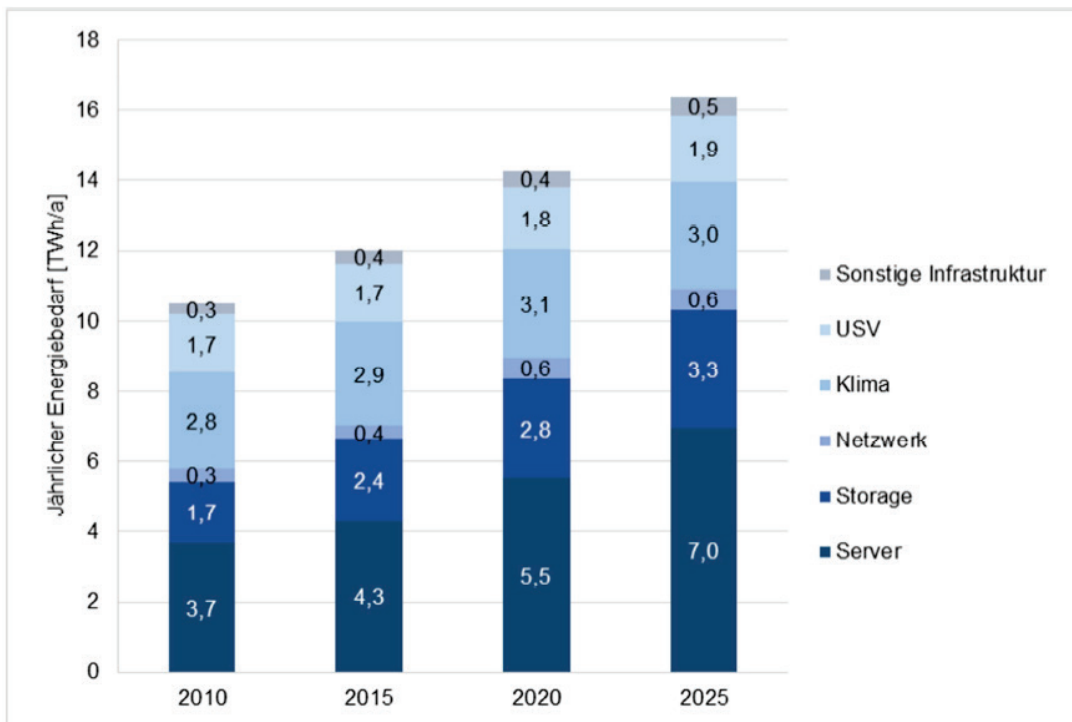
Abbildung 4-12: Verteilung des Ressourcenverbrauchs von Rechenzentren auf Lebenszyklusphasen



Quelle: Schödwell et al. 2018

Die überwiegende Zahl von wissenschaftlichen Untersuchungen zur Umweltwirkung von Rechenzentren reduziert den Betrachtungswinkel auf den Energieverbrauch zum Betrieb von Rechenzentren. So haben Stobbe et al. 2015 im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) die voraussichtliche Entwicklung des IKT-bedingten Strombedarfs in Deutschland berechnet. Die Abbildung 4-13 zeigt den prognostizierten Jahresenergiebedarf von Rechenzentren in Deutschland. Der Energiebedarf steigt von dem statistisch erfassten Wert von rund 12 TWh im Jahr 2015 auf einen prognostizierten Wert von rund 16,4 TWh im Jahr 2025 an. Dies entspricht einer jährlichen Steigerung von 3,2 Prozentpunkten.

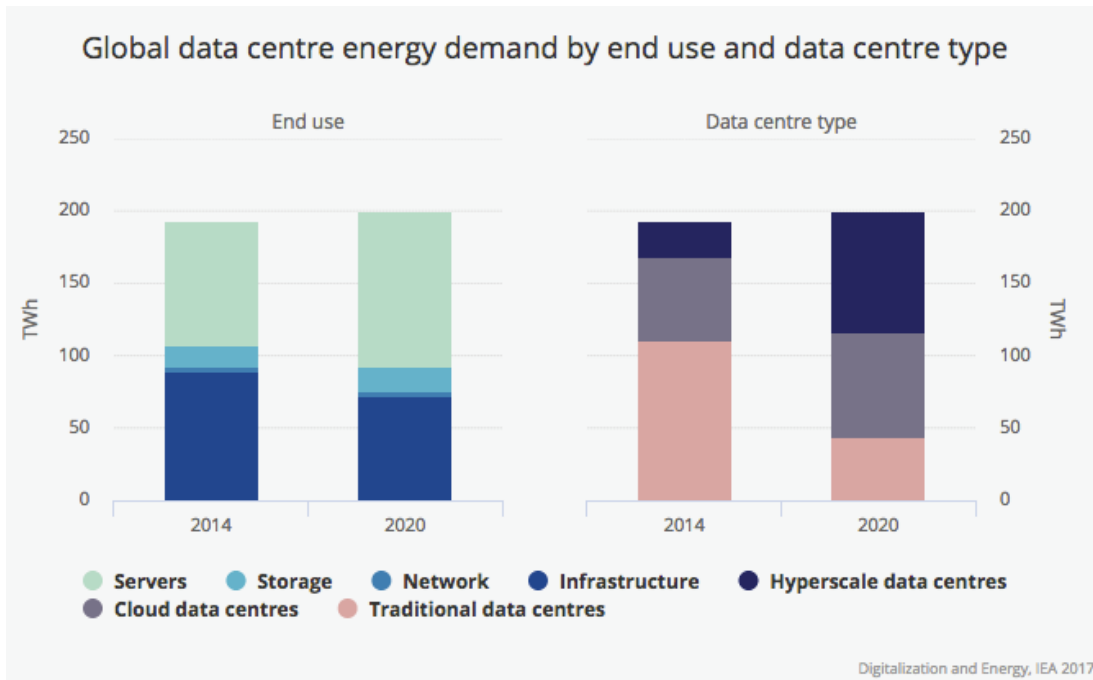
Abbildung 4-13: Prognostizierter Jahresenergiebedarf von Rechenzentren in Deutschland



Quelle: Stobbe et al. 2015

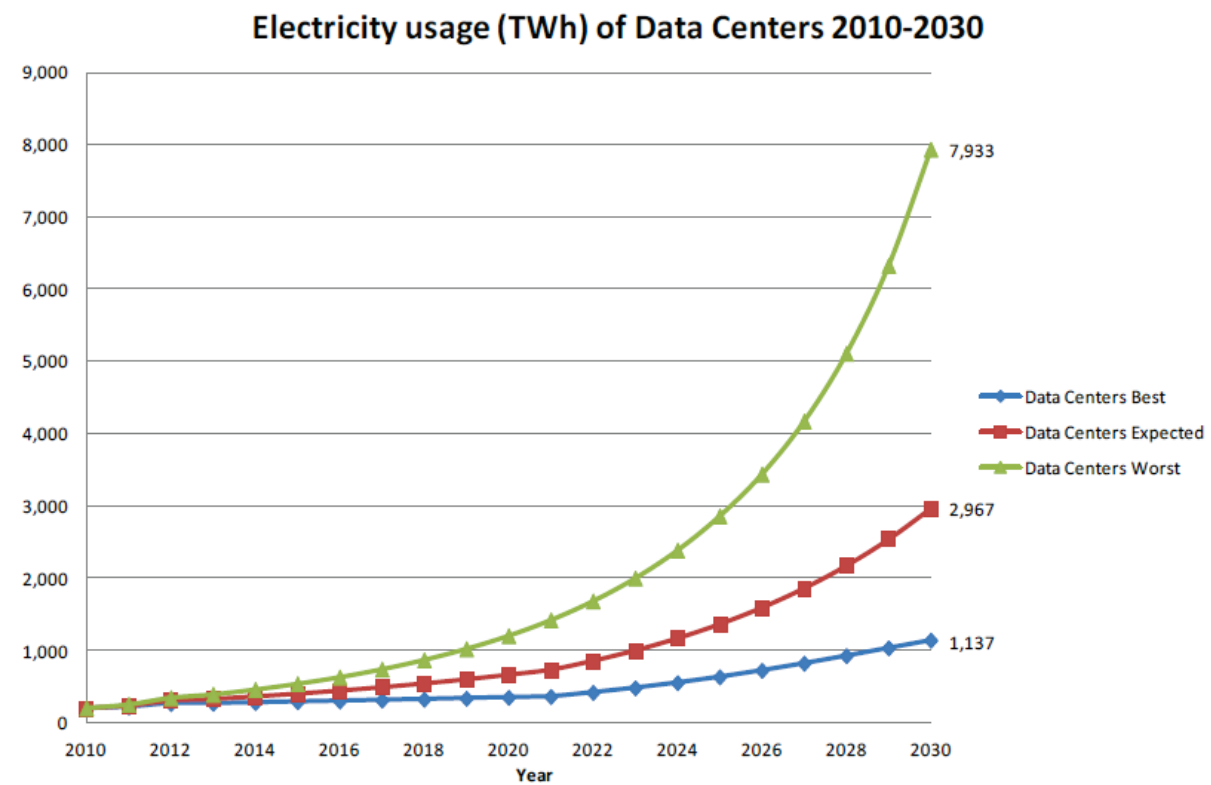
Die Internationale Energieagentur schätzt den globalen Energiebedarfs für Datazentren bis 2020 auf jährlich 200 TWh (siehe Abbildung 4-14) (IEA 2017). Eine vergleichbare Untersuchung stellen auch Andrae und Edler 2015 für den globalen Energiebedarf von Rechenzentren an und kommen dabei auf wesentlich höhere Ergebnisse. Abhängig vom untersuchten Szenario steigt der weltweite Energiebedarf von rund 200 TWh im Jahr 2010 auf Werte zwischen rund 1.100 TWh (best case), 3.000 TWh (expected case) und rund 7.900 TWh (worst case) im Jahr 2030 an (siehe Abbildung 4-15). Bezogen auf den ebenfalls von Andrae und Edler 2015 prognostizierten weltweiten Strombedarf im Jahr 2030 von rund 28.000 TWh liegt damit der Anteil der Elektrizität, der von Rechenzentren benötigt wird, zwischen 4 Prozent (best case), 11 Prozent (expected case) und 28 Prozent (worst case).

