



Borderstep Institut



Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung
Institute for Futures Studies and Technology Assessment

Deutscher Bundestag

Enquete-Kommission
Internet und digitale Gesellschaft

Ausschussdrucksache

17(24)058

TOP 2 am 26.11.2012

21.11.2012

Gutachten zum Thema „Green IT - Nachhaltigkeit“

für die Enquete-Kommission Internet und digitale Gesellschaft des
Deutschen Bundestages

vorgelegt von

Borderstep Institut für Innovation und Nachhaltigkeit gemeinnützige GmbH, Berlin

in Zusammenarbeit mit dem

Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung gemeinnützige GmbH (IZT), Berlin

Berlin, Juni 2012

Autoren

Borderstep Institut für Innovation und Nachhaltigkeit gemeinnützige GmbH
Clayallee 323
14169 Berlin
Tel. 030.306 45-1000
Fax 030.306 45-1009
www.borderstep.de

Prof. Dr. Klaus Fichter
fichter@borderstep.de

Dr. Ralph Hintemann
hintemann@borderstep.de

Dr. Severin Beucker
beucker@borderstep.de

in Zusammenarbeit mit dem

Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung gemeinnützige GmbH (IZT)
Schopenhauerstr. 26
14129 Berlin
Tel.: 030-803088-0
Fax: 030-803088-88
www.izt.de

Dr. Siegfried Behrendt
s.behrendt@izt.de

Inhalt

1 Zusammenfassung	6
2 Einleitung	10
2.1 Hintergrund.....	10
2.2 Ziel und Aufgabenstellung des Gutachtens	12
2.3 Aufbau des Gutachtens.....	13
3 Trendanalyse: Ressourcenrelevante IKT-Trends	15
3.1 Megatrends mit Bezug zur IKT	15
3.1.1 Digitalisierung/Digitales Leben	15
3.1.2 Ubiquitäre Intelligenz	18
3.1.3 Wissensbasierte Ökonomie	18
3.1.4 Auswirkungen der Megatrends auf die ökologische Bedeutung der IKT	19
3.2 Trends in der Technologieentwicklung.....	20
3.2.1 Aktuelle Trends in der Mikro- und Nano-Elektronik.....	20
3.2.2 Trends im Bereich Rechenzentren.....	21
3.2.3 Trends bei IKT-Endgeräten	26
3.2.4 Technische Trends im Bereich Netze.....	31
3.3 Trends bei der Nutzung von IKT.....	32
3.3.1 Multimediale Nutzung von IKT	32
3.3.2 Nutzung der Softwarebereitstellungsform „App“	33
3.3.3 Nutzung von Anwendungssoftware im Internet	34
3.3.4 Nutzung sozialer Netzwerke	35
3.3.5 Nutzung standortbezogener Dienste	37
3.3.6 Gesten und gesprochene Sprache für die Interaktion	38
3.4 Zwischenfazit	39
4 Der aktuelle Ressourcenbedarf der IKT in Deutschland	40
4.1 Stromverbrauch der IKT in Deutschland.....	41
4.2 Rechenzentren	43
4.3 Endgeräte	48

4.3.1	Endgeräte in Haushalten	48
4.3.2	Endgeräte in Unternehmen und öffentlichen Einrichtungen	50
4.4	Festnetz und Mobilfunknetze	53
4.5	Zwischenfazit	54
5	Green durch IT: Ein Beitrag zur Reduktion des Ressourcenverbauchs?	55
5.1	Smart Buildings	56
5.2	Smart Grid	58
5.3	Smart Mobility und Logistics	61
5.4	Dematerialisierung, Teleworking und Videokonferenzen	64
5.5	Smart Industry und Smart Motors	66
5.6	Zwischenfazit	67
6	Bedeutung Seltener Erden und Metalle	68
6.1	Überblick	68
6.2	Umweltrelevanz	73
6.3	Recycling seltener Metalle	75
6.4	Zwischenfazit	76
7	Künftige Entwicklung: Szenarien und Prognosen	77
7.1	Green in der IT	77
7.1.1	Stromverbrauch durch IKT in Deutschland	77
7.1.2	Rechenzentren	78
7.1.3	Endgeräte	81
7.1.4	Netze	87
7.2	Green durch IT	89
7.3	Zwischenfazit	90
8	Rebound-Effekte	93
8.1	Definition und Systematisierung	93
8.2	Umwelteffekte der IKT – ein Review	98
8.3	Abschätzung möglicher Rebound-Effekte bis 2020	109
8.4	Entkopplung von Wirtschaftswachstum und Ressourcenverbrauch durch Green IT	119