Abbildung 4-14: Prognose des globalen Energiebedarfs für Datazentren bis 2020



Quelle: (IEA 2017)

Abbildung 4-15: Prognostizierter Jahresenergiebedarf von Rechenzentren weltweit bis 2030



Quelle: Andrae und Edler 2015

Um den Ressourcenaufwand von Rechenzentren weltweit zu berechnen, könnte prinzipiell ausgehend von der Anzahl an weltweit installierten Servern und Speichersystemen auf den globalen Aufwand hochgerechnet werden. Einen Baustein dazu liefert die Materialbilanz, die das VDI Zentrum Ressourceneffizienz 2017 durchgeführt hat (siehe Tabelle 4-13). Für zwei verschiedene Server-Bauformen (Rack-Server und Blade-Server) und ein exemplarisches Speichersystem untersucht diese Studie die Massen der einzelnen eingesetzten Teilkomponenten.

Tabelle 4-13: Massenbilanz für exemplarische Server und Enterprise-Storage (VDI)

Eingesetzte Materialien	Rack Server	Blade-System (mit 8 Servern)	Enterprise Storage
Speicherkapazität	96 GB	768 GB	40 TB
Gestell	12,27 kg	-	5,44 kg
Stahl	2 kg	128,36 kg	26,38 kg
Aluminium	2,1 kg	7,73 kg	9,49 kg
Kunststoffe (verschiedene)	1,6 kg	2,41 kg	2,25 kg
Kupfer	0,83 kg	2,17 kg	0,92 kg
Leiterplatten	0,98 kg	3,24 kg	1,58 kg
Elektronik	1,24 kg	5,43 kg	3,4 kg
Steuer-/Hauptplatine	1,67 kg	6,54 kg	5,04 kg
Sonstige Materialien (z. B. Zink, Kabel, Papier etc.)	0,33 kg	0,91 kg	0,39 kg
Kritische Rohstoffe in Leiterplatten und Festplattenlaufwerken			
Neodym	4,18 g	16,70 g	34,83 g
Silizium	11,01 g	24,40 g	28,53 g
Dysprosium	< 1 g	< 1 g	2 g
Praseodym	< 1 g	2,32 g	4,84 g
Palladium	< 1 g	2,06 g	2,41 g
Platin	< 1 g	< 1 g	< 1 g
Antimon	< 1 g	< 1 g	< 1 g
Gallium			
Germanium			
Kobalt			
Gesamtgewicht	23,02 kg	156,79 kg	54,89 kg

Quelle: VDI Zentrum Ressourceneffizienz 2017

Eine vergleichbare Massenbilanz wird auch in der Ökodesign-Vorstudie für Server aufgestellt (Berwald et al. 2015). Die Ergebnisse bezogen auf die massenmäßig überwiegenden Materialien liegen dabei in einer ähnlichen Größenordnung wie die vom VDI Zentrum Ressourceneffizienz 2017 (siehe Tabelle 4-14).

Tabelle 4-14: Massenbilanz für einen exemplarischen Rack-Server (Ökodesign-Vorstudie)

Component	Material	Weight (g)	Component	Material	Weight (g)
Chassis	Metal Body	12 265	PSUs (2*400W)	Low-alloyed steel	1 027
	Plastics	348		Chromium steel	66
	Plastics	282		Brass	42
	Aluminium	249		Copper	9
	Copper	179		Zinc	7
	Electronic components	131		Aluminium	491
Fans (4)	Steel	386		High Density Polyethylene	184
	Copper	78		Polyvinylchloride (PVC)	92
	Iron based	55		Paper	50
	Plastic (PBT-GF30)	206		Electronic components	1 101
	Plastic (PCABSFR40)	21		Solder	31
	Plastic (undefined)	200		PCB	326
HDDs (4)	Steel	12	CPU Heat Sink	Copper	442
	Low alloyed steel	222	Steel	140	
	Aluminium	1 335	Mainboard	Controller board	1 667
	PCB	179	Memory	PCB	97
ODD	Low alloyed steel	115	IC	38	
	Copper	7	Expansion Card	PCB	349
	Aluminium	1	Cables	Brass	7
	High Density Polyethylene (HDPE)	28		Copper	81
	Acrylonitrile-Butadiene-Styrene	12		Zinc 0.166 kg	96
	Polycarbonate (PC)	7		High Density Polyethylene	104
	Electronic components (capacitors,	8		Polyvinylchloride (PVC)	145
	Solder	2		Polyurethane (PUR)	2
PCB	9	Synthetic rubber	35		
CPUs (2)	Copper	31	Packaging	Cartons	3629
	Gold	0,4	HDPE/ unspecified plastics	78	
	PCB	21	GPPS/ Styrofoam	1 026	
	IC	2			
Total weight of BC-1: 27 748 g					

Quelle: Berwald et al. 2015

Grundsätzlich sind beide Bilanzen jedoch nur eingeschränkt für eine Hochrechnung des Ressourcenverbrauchs verwendbar. Die Massenbilanz beinhaltet nur die im Produkt befindlichen Mengen an Rohstoffen und lässt den Ressourcenverbrauch für die Herstellung der jeweiligen Bauteile oder Rohstoffe unberücksichtigt. So ist beispielsweise der Aufwand für die Herstellung von Silizium-Chips ungleich aufwändiger als der von Stahl. Eine weitere Schwierigkeit stellt die schnelle techni-

sche Entwicklung im Bereich der IKT-Komponenten dar, sodass die Massenbilanz eines aktuellen Geräts (z.B. aus dem Jahr 2015) nicht auf zukünftige Geräte übertragen werden kann.

4.3. Übertragungsnetze

Übertragungsnetze stellen die Infrastruktur zur Übertragung von Daten von Endgeräten zu Rechenzentren und wieder zurück dar. Das Übertragungsnetzwerk unterteilt sich dabei in verschiedene Hierarchiestufen, die vereinfacht in die drei Netzwerkebenen *Zugangsnetz*, *Aggregationsnetz* und *Backbone-Netz* (Kernnetz) eingeteilt werden können (siehe Tabelle 4-15). Den jeweiligen Netzwerkebenen sind dabei neben den jeweiligen Kabeln immer auch technische Komponenten als Netzwerkknotenpunkte, Verteiler und Verstärker zugeordnet.

Tabelle 4-15: IKT- und Infrastrukturkomponenten in Kommunikationsnetzwerken

Zugangsnetz	Aggregationsnetz	Backbone-Netz
<ul style="list-style-type: none"> • Splitter/Abzweiger, • Multifunktionsgehäuse, • Kupfer- und Glasfaserkabel, • Kabelschächte, • Glasfaserkabel, • Kühlanlagen, • Strom- und Notstromversorgung 	<ul style="list-style-type: none"> • Aggregationsswitches, • Splitter, • Kupfer- und Glasfaserkabel, • Broadband remote access server (BRAS), • Edge-Router, • Kühlanlagen, • Strom- und Notstromversorgung 	<ul style="list-style-type: none"> • Router, • Glasfaserkabel, • Kühlanlagen, • Strom- und Notstromversorgung

Quelle: eigene Darstellung

Neben den kabelgebundenen Zugangsnetzen, bilden auch Mobilfunknetze eine direkte Schnittstelle zu mobilen IKT-Endgeräten. Die primären Bestandteile des Mobilfunknetzes unterteilen sich gemäß Scharp 2011 in die vier Bereiche: *Basisstationen*, *Basisstation-Controller*, *Mobile Switching Center* sowie *Operation and Maintenance Center* (siehe Tabelle 4-16). Die durch Mobilgeräte gesendeten digitalen Signale werden per Funk an die Basisstationen übertragen. Die Basisstationen leiten dann die digitalen Signale an den Controller, der über die Nutzung der Funkkanäle und Leistungsregelung entscheidet (Scharp 2011). Das Mobil-Core ist das Kernsystem, das die Verbindungen mit den anderen Mobilfunknetzen bzw. Festnetzten vermittelt und auch die Daten bzw. Basisstation Controller verwaltet. Das Mobilfunknetz wird durch OMC (Operation and Maintenance center) gesteuert (Scharp 2011).

Im heutigen digitalen Mobilfunknetz existieren (je nach lokalem Ausstattungsgrad) mehrere Technologiegeneration nebeneinander: 2G (GSM), 3G (UMTS) und 4G (LTE) mit jeweils zunehmender Datenübertragungsgeschwindigkeit. Brodersen 2017 geht davon aus, dass ab etwa dem Jahr 2020 der neue Mobilfunkstandard 5G flächendeckend eingeführt wird. Die 5G-Netze werden als Grundlage für die breite Umsetzung des Internets der Dinge betrachtet.

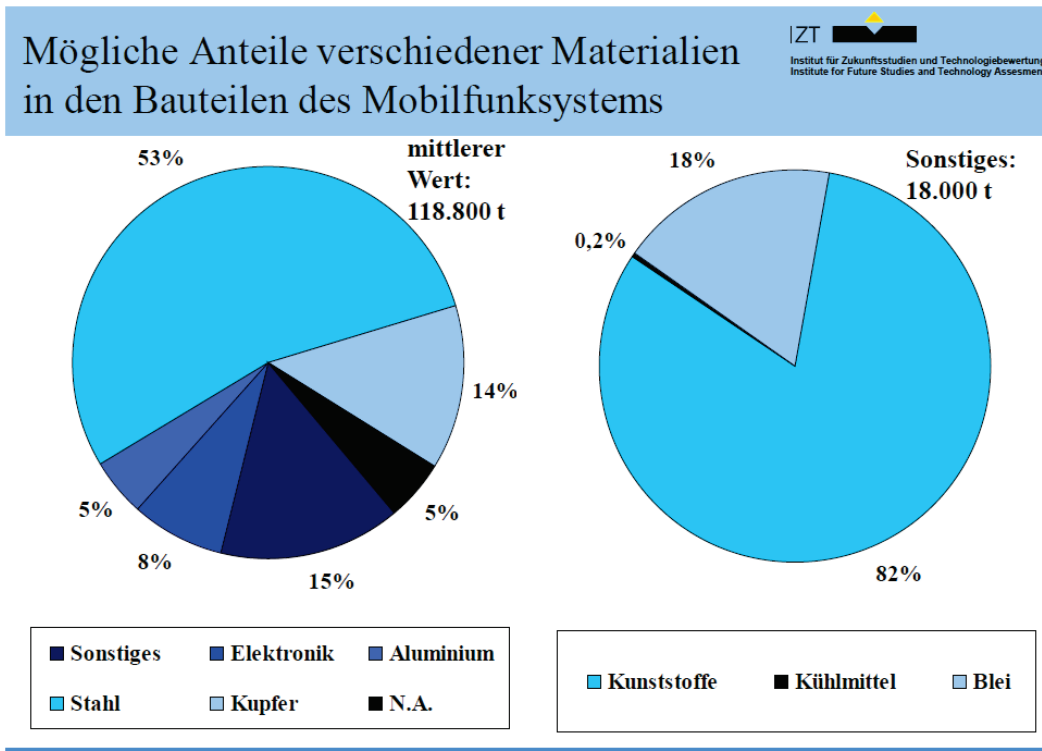
Tabelle 4-16: Auswahl typischer IKT- und Infrastrukturkomponenten im Mobilfunknetz

Basisstationen	Basisstation Controller	Mobile Switching Center	Operation and Maintenance Center
<ul style="list-style-type: none"> • Batterien, • Netzteile, • Einschübe, • Kühlung, • Ventilator, • Antennen, • Antennenmasten, • Blitzschutz, • Verstärker, • Transceiver, • Exchange Terminal, • Core Basis Moduls, • Kabel, • Gehäuse 	<ul style="list-style-type: none"> • Controller (BSC/RNC), • Racks, • Kühlanlagen, • Strom- und Notstromversorgung 	<ul style="list-style-type: none"> • Router, • TRAU (Transcoding and Rate Adaptation Unit), • Strom- und Notstromversorgung, • USV-Anlage, • Broadband Access Unit, • Media Gateway, • Richtfunkvernetzung in Racks, • GPS Clock, • Kühlanlage, • Geräte für Datenbanksysteme und Schnittstellensystem (z.B. GGSN-Geräte [Gateway GPRS Support Nodes], SGSN-Geräte [Serving GPRS Support Nodes]) 	<ul style="list-style-type: none"> • RGU (Radio Gateway Units), • WS-GU (Work Station Gateway Units), • OMC-Server, • Protocol-Server, • Firewall Server, • Switches, • PCs, • ACP (Administrative Control Panel), • Strom- und Notstromversorgung

Quelle: Scharp 2011

Die Studie *Materialbestand und Materialflüsse der IuK-Infrastrukturen* (Scharp 2011) untersucht die stoffliche Zusammensetzung von Bestandteilen des Mobilfunknetzes in Deutschland und stellt fest, dass die Datengrundlage sehr dünn ist und nur grobe Abschätzungen vorgenommen werden können. Abbildung 4-16 zeigt die geschätzte Aufteilung der eingesetzten Materialien und Komponenten des Mobilfunknetzes in Deutschland für das Jahr 2008 der Technologien 2G (GSM) und 3G (UMTS). Insgesamt wird abgeschätzt, dass im deutschen Mobilfunknetz 136.000 Tonnen Metalle und sonstige Materialien gebunden sind. Den größten Anteil macht Stahl mit ca. 63.000 Tonnen aus, der vor allem in den Mastkonstruktionen, Rack-Gehäusen und Installationsmaterialien eingesetzt wird. Die Menge an Aluminium wurde mit rund 18.000 Tonnen abgeschätzt, Kupfer mit rund 17.000 Tonnen. Die Elektronik wird mit einer Menge von rund 9.000 Tonnen quantifiziert. Der Ressourcenaufwand zur Herstellung der jeweiligen Materialien bzw. Komponenten ist dabei noch nicht berücksichtigt. Aus Ökobilanz-Studien (z.B. Schödwel et al. 2018) ist bekannt, dass der Aufwand zur Herstellung von Elektronikkomponenten mit einem erheblichen Ressourcenaufwand verbunden ist. Die Massenbilanz von Scharp 2011 ist daher nur bedingt aussagekräftig.

Abbildung 4-16: Geschätzte Anteile des Materialbestands des Mobilfunknetzes (GSM und UMTS) in Deutschland im Jahr 2008



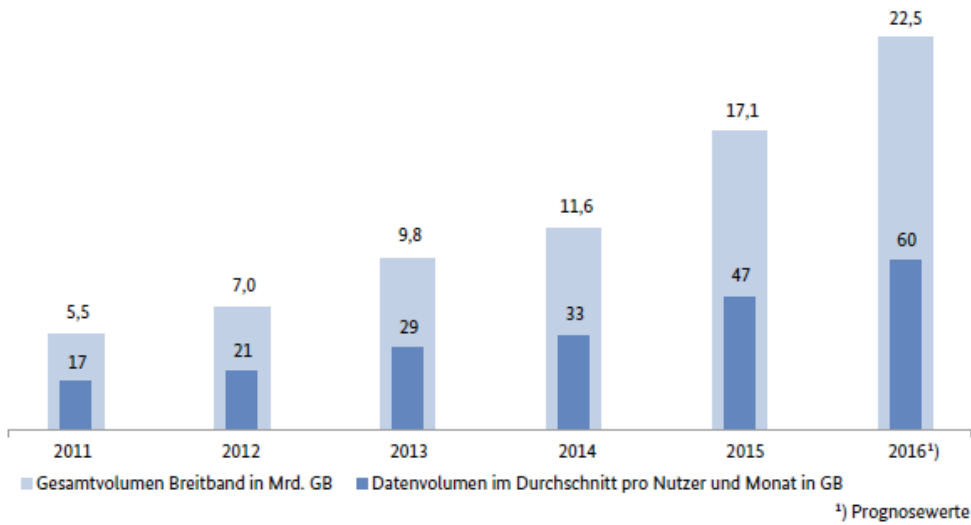
Dr. Michael Scharp/MaRess

Quelle: Scharp 2011

Die Digitalisierung führt zu einer stetigen Steigerung des übertragenen Datenvolumens im Netzwerk. Die nachfolgenden Abbildungen zeigen die Entwicklung des Datenvolumens in Deutschland im Festnetz (Abbildung 4-17) und im Mobilfunknetz (Abbildung 4-18). Im Jahr 2016 wurden über Festnetze 22,5 Exabyte (Exa = 10^{18}) an Daten übertragen. Bezogen auf einen einzelnen Nutzer sind dies im Jahr 2016 ca. 60 Gigabyte Datenvolumen pro Monat (dies entspricht dem Datenvolumen von rund 13 DVDs). Über die Mobilfunknetze wurde in Deutschland im Jahr 2016 eine Datenmenge von 0,9 Exabyte übertragen.