9	Möglichkeiten und Maßnahmen zur Reduzierung des Ressourcenbedarfs	122
9.1	Möglichkeiten und Grenzen zur Reduzierung des Ressourcenbedarfs durch Green IT	122
9.1.1	Green in der IT	122
9.1.2	Green durch IT	123
9.2	Handlungsempfehlungen.....	124
9.2.1	Übergreifende Handlungsempfehlungen	125
9.2.2	Green in der IT	126
9.2.3	Green durch IT	127
10	Literaturverzeichnis.....	129

1 Zusammenfassung

„**Green IT**“ bezeichnet den Einsatz von Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT) und deren Anwendung, die unter Berücksichtigung des gesamten Produktlebenszyklus im Vergleich zu bisherigen Lösungen zu einer deutlichen Entlastung der Umwelt führt. Green IT-Lösungen tragen also beispielsweise dazu bei, Energie effizienter zu nutzen, Ressourcen zu schonen und das Klima zu schützen.

Ziel des Gutachtens ist es, die Einsatzmöglichkeiten von IKT-Lösungen und den dafür notwendigen Ressourcenbedarf (insbesondere Energie) aufzuzeigen, zu prognostizieren und zu analysieren, sowie mit statistisch belastbaren Zahlen zu unterfüttern. Des Weiteren sollen folgende Fragen beantwortet werden: Welche Möglichkeiten für eine Reduzierung des Ressourcenbedarfs bei einer gleichzeitig fortschreitenden globalen Ausweitung der Internet-Infrastruktur bieten sich an? Welche Maßnahmen können ergriffen werden? Gleichzeitig ist zu fragen, welche Auswirkungen die Reduzierung des Ressourcenbedarfs hat? Zu diskutieren sind hierbei auch "Rebound"-Effekte, insbesondere vor dem Hintergrund des Nutzerverhaltens und der Internet-Infrastruktur, sowie die Frage, wie dies anhand des Forschungsstandes einzuschätzen ist?

Die **Trendanalyse** liefert drei zentrale Erkenntnisse, die mit Blick auf die Abschätzung der Ressourcenbedarfe der IKT und möglicher Ressourceneinsparpotenziale relevant sind: (1.) Die hohe Innovations- und Veränderungsdynamik im Technologie- und Anwendungsfeld IKT erschwert langfristige Aussagen über Ressourcenbedarfe und Ressourceneinsparpotenziale. (2.) Die Analyse offenbart gegenläufige Trends: Einerseits nimmt die Anzahl von IKT-Geräten und –Anwendungen rasant zu, was tendenziell zu einer Erhöhung der IKT-bedingten Ressourcenbedarfe und Emissionen führt. Andererseits verbessert sich in vielen Fällen die Energie- und Materialeffizienz von Endgeräten, Netzen und Rechenzentren erheblich, was hohe Ressourceneinsparmöglichkeiten eröffnet. (3.) Der systemische Charakter und die hohe Komplexität der Querschnittstechnologie IKT, die o. g. hohe Veränderungsdynamik sowie die Gleichzeitigkeit gegenläufiger Trends von Ressourcenbedarfen und Ressourceneinsparmöglichkeiten erschweren belastbare Aussagen über die gesamtwirtschaftlichen bzw. gesamtgesellschaftlichen Umwelteffekte der IKT.

Wie die Analyse **des aktuellen Ressourcenbedarfs der IKT** zeigt, ist der IKT-bedingte Stromverbrauch (Endgeräte, Netze, Rechenzentren) in den vergangenen zehn Jahren erheblich angestiegen und machte in 2010 bereits **11 % des Gesamtstromverbrauchs** in Deutschland aus, Tendenz steigend. Die Ausführungen zeigen weiterhin, dass die Datenlage bezüglich des Ressourcenverbrauchs der IKT noch äußerst lückenhaft ist und sich bisherige Untersuchungen weitgehend auf den Energieverbrauch in der Nutzungsphase von IKT-Geräten und –Infrastrukturen beschränken. Hinzu kommt, dass verschiedene Studien unterschiedliche Systemabgrenzungen und Datenerhebungsmethoden verwenden, wodurch die bislang vorliegenden Daten nicht ohne Weiteres vergleichbar sind und auf nationaler Ebene nicht aggregiert werden können. Bislang fehlt ein differenziertes, methodisch einheitliches und kontinuierliches nationales Monitoring der Umwelteffekte des IKT-Einsatzes in Deutschland.

Die Analyse des Ressourcenbedarfs der IKT offenbart, dass die Innovations- und Wachstumsdynamik der Informations- und Kommunikationstechnologien sich nicht nur in einem steigenden Energieverbrauch, sondern auch im zunehmenden Materialeinsatz und dem damit verbundenen Rohstoffverbrauch niederschlägt. Der **IKT-bedingte Material- und Rohstoffverbrauch ist erheblich** und wird ebenso wie Fragen des „End-of-life-Managements“ (Rücknahme, Recycling etc.) weiter an Bedeutung gewinnen, dies gilt insbesondere mit Blick auf seltene Erden und Metalle, deren Gewinnung mit erheblichen Umweltbelastungen verbunden sind. Handlungsbedarf besteht insbesondere im Bereich des IKT-Recycling von Kleingeräten wie Mobiltelefonen. Es sind deshalb flächendeckende globale Rücknahme- und Sammlungsstrukturen erforderlich, die eine Rückführung der sekundären Rohstoffe ermöglichen. Schlüsselement einer Intensivierung der Rückführung seltener Metalle ist das Zusammenspiel von demontagegerechter Konstruktion, Erfassung und Aufbereitungsverfahren.

Aufgrund der hohen Innovationsdynamik in der IKT und den schon bestehenden Treibern zur Steigerung der Energieeffizienz (Ökodesign-Anforderungen, Strompreisentwicklung etc.) bestehen erhebliche Potenziale zur Verbesserung der Ressourceneffizienz. Trotz deutlicher Effizienzfortschritte auf der Ebene einzelner IKT-Geräte (Miniaturisierung, Steigerung der Energieeffizienz etc.), bei Netzen und Rechenzentren in der Vergangenheit und der bestehenden Ressourceneffizienzpotenziale, ist **bis zum Jahr 2020 mit einem weiteren deutlichen Anstieg des IKT-bedingten Ressourcenverbrauchs in Deutschland zu rechnen**. Ohne zusätzliche erhebliche Anstrengungen zur Steigerung der Energieeffizienz der IKT ist davon auszugehen, dass der Gesamtstromverbrauch der IKT von rund 60 TWh in 2010 auf über 90 TWh im Jahr 2020 ansteigen wird. **Damit würde der Stromverbrauch der IKT bis 2020 um weitere 50 % zunehmen**. Der Anteil des durch IKT verursachten Stromverbrauchs am Gesamtstromverbrauch in Deutschland läge in 2020 dann bei fast 20 %.

Mit Blick auf die Ziele der Energiewende ist diese **zusätzliche Belastung der deutschen Stromnetze** eine erhebliche Herausforderung. Dies gilt sowohl für die Versorgungssicherheit und die mit dem Stromverbrauch verbundenen Umweltbelastungen (Treibhausgasemissionen etc.) als auch mit Blick auf die volkswirtschaftlichen Kosten eines steigenden Stromverbrauchs. Szenarien zeigen allerdings, dass es in einzelnen Bereichen wie z. B. im Bereich Arbeitsplatzcomputer oder Rechenzentren sehr wohl möglich ist, den zunehmenden Ressourcenverbrauch der IKT zu stoppen. Dies setzt in den kommenden Jahren allerdings zusätzliche Anstrengungen auf Seiten der Politik wie auch der IKT-Anbieter und IKT-Anwender voraus.