Abbildung 4-17: Datenvolumen in Festnetzen von 2011-2016 in Deutschland

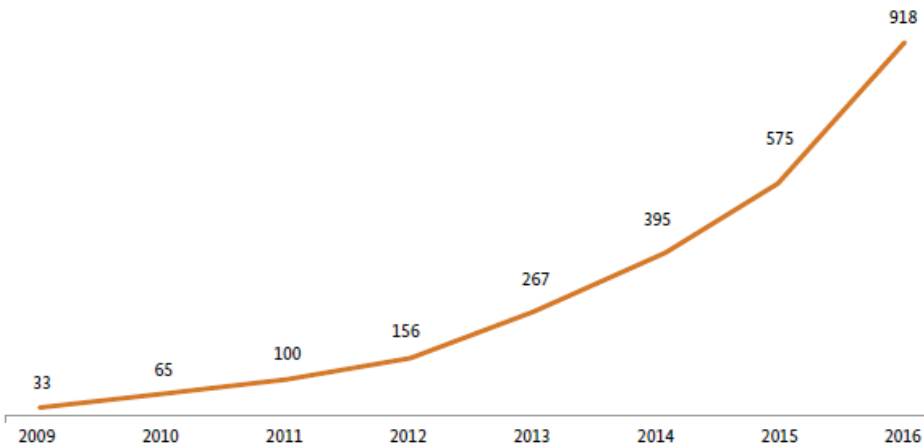
Datenvolumen Breitband in Festnetzen



Quelle: Jahresbericht der Bundesnetzagentur (bnetza 2017)

Abbildung 4-18: Datenvolumen in Mobilfunknetzen von 2009-2016 in Deutschland

Datenvolumen im Mobilfunk
in Mio. GB



Quelle: (bnetza 2017)

Auf globaler Ebene zeichnet sich ebenfalls eine starke Zunahme des übertragenen Datenvolumens ab (Cisco 2017). Im Jahr 2016 betrug das globale digitale IP-Verkehrsvolumen 1,2 Zettabyte (Zetta = 10^{21}) *pro Jahr*. Bis 2021 wird erwartet, dass das globale IP-Verkehrsvolumen 3,3 Zettabyte pro Jahr erreichen wird. Für die Dimensionierung der Datenübertragungsinfrastrukturen wird allerdings nicht der Durchschnittswert der Kapazitätsnachfrage zugrunde gelegt, sondern die erwartete Spitzenauslastung (sogenannter Busy-Hour Internet-Verkehr). Letzterer wächst schneller als die durchschnittliche Auslastung des Internetverkehrs. Der Busy-Hour-Internetverkehr wird sich

gemäß Cisco 2017 zwischen 2016 und 2021 um einen Faktor von 4,6 erhöhen. Es wird prognostiziert, dass der Datenverkehr durch Smartphones im Jahr 2021 den Datenverkehr durch PCs übersteigen wird. Im Jahr 2016 hatte der Datenverkehr durch PCs einen Anteil von 46% des gesamten IP-Verkehrsvolumens und Smartphones lagen bei 13%. Im Jahr 2021 wird das Datenvolumen durch Smartphone auf 33% steigen und das Datenvolumen durch PCs auf 25% sinken. Der restliche Anteil des Verkehrsvolumens wird durch digitale TV Geräte, Tablets, M2M (Machine-to-Machine⁵) entstehen.

Tabelle 4-17 zeigt die Entwicklung des Datenvolumens auf globaler Ebene nach Segmenten und Jahren angegeben in Petabytes (Peta = 10¹⁵) pro Monat (Cisco 2017). Der Prozentwert zeigt jeweils den Anteil des Datenverkehrs am monatlichen Gesamtvolumen an. Es wird erwartet, dass der gesamte Datenverkehr über das Internet (total IP traffic) von rund 100.000 Petabytes im Jahr 2016 auf rund 280.000 Petabytes im Jahr 2021 ansteigen wird. Dies entspricht einer jährlichen Steigerungsrate von rund 24 Prozent.

Tabelle 4-17: Global IP-Verkehrsvolumen pro Monat nach Jahren und Segmenten

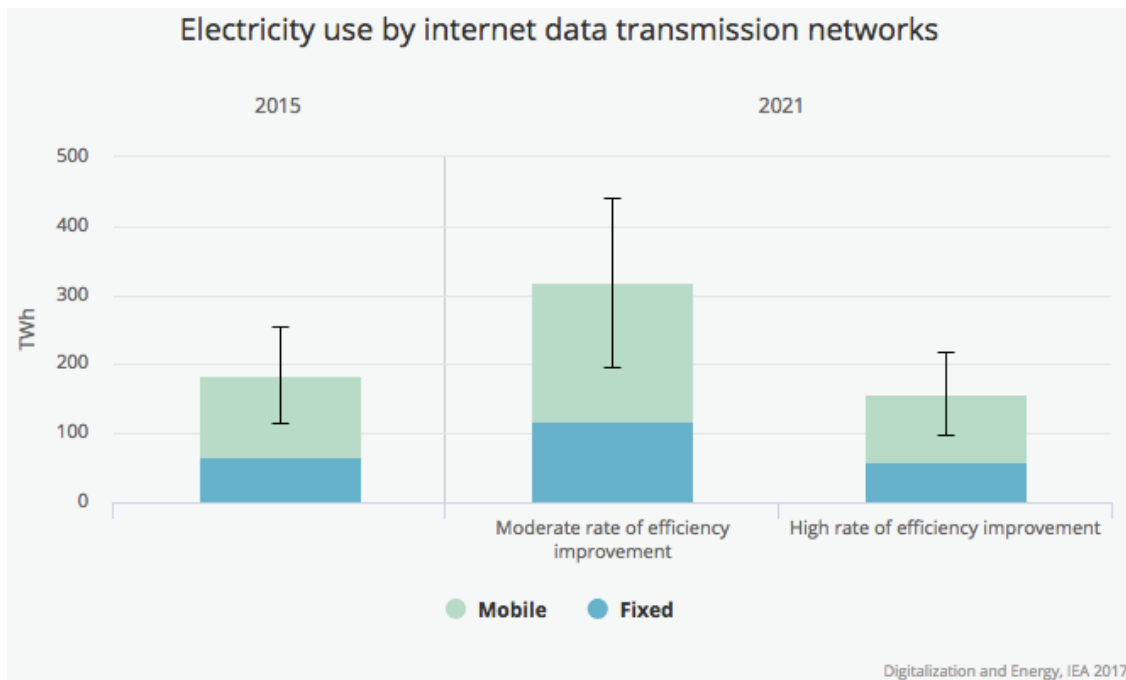
	2016		2017		2018		2019		2020		2021	
By Type (Petabytes [PB] per Month)												
Fixed Internet	65.942	69%	83.371	69%	102.960	68%	127.008	68%	155.121	68%	187.386	67%
Managed IP	22.911	24%	27.140	22%	31.304	21%	35.226	19%	38.908	17%	42.452	15%
Mobile Data	7.201	7%	11.183	9%	16.646	11%	24.220	13%	34.382	15%	48.270	17%
By Segment (PB per Month)												
Consumer	78.250	81%	99.777	82%	124.689	83%	154.935	83%	190.474	83%	232.655	84%
Business	17.804	19%	21.917	18%	26.220	17%	31.518	17%	37.937	17%	45.452	16%
By Geography (PB per Month)												
Asia Pacific	33.505	35%	43.169	35%	54.402	36%	68.764	37%	86.068	38%	107.655	39%
North America	33.648	35%	42.267	35%	51.722	34%	62.330	33%	73.741	32%	85.047	31%
Western Europe	14.014	15%	17.396	14%	21.167	14%	25.710	14%	30.971	14%	37.393	13%
Central and Eastern Europe	6.210	6%	7.451	6%	8.940	6%	11.016	6%	13.781	6%	17.059	6%
Middle East and Africa	2.679	3%	3.910	3%	5.538	4%	7.773	4%	10.941	5%	15.490	6%
Latin America	5.999	6%	7.502	6%	9.141	6%	10.861	6%	12.909	6%	15.464	6%
Total (PB) per Month												
Total IP Traffic	96.054	100%	121.694	100%	150.910	100%	186.453	100%	228.411	100%	278.108	100%

Quelle: eigene Darstellung nach Cisco 2017

Auf globaler Ebene rechnet die Internationale Energieagentur für die Internet-basierte Datenübertragung mit einem Bedarf an elektrischer Energie von jährlich etwa 320 TWh in 2021 (siehe Abbildung 4-19) (IEA 2017).

⁵ Als M2M bezeichnet man den automatisierten Datenverkehr bzw. Kommunikation zwischen Geräten bzw. Maschinen, Automaten, Fahrzeugen, Containern oder Überwachungssystemen untereinander.

Abbildung 4-19: Prognose des globalen Energiebedarfs für das Internet bis 2021



Quelle: (IEA 2017)

Das Szenario *On Global Electricity Usage of Communication Technology: Trends to 2030* von Andrae und Edler (2015) prognostiziert den Stromverbrauch, der durch Übertragungsnetze verursacht wird für den Zeitraum 2010 bis 2030 (siehe Tabelle 4-18). Im besten Fall (best) steigt der weltweite Stromverbrauch für das Festnetz (wired), WLAN (WiFi) und Mobilfunknetz (mobile) von 339 TWh im Jahr 2010 auf 1.012 TWh im Jahr 2030 an, was einer jährlichen Steigerung von 6 Prozent entspricht. Im erwarteten Szenario (expected) steigt der weltweite Stromverbrauch für die Übertragungsnetze von 408 TWh im Jahr 2010 auf 3.725 TWh im Jahr 2030 an, was einer jährlichen Steigerung von 12 Prozent entspricht. Im energieintensivsten Fall (worst) erfolgt ein Anstieg von 546 TWh im Jahr 2010 auf 15.208 TWh im Jahr 2030, bei einer jährlichen Steigerung von 18 Prozent.