Bei der Betrachtung der Möglichkeiten und Grenzen zur Reduzierung des Ressourcenbedarfs durch Green IT ist zwischen der Senkung des Ressourcenbedarfs der IKT selbst (Herstellung, Nutzung, Recycling von Endgeräten, Netzen, Rechenzentren) (**Green in der IT**) und der Nutzung von IKT in anderen Branchen und Anwendungsfeldern (Gebäude, Verkehr, Stromnetze etc.) (**Green durch IT**) zu unterscheiden.

Die theoretischen **Ressourceneinsparpotenziale**, die durch die Nutzung von IKT in anderen Branchen und Anwendungsfeldern erwachsen können („**Green durch IT**“) sind erheblich und liegen deutlich über dem Ressourcenverbrauch der IKT selbst. Einzelne Studien gehen davon aus, dass durch die gezielte Nutzung von IKT in Gebäuden, Stromnetzen, Industrieprozessen usw., also durch „Green durch IT“-Maßnahmen, achtmal mehr an Ressourcen eingespart werden kann als die IKT selbst ver-

braucht. So eindrucksvoll die ermittelten Potenziale auch sind, so sollte zum einen die Höhe der Werte und zum anderen die Bedingungen für deren Realisierung kritisch hinterfragt werden. Die in den 1990er Jahren im Zuge der Einführung von PCs in die Arbeitswelt oft verbreitete Vision eines papierlosen Büros mag die Zwiespältigkeit solcher Abschätzungen verdeutlichen. Der Papierverbrauch in Deutschland ist seither nicht etwa gesunken, sondern gestiegen. Für viele der Maßnahmen aus dem Bereich Green durch IT liegen bislang ausschließlich Potenzialabschätzungen vor. D. h., dass für diese Felder keine oder nur wenig belastbare Daten über tatsächliche, aus der Anwendungserfahrung ableitbare Einsparungen vorliegen. Dies gilt insbesondere für die Bereiche intelligente Stromnetze (Smart Grid), intelligente Verkehrslösungen (Smart Mobility/ Smart Logistics) und Dematerialisierung.

Die Potenzialabschätzungen in den „**Green durch IT**“-Feldern und die Möglichkeiten ihrer Realisierbarkeit weisen deutliche Unterschiede auf. Während in den Feldern **intelligente Gebäude (Smart Building) und intelligente Produktionsprozesse (Smart Industry/ Smart Motors) verhältnismäßig große Potenziale der Emissionsminderung** und des Ressourcenverbrauchs mit begrenzten Maßnahmen innerhalb der nächsten Jahre erschlossen werden können, ist die Realisierung der Potenziale in den Feldern Smart Mobility/ Smart Logistics und Dematerialisierung mit größeren Unsicherheiten verbunden. Insbesondere bei Letzteren gilt es vertiefende Untersuchungen über die zu erwartenden Nutzungs- und Anwendungssysteme einzelner Produkte und Dienstleistungen vorzunehmen, um das Risiko von Reboundeffekten zu verringern. Eine große Herausforderung ist auch die große Komplexität im Bereich intelligenter Stromnetze (Smart Grid). Hier können zwar große Potenziale zur Minderung des Ressourcenverbrauchs mobilisiert werden, allerdings sind die dafür zu schaffenden Rahmenbedingungen nicht konfliktfrei und bedürfen einer langfristigen Zielsetzung und Umsetzung.