Tabelle 4-18: Prognostizierter jährlicher Stromverbrauch von Festnetz, WLAN und Mobilfunknetzen

TWh/a	2010			2020			2030		
	Best	Ex-pected	Worse	Best	Ex-pected	Worse	Best	Ex-pected	Worse
Wired	162	162	162	217	439	840	825	2.641	7.912
WiFi	42	42	42	83	185	376	153	889	4.529
Mobile	135	204	342	26	98	570	34	196	2.767
Total	339	408	546	326	722	1.786	1.012	3.725	15.208

Quelle: eigene Darstellung nach Andrae und Edler (2015)

5. Schlussfolgerungen

Im Rahmen dieses Kurzgutachtens wurde mittels einer Literaturlauswertung der Versuch unternommen, eine qualifizierte Abschätzung zur Entwicklung des globalen Bedarfs an Energie und Ressourcen der Digitalisierung vorzunehmen. Außerdem wurden verfügbare Informationen über Projektionen der zukünftigen technologischen Entwicklung digitaler Technologien sowie deren erwartete Marktdiffusion zusammengetragen, um eine Abschätzung zukünftiger Auswirkungen auf den globalen Energie- und Ressourcenbedarf zu unterstützen.

Bei der Recherche hat sich gezeigt, dass der Begriff Digitalisierung eine äußerst heterogene Bandbreite verschiedener Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT), Datenverarbeitungsmethoden, Inhalten (Informationen) und Geschäftsmodellen umfasst. In der öffentlichen Debatte um die Digitalisierung wird der Begriff weitgehend als Metapher für die gesellschaftliche und ökonomische Transformation verstanden, die durch die allgegenwärtige Nutzung der IKT ausgelöst wird. Infolge dieser begrifflichen Vielschichtigkeit des Untersuchungsgegenstands lässt sich die Ausgangsfrage dieses Kurzgutachtens nicht ohne weiteres auf Grundlage der vorhandenen Studien beantworten. Sowohl bezogen auf die materielle Zusammensetzung des IKT-Bestandes als auch auf die zukünftige Entwicklung einzelner Technologien und deren Ressourcenbedarf ist die Datenlage unzureichend. Im Zuge der Literaturrecherche konnten keine Studien oder Forschungsvorhaben identifiziert werden, welche eine qualifizierte Aussage zum globalen Bedarf an Energie und Ressourcen für die gesamte Bandbreite des dem Begriff Digitalisierung zuzurechnenden Bezugsrahmens ermöglichen.

Stattdessen wurde eine Vielzahl von Studien identifiziert und ausgewertet, welche jeweils einen Teilaspekt der Digitalisierung thematisieren und sehr unterschiedliche Bezüge zu den energetischen und ressourcenbezogenen Aspekten herstellen. Zudem unterscheiden sich die betrachteten Literaturquellen erheblich hinsichtlich der ihnen jeweils zugrundeliegenden Betrachtungsgegenstände, des zeitlichen und geografischen Geltungsbereiches, der gewählten Datenquellen und Annahmen sowie hinsichtlich der jeweils angewendeten Methodik. Eine einfache arithmetische Zusammenfassung und Hochrechnung der Ergebnisse dieser vielfältigen Informationsquellen ist aus diesem Grund weder sinnvoll noch ohne weiteres möglich. Dies gilt insbesondere für eine Extrapolation des Ressourcenbedarfs auf den globalen Maßstab sowie die Projektion gegenwärtiger Trends in die Zukunft. Demzufolge ist eine Gesamtschau der vorliegenden Literaturinformationen nur auf einem hochaggregierten Level möglich. Die in diesem Kurzgutachten zusammengetragenen Informationen zeigen insofern lediglich einzelne Schlaglichter auf das facettenreiche Thema Digitalisierung.

Es wurde zunächst gezeigt, dass die technologische Innovation im Halbleitersektor, welche die Basistechnologie der Digitalisierung (insbesondere die Mikroelektronik) bereitstellt, mittelfristig auf physikalische Grenzen der weiteren Miniaturisierung von Halbleiterstrukturen treffen wird. Dies wird nicht ohne Auswirkungen auf die technologische und stoffliche Beschaffenheit der IKT bleiben. Zugleich stehen mittelfristig völlig neue Datenverarbeitungstechnologien wie das Quanten-Computing oder DNA-Computing an der Schwelle zur Anwendungsreife. Mit diesen zu erwartenden Umbrüchen bei den Basistechnologien der Digitalisierung werden sich nicht nur Auswirkungen auf den Ressourcenbedarf der IKT-Hardware selbst ergeben, sondern vor allem auch hinsichtlich der Ressourcenproduktivität der zentralen Anwendungsbereiche der IKT (Datenverarbeitung, Datenspeicherung, Datenübertragung). Diese Effekte betreffen vorrangig die infrastrukturellen Bereiche der Digitalisierung: Rechenzentren und Datennetze (Internet-Backbone) sowie alle darauf aufbauenden Cloud-Dienste. Eine Extrapolation der gegenwärtigen Trends in den Bereichen Rechenzentren und Übertragungsnetze ist vor dem Hintergrund der oben skizzierten technologischen Umbrüche allenfalls für kurzfristige Entwicklungen sinnvoll.

Aus den in Kapiteln 4.2 und 4.3 zusammengestellten Informationen lässt sich schlussfolgern, dass der globale Wachstumstrend des in Rechenzentren verarbeiteten und via Datenübertragungs-Infrastrukturen ausgetauschten Datenvolumens weiterhin anhalten wird. Daraus resultiert auch eine weitere Zunahme der Anzahl von digitalen Infrastrukturen wie Rechenzentren und Datennetzen etc., einschließlich der dafür erforderlichen nicht-digitalen Hilfseinrichtungen (Stromversorgung, Kühlung). Als Konsequenz daraus wird mit einer weiteren Zunahme des globalen materiellen Ressourcenbedarfs für die Bereitstellung dieser IKT-Bestandteile sowie des Energieverbrauchs für deren Betrieb gerechnet. Nach Prognosen der Internationalen Energieagentur wird der globale Energiebedarf für Rechenzentren im Jahr 2020 bei jährlich 200 TWh liegen. Hinzu kommt ein wahrscheinlicher Energiebedarf für Internet-Datenübertragungsnetze von etwas über 300 TWh im Jahr 2021 (IEA 2017). Auch nach 2020 rechnet die IEA trotz Verbesserungen der Energieeffizienz von Rechenzentren mit einer starken Zunahme des Energieverbrauchs. Bei Datennetzwerken könnte die konsequente Nutzung von Effizienzpotenzialen (vor allem bei mobilen Netzwerken) hingegen zu einem langsameren Anstieg oder sogar zu leichten Rückgängen im globalen Energiebedarf führen. Einzelne weiterreichende Trendszenarien (z.B. Andrae und Edler 2015) zeigen darüber hinaus enorme absolute Steigerungen, die – sofern sie nicht auf unrealistischen Annahmen basieren – einen sehr viel höheren Energie- und Ressourcenbedarf in Zukunft voraussagen.

Auf der Endgeräte-seitigen Sphäre der Digitalisierung (sprich: mit Netzwerken verbundene Personal-Computer, Laptops, Smartphones, Wearables, IoT-Geräte, digitale Unterhaltungselektronik etc.) ist ein Überblick zum globalen Energie- und Ressourcenbedarf wesentlich schwieriger. Die außerordentliche Diversität dieser digitalen Geräte und Komponenten bedingt eine schwer überschaubare Heterogenität in der stofflichen Zusammensetzung dieser Endgeräte und auch der gesamten Masseströme, welche wiederum von deren Funktionalität, Design und der Marktdurchdringung dieser Produkte abhängt.

Ein hervorstechendes Merkmal der digitalen Endgeräte für Konsumenten ist deren – im Vergleich zu digitalen Infrastrukturen – recht kurze Lebensdauer. Digitale Produkte in diesem Segment werden häufig nach kurzer Gebrauchsdauer stillgelegt und durch neue Produkte ersetzt. Dieses als Obsoleszenz bezeichnete Problem zieht einerseits einen erhöhten Ressourcenbedarf zur Herstellung neuer Produkte nach sich. Zum anderen steigt dadurch das Aufkommen an Elektronikschrott und verstärkt die damit verbundenen ökologischen, sozialen und ökonomischen Probleme. Der technologische Innovationstrend zum Internet der Dinge (IoT), Pervasive Computing und Wearable Computing wird dieses Problem aller Voraussicht nach noch verstärken, weil diese Produkte nicht nur klein und kostengünstig sein sollen, sondern auch oft mit anderen kurzlebigen Gebrauchsgütern wie etwa Textilien oder Verpackungen kombiniert werden.

Die in Kapitel 4.1 zusammengefassten Fallbeispiele aus der Literatur verdeutlichen das breitgefächerte Materialinventar digitaler Endgeräte und die damit verbundenen Ressourcenverluste im Elektronikschrott. Insbesondere die hochwertigen bzw. leistungsfähigen digitalen Endgeräte zeichnen sich durch einen hohen Gehalt an wertvollen bzw. knappen Werkstoffen aus. Insbesondere sind kritische Rohmaterialien wie Platingruppen-Metalle, Seltene Erden-Elemente und verschiedene Edelmetalle und rare Halbleitermaterialien essenzielle Bestandteile der IKT. Die gleichen Materialien zeichnen sich durch ihren erheblichen energetischen Rucksack und Ressourcenverbrauch bei der Rohmaterialgewinnung und der Weiterverarbeitung aus. Außerdem enthält die IKT-Hardware üblicherweise ein schwer rezyklierbares Gemisch aus Wertstoffen und toxischen Materialien. Dadurch wird eine Ressourcenrückgewinnung erheblich erschwert und kann seinerseits zu erheblichen Belastungen für Umwelt und Gesundheit führen. Aus den genannten Gründen bleibt festzuhalten, dass der Verbrauch stofflicher, energetischer und natürlicher Ressourcen für die Digitalisierung erheblich ist und weit über das Masseninventar der eigentlichen digitalen Hardware hinausgeht. Aus der in dieser Studie ausgewerteten Literatur lassen sich trotz beobachteten Stei-

gerungen der Energie- und Ressourceneffizienz von IKT keine Hinweise auf eine Trendwende in der Zunahme des absoluten Energie- und Ressourcenverbrauchs der Digitalisierung ableiten.

Empfehlungen

- Es besteht Bedarf, eine bessere Transparenz beim Ressourcenverbrauch von IKT-Technologien zu erhalten. Dies kann nur durch verbesserte Verfügbarkeit von Marktstatistiken und Untersuchungen zum Materialinventar digitaler Hardware erreicht werden.
- Damit der Ressourcenbedarf der Digitalisierung im Sinne der Nachhaltigkeit gesteuert werden kann, müssen verstärkt Massenbilanzen der eingesetzten Rohstoffe erstellt sowie Ökobilanzen, die zusätzlich noch die Vorketten der IKT-Produktion berücksichtigen, durchgeführt werden.
- Etablierung einer strategischen Planung des Rohstoffeinsatzes unter Einbezug und systemischen Rückkopplung mit den politisch gewünschten Ausbaupfaden der Digitalisierung, insbesondere mit Blick auf Smart Cities und vernetzte Mobilität.
- Digitalisierung führt nicht automatisch zu höherer Energie- und Ressourceneffizienz. Obwohl diese Potenziale unzweifelhaft existieren, lassen sie sich nur dann verwirklichen, wenn diese dezidierte Innovationsziele sind und durch entsprechende regulatorische Rahmenbedingungen flankiert werden.
- Deshalb sollten Instrumente wie die Ökodesign-Verordnung in einer vorwärts gerichteten Perspektive angewendet werden und Leitplanken für Energieeffizienzanforderungen an zukünftige IKT-Produkte einführen, statt retrospektiv zu reagieren. Außerdem sollte das Thema Ressourceneffizienz in der Umsetzung der Ökodesign-Verordnung gleichrangig wie Energieeffizienz behandelt werden.

Literaturverzeichnis

- acatech (2012): Integrierte Forschungsagenda "Cyber-Physical Systems". Online verfügbar unter <http://www.acatech.de/?id=1405>, zuletzt geprüft am 03.12.2015.
- Aliaga, César; Ferreira, Beatriz; Hortal, Mercedes; Ángeles Pancorbo, María; Manuel López, José; Navas, Francisco (2011): Influence of RFID tags on recyclability of plastic packaging. In: *Waste management (New York, N.Y.)* (31), S. 1133–1138. DOI: 10.1016/j.wasman.2010.12.015.
- Andrae, Anders S. G.; Edler, Tomas (2015): On Global Electricity Usage of Communication Technology: Trends to 2030. In: *challenges* 2015 (6), S. 117–157.
- Angerer, G.; Erdmann, Lorenz; Marscheider-Weidemann, F.; Scharp, Michael; Lüllmann, A.; Handke, Volker; Marwede, Max (2009): Rohstoffe für Zukunftstechnologien. 2., überarb. Aufl.: Einfluss des branchenspezifischen Rohstoffbedarfs in rohstoffintensiven Zukunftstechnologien auf die zukünftige Rohstoffnachfrage. In: *Rohstoffe für Zukunftstechnologien*, Bd. 132. Stuttgart: Fraunhofer IBB Verlag (ISI Schriftenreihe Innovationspotenziale).
- Arden, W.; Brillouët, M.; Cogez, P.; Graef, M.; Huizing, B.; Mahnkopf, R. (2012): "More-than-Moore. White Paper. Hg. v. International Technology Roadmap for Semiconductors.
- Ashton, Kevin (2009): That "Internet of Things" Thing. In the real world, things matter more than ideas. *RFID Journal*. Online verfügbar unter <http://www.rfidjournal.com/articles/view?4986>, zuletzt geprüft am 03.12.2015.
- Babar, A. Ali; Virtanen, J.; Bhagavati, Venkataramana; Ukkonen, L.; Elsherbeni, Atef; Kallio, Pasi; Sydänheimo, Lauri (2012): inkjet-Printable UHF RFID Tag Antenna on a Flexible Ceramic- Polymer Composite Substrate. In: *IEEE MTT-S International Microwave Symposium digest. IEEE MTT-S International Microwave Symposium*. DOI: 10.1109/MWSYM.2012.6259566.
- Baldé, C. P.; Forti, V.; Gray, V.; Kuehr, R.; Stegmann, P. (2017): The Global E-waste Monitor 2017. Quantities, Flows, and Resources. Hg. v. United Nations University (UNU), International Telecommunication Union (ITU) & International Solid Waste Association. Bonn/Geneva/Vienna. Online verfügbar unter https://collections.unu.edu/eserv/UNU:6341/Global-E-waste_Monitor_2017__electronic_single_pages_.pdf, zuletzt geprüft am 02.02.2018.
- Bass, M. (2010): Handbook of optics. Volume IV. Optical Properties of Materials, Nonlinear Optics, Quantum Optics. New York: McGraw-Hill Companies, Inc.
- Berwald, Anton; Faninger, Thibault; Bayramoglu, Sara; Tinetti, Benoît; Mudgal, Shailendra; Stobbe, Lutz; Nissen, Nils (2015): Preparatory study for implementing measures of the Ecodesign Directive 2009/125/EC - DG ENTR Lot 9 - Enterprise servers and data equipment. Bio by Deloitte, Fraunhofer IZM.
- Bitkom (2016a): Der Weg zum digitalen Büro ist erst zur Hälfte geschafft. Online verfügbar unter <https://www.bitkom.org/Presse/Presseinformation/Der-Weg-zum-digitalen-Buero-ist-erst-zur-Haelfte-geschafft.html>, zuletzt geprüft am 06.01.2018.
- Bitkom (2016b): Jeder Sechste nutzt Bürosoftware in der Cloud. Hg. v. Bitkom. Online verfügbar unter <https://www.bitkom.org/Presse/Presseinformation/Jeder-Sechste-nutzt-Buerosoftware-in-der-Cloud.html>, zuletzt geprüft am 06.01.2018.
- Björk, A.; Erlandsson, M.; Häkli, J.; Jaakkola, K.; Nilsson, Å.; Nummila, K. et al. (2011): Monitoring environmental performance of the forestry supply chain using RFID. In: *Computers in Industry* 62 (8), S. 830–884.

- BMBF (2014): Die neue Hightech-Strategie - Innovationen für Deutschland. Online verfügbar unter https://www.bmbf.de/pub/HTS_Broschure_barrierefrei.pdf, zuletzt geprüft am 11.12.2015.
- BMUB (2016): Den ökologischen Wandel gestalten - Integriertes Umweltprogramm 2030. Hg. v. BMUB. Online verfügbar unter http://www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten_BMU/Pool/Broschueren/integriertes_umweltprogramm_2030_bf.pdf, zuletzt geprüft am 12.12.2016.
- BMW i (2014): Zukunft der Arbeit in Industrie 4.0. Online verfügbar unter <https://www.bmw.de/BMWi/Redaktion/PDF/Publikationen/zukunft-der-arbeit-in-industrie-4-0,property=pdf,bereich=bmwi2012,sprache=de,rwb=true.pdf>, zuletzt geprüft am 11.12.2015.
- BMWi; BMI; BMV (2014): Digitale Agenda 2014 – 2017.
- bnetza (2017): Jahresbericht 2016 - Märkte im digitalen Wandel. Hg. v. Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen.
- Brandt, M. (2017): Wearables sales worldwide by region 2015-2021. Hg. v. Statista. Online verfügbar unter <https://de.statista.com/infografik/4323/prognose-zum-weltweiten-absatz-von-wearables/>, zuletzt geprüft am 25.01.2018.
- Brodersen, Björn (2017): 5G: Telekom und Vodafone starten Gigabit-Mobilfunknetze. Online verfügbar unter <http://www.areamobile.de/news/46177-5g-telekom-und-vodafone-starten-gigabit-mobilfunknetze>, zuletzt geprüft am 06.01.2018.
- Brooks, W. E. (2008): Mineral Commodity Summaries: silver. Online verfügbar unter <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/silver>, zuletzt geprüft am 06.01.2018.
- Buchert, Matthias; Doris Schüller; Siddharth Prakash; Martin Möller; Andreas R. Köhler; Stefanie Degreif et al. (2015): Substitution als Strategie zur Minderung der Kri-tikalität von Rohstoffen für Umwelttechnologien – Potentialermittlung für Second-Best-Lösungen. 2. Zwischenbericht. Öko-Institut e.V.; IZT - Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung. unveröffentlicht.
- Bundesregierung (2014): Digitale Agenda 2014 - 2017. Hg. v. BMWi, BMI und BMVI. Online verfügbar unter http://www.digitale-agenda.de/Content/DE/_Anlagen/2014/08/2014-08-20-digitale-agenda.pdf?__blob=publicationFile&v=6, zuletzt geprüft am 14.12.2015.
- Cisco (2017): Cisco Visual Networking Index: Forecast and Methodology, 2016–2021.
- eMarketer (Hg.) (2014a): 2 billion consumers worldwide to get smart(phones) by 2016. Online verfügbar unter <http://www.emarketer.com/Article/2-Billion-Consumers-Worldwide-Smartphones-by-2016/1011694>, zuletzt geprüft am 06.01.2018.
- eMarketer (Hg.) (2014b): Tablet users to surpass 1 billion worldwide in 2015. Online verfügbar unter <http://www.emarketer.com/Article/Tablet-Users-Surpass-1-Billion-Worldwide-2015/1011806>, zuletzt geprüft am 06.01.2018.
- Erdmann, Lorenz; Hilty, Lorenz (2009): Einfluss von RFID-Tags auf die Abfallentsorgung. Prognose möglicher Auswirkungen eines massenhaften Einsatzes von RFID-Tags im Konsumgüterbereich auf die Umwelt und die Abfallentsorgung. Unter Mitarbeit von Hans-Jörg Althaus, Siegfried Behrendt, Roland Hischer, Christian Kamburow, Britta Oertel, Patrick Wäger und Tobias Welz. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/3845.pdf>, zuletzt geprüft am 08.01.18.
- European Information Technology Observatory (EITO) (2002): The Impact of ICT on Sustainable Development. EITO. Frankfurt am Main, Germany.