Hinzu kommt, dass die meisten Potenzialabschätzungen von „Green durch IT“-Lösungen Reboundeffekte nicht berücksichtigen. Abschätzungen zur Ressourcenschonung von IKT ohne die **Berücksichtigung von Rebound-Effekten** sind allerdings unvollständig. Grundsätzlich hat die Abbildung der Umwelteffekte diesen komplexen Wirkungsmechanismen Rechnung zu tragen, um gravierende Fehleinschätzungen zu vermeiden und richtungssichere Schlüsse zu ziehen. Primäre Effekte müssen mit sekundären Effekten aufgerechnet werden. Die Befunde zeigen zudem, dass **Rebound-Effekte infolge von Konsumverschiebungen keine vernachlässigbare Größe** darstellen. Neue Produkte und Dienstleistungen schaffen zusätzliche Konsumbedürfnisse. Das Schwungrad zunehmender Produktion und Konsumtion bleibt nicht nur unangetastet, vielmehr ist zu vermuten, dass es durch Telekommunikation und Informationstechnologien noch beschleunigt wird.

Es wäre aber verfehlt, daraus abzuleiten, der IKT-Fortschritt stünde einer Verringerung des Ressourcenverbrauchs im Wege. Das Fazit lautet vielmehr: Die Erschließung von Ressourceneffizienzpotenzialen der IKT setzt erhebliche und gezielte Anstrengungen sowohl auf Seiten der Politik und der Wirtschaft als auch bei den Anwendern voraus und erfordert, dass potenziellen Rebound-Effekten aktiv entgegen zu wirken ist. Hinweise, wie diesen begegnet werden kann, werden im vorliegenden Gutachten vorgestellt und münden in den unten formulierten Handlungsempfehlungen.

Handlungsempfehlungen

Wie die vorliegende Studie zeigt, ist „Green IT“ kein Selbstläufer. Die Realisierung von Green IT und die Erzeugung positiver gesamtgesellschaftlicher Nachhaltigkeitseffekte, sowohl in ökologischer, ökonomischer als auch in sozialer Hinsicht, stellt eine umfangreiche und komplexe politische Herausforderung dar. Dabei kann davon ausgegangen werden, dass **Deutschland im internationalen Vergleich besonders günstige Ausgangsbedingungen** hat. Dies liegt an den bestehenden gesetzlichen Rahmenbedingungen auf europäischer und nationaler Ebene, dem vergleichsweise hohen Bewusstsein bei Herstellern und Anwendern für Fragen eines ressourcenschonenden IKT-Einsatzes, leistungsfähigen und innovativen Anbietern von Green IT-Lösungen sowie politischen Rahmenbedingungen wie sie z. B. durch die Energiewende entfaltet werden. Deutschland hat vor diesem Hintergrund **beste Voraussetzungen international zum „Green IT“-Pionier** und zum Weltmarktführer für Green IT-Lösungen zu werden. Neben positiven inländischen Effekten der Realisierung einer „Green IT“, bietet diese also auch erhebliche Chancen zum „Exportschlager“ zu werden.

Aus der Vielzahl möglicher und notwendiger Maßnahmen zur Realisierung von Green IT in Deutschland soll hier auf solche fokussiert werden, die für das Gesamtfeld der IKT von besonderer Bedeutung sind und die in den beiden großen Teilbereichen „Green in der IT“ und „Green durch IT“ wichtige Impulse auslösen können. Das Gutachten formuliert folgende sieben **Handlungsempfehlungen**:

- (1) Aufbau eines nationalen Green IT-Monitoring
- (2) Nationale Roadmap „Green IT“ mit konkreten Zielen für einzelne Green IT-Felder
- (3) Initiative klimaneutrale Rechenzentren für Deutschland
- (4) Umsetzung der Initiative „Green Office Computing“
- (5) Ausweitung der Forschung zu Reboundeffekten der IKT
- (6) Förderung von IKT-Bereichen mit geringer Reboundgefahr (z. B. smart energy in Gebäuden)
- (7) Festlegung konkreter Reduktionsziele für Deutschland für die einzelnen „Green durch IT“-Felder.