- Fleisch, Elgar; Mattern, Friedemann; Billinger, Stephan (2003): Betriebswirtschaftliche Applikationen des Ubiquitous Computing: Beispiele, Bausteine und Nutzenpotenziale. In: *HMD - Praxis Wirtschaftsinform* 229.
- Graedel, T. E.; Harper, E. M.; Nassar, N. T.; Nuss, Philip; Reck, Barbara K. (2015): Criticality of metals and metalloids. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 112 (14), S. 4257–4262. DOI: 10.1073/pnas.1500415112.
- Hagelüken, C.; Meskers, Christina E. M. (2010): Complex Life Cycles of Precious and Special Metals. In: T. E. Graedel und Ester van der Voet (Hg.): *Strüngmann Forum Report, Linkages of Sustainability*: MIT Press.
- Hilty, L. M. (2008): *Information Technology and Sustainability. Essays on the Relationship between ICT and Sustainability*. Norderstedt: Books on Demand.
- Hilty, Lorenz; Behrendt, Siegfried; Binswanger, Mathias; al, et (2005): *The Precautionary Principle in the Information Society Effects of Pervasive Computing on Health and Environment (Scientific and Technological Options Assessment Serie STOA 125 EN)*.
- Hirschen-Kreinsen, Hartmut (2014): *Wandel von Produktionsarbeit - "Industrie 4.0"*. Hg. v. Universität St. Gallen. TU Dortmund (Soziologisches Arbeitspapier Nr. 38/2014).
- Huang, Runze; Riddle, Matthew; Graziano, Diane; Warren, Joshua; Das, Sujit; Nimbalkar, Sachin et al. (2015): Energy and Emissions Saving Potential of Additive Manufacturing: The Case of Lightweight Aircraft Components. In: *Journal of Cleaner Production* 135. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.04.109.
- IDC (Hg.): *Worldwide Shipments of Slate Tablets Continue to Decline While Detachable Tablets Climb to New High, According to IDC*. Press Release. Online verfügbar unter <https://www.idc.com/getdoc.jsp?containerId=prUS40990116>, zuletzt geprüft am 12.07.2016.
- IDC (Hg.) (2015a): *In a near tie, Apple closes the gap on Samsung in the fourth quarter as worldwide smartphone shipments top 1.3 billion for 2014*. Press release. Online verfügbar unter <http://www.idc.com/getdoc.jsp?containerId=prUS25407215>, zuletzt geprüft am 25.01.2016.
- IDC (Hg.) (2015b): *Worldwide tablet shipments experience first year-over-year decline in the fourth quarter while full shipments show modest growth*. Press release. Online verfügbar unter <http://www.idc.com/getdoc.jsp?containerId=prUS25409815>, zuletzt geprüft am 25.01.2016.
- IDC (2016a). Online verfügbar unter <http://www.idc.com>.
- IDC (Hg.) (2016b): *Apple, Huawei, and Xiaomi finish 2015 with Above Average Year-Over-Year Growth, as Worldwide Smartphone Shipments Surpass 1.4 Billion for the Year, According to IDC*. Press Release. Online verfügbar unter <https://www.idc.com/getdoc.jsp?containerId=prUS40980416>, zuletzt geprüft am 12.07.2016.
- IDTechEx (Hg.) (2017): *The total RFID market is worth \$11.2 billion in 2017*. Unter Mitarbeit von Raghu Das. Online verfügbar unter <http://www.idtechex.com/research/reports/rfid-forecasts-players-and-opportunities-2014-2024-000368.asp>, zuletzt geprüft am 06.01.2018.
- IEA (2017): *Digitalization & Energy*. International Energy Agency. Online verfügbar unter <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/DigitalizationandEnergy3.pdf>, zuletzt geprüft am 04.02.2018.
- IEEE Computer Society (2016): *Top 9 Computing Technology Trends for 2016*. Hg. v. IEEE Computer Society. Online verfügbar unter <https://www.scientificcomputing.com/news/2016/01/top-9-computing-technology-trends-2016>, zuletzt aktualisiert am 06.01.2018.

- ifaa (2016): Digitalisierung & Industrie 4.0. So individuell wie der Bedarf – Produktivitätszuwachs durch Informationen. Online verfügbar unter https://www.arbeitswissenschaft.net/fileadmin/user_upload/Downloads/Industrie_4_0_Ansicht.pdf, zuletzt geprüft am 04.02.2018.
- IFR (2017): Executive Summary World Robotics 2017 - Service Robots. Hg. v. International Federation of Robotics. Online verfügbar unter https://ifr.org/downloads/press/Executive_Summary_WR_Service_Robots_2017_1.pdf, zuletzt geprüft am 25.01.2018.
- Intel Corporation (k.A.): The Tick-Tock Model Through the Years. Online verfügbar unter <http://www.intel.com/content/www/us/en/silicon-innovations/intel-tick-tock-model-general.html>, zuletzt geprüft am 06.01.2018.
- International Technology Roadmap for Semiconductors (2015): International Technology Roadmap for Semiconductors - ITRS 2.0. Online verfügbar unter <http://www.itrs2.net>, zuletzt geprüft am 06.01.2018.
- Ittermann, Peter; Niehaus, Jonathan; Hirschen-Kreinsen, Hartmut (2015): Arbeiten in der Industrie 4.0. Trendbestimmungen und arbeitspolitische Handlungsfelder. Hg. v. Hans-Boeckler-Stiftung. TU Dortmund. Düsseldorf.
- IZMF (2014): Rohstoffe und Lebenszyklus eines Mobiltelefons. Factsheet. Hg. v. Informationszentrum Mobilfunk e.V. Online verfügbar unter http://informationszentrum-mobilfunk.de/sites/default/files/IZMF_Factsheet_Lebenszyklus_2015.pdf, zuletzt geprüft am 06.01.2018.
- Köhler, A. R.: Considering recycling and disposal of future high-tech products during the innovation process. The case of electronic textiles. Davos, Switzerland.
- Köhler, A. R.; Bakker, C.; Peck, D. (2010): Materials Scarcity. A new agenda for industrial design engineering. Knowledge Collaboration & Learning for Sustainable Innovation. In: ERSCP-EMSU conference. Delft, The Netherlands, October 25-29, 2010.
- Köhler, A. R.; Hilty, LM.; Bakker, C. (2011): Prospective impacts of electronic textiles on recycling and disposal. In: *J. of Industrial Ecology* 15 (4), S. 496–511.
- Köhler, Andreas R. (2013a): Challenges for eco-design of emerging technologies: The case of electronic textiles. In: *Materials & Design* 51, S. 51–60. DOI: 10.1016/j.matdes.2013.04.012.
- Köhler, Andreas R. (2013b): Material scarcity. A reason for responsibility in technology development and product design. In: *Science and engineering ethics* 19 (3), S. 1165–1179. DOI: 10.1007/s11948-012-9401-8.
- Koptioug, Andrei; Jonsson, Peter; Sidén, Johan; Olsson, Torbjörn; Gulliksson, Mikael (2018): On the behavior of printed RFID tag antennas, using conductive paint.
- Labs, L. (2016): Flash und seine Nachfolger. In: *C't* (8).
- Langheinrich, Marc; Mattern, Friedemann: Digitalisierung des Alltags. Was ist Pervasive Computing?
- Liu, Ran; Buchert, Matthias; Dittrich, Stefanie; Manhart, Andreas; Merz, Cornelia; Schuler, Doris (2011): Application of rare earths in consumer electronics and challenges for recycling, 2011. Online verfügbar unter <https://de.slideshare.net/Oeko-Institut/application-of-rare-earths-in-consumer-electronics-and-challenges-for-recycling>, zuletzt geprüft am 05.12.17.

- Manhart, Andreas; Blepp, M.; Fischer, C.; Graulich, K.; Prakash, Siddharth; Schleicher, Tobias; Tür, M. (2017): Research on resource efficiency in the ICT sector. Hg. v. Öko-Institut e.V. im Auftrag von Greenpeace e.V. Hamburg. Online verfügbar unter https://www.greenpeace.de/sites/www.greenpeace.de/files/publications/20161109_oeko_resource_efficiency_final_full-report.pdf, zuletzt geprüft am 02.02.2018.
- Mattern, Friedemann (o.J.): Pervasive Computing / Ubiquitous Computing.
- Mattern, Friedemann (2005): Pervasive/Ubiquitous Computing. Online verfügbar unter <https://gi.de/informatiklexikon/pervasiveubiquitous-computing/>, zuletzt geprüft am 06.01.2018.
- OICA (2017): 2014 Production Statistics. Hg. v. OICA. Online verfügbar unter <http://www.oica.net/category/production-statistics/2014-statistics/>, zuletzt geprüft am 06.01.2018.
- Picot, Arnold (1999): Bits statt Atome? Die Folgen von Informations- und Kommunikationstechniken für die Virtualisierung der Wirtschaft. In: *Ökologisches Wirtschaften* (1).
- Reinsprecht, Stefan (2013): Industrie 4.0 - die vierte industrielle Revolution. Netzkonstrukteur. Online verfügbar unter <http://netzkonstrukteur.de/industrie-4-0-die-vierte-industrielle-revolution/>, zuletzt geprüft am 04.12.2015.
- Restrepo, Eliette; Løvik, Amund N.; Wäger, Patrick; Widmer, Rolf; Lonka, Radek; Müller, Daniel B. (2017): Stocks, Flows, and Distribution of Critical Metals in Embedded Electronics in Passenger Vehicles. In: *Environ. Sci. Technol.* 51 (3), S. 1129–1139. DOI: 10.1021/acs.est.6b05743.
- Rogan, Cath (2014): E-textiles and the future of wearable technology. Online verfügbar unter <https://advancedtextilesource.com/2014/09/22/e-textiles-and-the-future-of-wearable-technology/>, zuletzt geprüft am 10.01.2018.
- Roland Berger Strategy Consultants; BDI (Hg.) (2015): Die digitale Transformation der Industrie. Was sie bedeutet. Wer gewinnt. Was jetzt zu tun ist., zuletzt geprüft am 05.12.17.
- Scharp, Michael (2011): Materialbestand und Materialflüsse der IuK-Infrastrukturen: Mobilfunk. Meilensteinbericht des Arbeitspakets 2.3 des Projekts "Materialeffizienz und Ressourcenschonung" (MaRess). Online verfügbar unter https://ressourcen.wupperinst.org/downloads/MaRess_AP2_5.pdf, zuletzt geprüft am 02.02.2018.
- Schindler, Rebecca; Schmalbein, N.; Steltenkamp, V.; Cave, J.; Wens, B.; Anhalt, A. (2012): Smart trash. Study on RFID tags and the recycling industry. Hg. v. European Commission. Brussels.
- Schneegass, S.; Amft, O. (2017): Smart Textiles: Fundamentals, Design, and Interaction: Springer International Publishing. Online verfügbar unter <https://books.google.de/books?id=X44JDgAAQBAJ>.
- Schödwell, Björn; Zarnekow, Rüdiger; Gröger, Jens; Liu, Ran; Wilkens, Marc (2018): Kennzahlen und Indikatoren für die Beurteilung der Ressourceneffizienz von Rechenzentren und Prüfung der praktischen Anwendbarkeit. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/kennzahlen-indikatoren-fuer-die-beurteilung-der>, zuletzt geprüft am 01.02.2018.
- Schwarz, Anne; van Langenhove, Lieva; Guermonprez, Philippe; Deguillemont, Denis (2010): A roadmap on smart textiles. In: *Textile Progress* 42 (2), S. 99–180. DOI: 10.1080/00405160903465220.
- Soneji, H. (2009): Connected Consequences: Resource Depletion and North-South Inequities of the Global Material Intensity of the Internet and Mobile Telephony. Lund University.

- Statista (2016): Wie viele Minuten verbringst Du durchschnittlich pro Werktag (Mo.-Fr.) an welchem Gerät im Internet? Online verfügbar unter <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/520902/umfrage/internetnutzungsdauer-nach-endgeraeten-an-werktagen-in-deutschland/>, zuletzt geprüft am 06.01.2018.
- Statista (2018a): Global smartphone shipments market forecast 2010-2021 | Statistic. Online verfügbar unter <https://www.statista.com/statistics/263441/global-smartphone-shipments-forecast/>, zuletzt geprüft am 25.01.2018.
- Statista (2018b): Global smartwatch unit sales 2014-2018 | Statistic. Online verfügbar unter <https://www.statista.com/statistics/538237/global-smartwatch-unit-sales/>, zuletzt geprüft am 25.01.2018.
- Statista (2018c): IoT devices installed base worldwide 2015-2025 | Statistic. Online verfügbar unter <https://www.statista.com/statistics/471264/iot-number-of-connected-devices-worldwide/>, zuletzt geprüft am 25.01.2018.
- Statista (2018d): Tablets, laptops & PCs shipments forecast 2010-2021 | Statistic. Online verfügbar unter <https://www.statista.com/statistics/272595/global-shipments-forecast-for-tablets-laptops-and-desktop-pcs/>, zuletzt geprüft am 25.01.2018.
- Statista (2018e): Wearable devices: global mobile data traffic 2020 | Statistic. Online verfügbar unter <https://www.statista.com/statistics/292837/global-wearable-device-mobile-data-traffic/>, zuletzt geprüft am 29.01.2018.
- Statista (2018f): Wearables - Absatzprognose nach Produktgruppe weltweit bis 2021 | Statistik. Online verfügbar unter <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/322179/umfrage/prognose-zum-absatz-von-wearable-computing-geraeten/>, zuletzt geprüft am 25.01.2018.
- Statistisches Bundesamt (2013).
- Stobbe, Lutz; Proske, Marina; Zedel, Hannes; Hintemann, Ralph; Clausen, Jens; Beucker, Severin (2015): Entwicklung des IKT-bedingten Strombedarfs in Deutschland. Abschlussbericht. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie. Online verfügbar unter <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/E/entwicklung-des-ikt-bedingten-strombedarfs-in-deutschland-abschlussbericht.html>, zuletzt geprüft am 01.02.2018.
- Tißler, Jan (2013): Praktische Beispiele für das Internet der Dinge. Online verfügbar unter <http://upload-magazin.de/blog/7086-internet-der-dinge-beispiele/>, zuletzt geprüft am 18.12.2015.
- Trapp, J. H.; Wulf, H. A.; Libbe, J.; et al (2017): Ressourcenleichte zukunftsfähige Infrastrukturen – umweltschonend, robust, demografiefest. UBA. Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2017-08-15_texte_64_2017_infrastrukturen.pdf, zuletzt geprüft am 02.02.2018.
- US EPA (2009): Sustainable Materials Management: The Road Ahead. Hg. v. US EPA. Office of Resource Conservation and Recovery (OSWER). Online verfügbar unter <https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-09/documents/vision2.pdf>, zuletzt geprüft am 24.01.2018.
- van Langenhove, Lieva; Hertleer, Carla; Schwarz, Anne (2012): Smart Textiles. An Overview. In: P. Kiekens und S. Jayaraman (Hg.): Intelligent Textiles and Clothing for Ballistic and NBC Protection.,: Springer (NATO Science for Peace and Security Series B: Physics and Biophysics).
- VDI Zentrum Ressourceneffizienz (2017): Ressourceneffizienz durch Industrie 4.0; Potenziale für KMU des verarbeitenden Gewerbes. Berlin.

Wäger, Patrick; Hischer, Roland; Widmer, Rolf (2015): The material basis of ICT. In: Lorenz Hilty und Bernard Aebischer: ICT Innovations for Sustainability (310), zuletzt geprüft am 05.12.17.

Whitehead, Beth; Andrews, Deborah; Shah, Amip (2015): The life cycle assessment of a UK data centre. In: *International Journal of Live Cycle Assessment* 20, S. 332–349. DOI: 10.1007/s11367-014-0838-7.

Wirtschaftslexikon (2015): Computer Integrated Manufacturing (CIM). Online verfügbar unter <http://www.wirtschaftslexikon24.com/d/computer-integrated-manufacturing-cim/computer-integrated-manufacturing-cim.htm>, zuletzt geprüft am 18.12.2015.

Externe Expertise für das WBGU-Hauptgutachten „Unsere gemeinsame digitale Zukunft“

Berlin: WBGU

Verfügbar im Internet unter www.wbgu.de/de/publikationen/publikation/unsere-gemeinsame-digitale-zukunft#sektion-expertisen

Autor*innen: Dr. A.R. Köhler, Jens Gröger, Ran Liu

Öko-Institut e.V. –Geschäftsstelle Freiburg

Titel: Energie- und Ressourcenverbräuche der Digitalisierung

Berlin, 2018

**Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung
Globale Umweltveränderungen (WBGU)**

Geschäftsstelle
Luisenstraße 46
10117 Berlin

Telefon: (030) 26 39 48 0
E-Mail: wbgu@wbgu.de
Internet: www.wbgu.de
🐦@WBGU_Council

Alle Gutachten können von der Internet-Webseite
<https://www.wbgu.de/de/publikationen/alle-publikationen>
heruntergeladen werden.

© 2019, WBGU