2 Einleitung

2.1 Hintergrund

Für die heutige Informations- und Wissensgesellschaft bildet die Informations- und Kommunikationstechnik (IKT) die technische Basis und trägt als dynamisches Innovationsfeld maßgeblich zur wirtschaftlichen Entwicklung bei. Informations- und Kommunikationstechnologien sind entscheidende Technologietreiber in nahezu allen Branchen. Allerdings sind auch der Ressourcenbedarf und insbesondere der Energiebedarf für den Betrieb der IKT-Infrastruktur zu einem bedeutsamen ökonomischen und ökologischen Faktor geworden. Aus diesem Grund hat das Thema „Green IT“ in den vergangenen Jahren hohe Aufmerksamkeit auf sich gezogen. Der intelligente Einsatz von IKT kann zudem einen substantiellen Beitrag zur Erreichung der umwelt- und industriepolitischen Zielsetzungen der Bundesregierung leisten; insbesondere zur Energie- und Ressourceneinsparung sowie zur Reduzierung von klimaschädlichen Treibhausgasemissionen. Gleichzeitig bilden neue, unter Berücksichtigung von Umweltgesichtspunkten gestaltete IKT-Produkte und -Lösungen zusätzliche Wachstumspotenziale für die Industrie und tragen so ebenfalls zur wirtschaftlichen Entwicklung bei.

„Green IT“¹ soll im vorliegenden Gutachten wie folgt verstanden werden:

Green IT bezeichnet den Einsatz von Informations- und Kommunikationstechnologien und deren Anwendung, die unter Berücksichtigung des gesamten Produktlebenszyklus im Vergleich zu bisherigen Lösungen zu einer deutlichen Entlastung der Umwelt führt. Green IT - Lösungen tragen also beispielsweise dazu bei, Energie effizienter zu nutzen, Ressourcen zu schonen und das Klima zu schützen.

Grundsätzlich können zwei Arten von Green IT - Lösungen unterschieden werden. Zum einen existieren Lösungen, mit deren Hilfe der Energie- und Ressourcenbedarf der IT selbst gesenkt wird. Diese Lösungen werden im Allgemeinen mit dem Begriff „Green in der IT“ beschrieben. Zum anderen existieren IT-Lösungen, durch deren Einsatz in anderen Bereichen (außerhalb des IKT-Sektors) Ressourcen eingespart werden können. Solche Lösungen werden mit dem Begriff „Green durch IT“ bezeichnet. „Green durch IT“ - Lösungen sind insbesondere Lösungen in den Bereichen Smart Mobility, Smart Cities, Smart Metering, etc.

Die Analysen und Diskussionen zum Thema Green IT konzentrieren sich bislang zumeist auf den Aspekt der Energieeffizienz. Während zum Energieverbrauch von IKT-Lösungen insgesamt bereits umfangreiche Daten und Prognosen vorliegen, ist über die benötigten Materialien und Ressourcen bislang wenig bekannt. Dies gilt insbesondere für seltene Erden und Metalle, die für die IKT-Industrie eine zentrale Rohstoff- und Materialklasse darstellen. Metalle wie z. B. Beryllium, Indium, Tantal,

¹ Sachlich angebracht wäre es, von Green IKT zu sprechen. Da aber im allgemeinen Sprachgebrauch der Begriff Green IT verwendet wird, wird dies auch im vorliegenden Exposé so gehandhabt.

oder die Platingruppenmetalle (PGM), sind essentielle Bestandteile vieler elektronischer Bauteile (z. B. Kondensatoren, Mikrochips, Festplatten, Bildschirmen, etc.) und haben sich aufgrund ihrer massenhaften Verwendung in Computern, Mobiltelefonen und deren Infrastruktur zu relevanten Massenströmen entwickelt. Auch die Vielfalt sowie der Reinheitsgrad der benötigten Elemente haben mit der Leistungssteigerung in der Mikroelektronik stark zugenommen. So ist z. B. die Anzahl der für die Herstellung eines Computerchips benötigten Elemente von ca. 11 im Jahr 1980 auf über 45 Elemente im Jahr 2008 gestiegen, darunter in der Mehrzahl seltene Metalle (Graedel, 2008).

IKT-Technologien entwickeln sich rasant und werden immer effizienter. Gleichzeitig steigt ihre Nutzung jedoch auch immer mehr an. Die Zahl der Internetnutzer in Deutschland hat sich von unter 20 Mio. im Jahr 2000 auf heute über 50 Mio. gesteigert, zusätzlich ist die durchschnittliche tägliche Verweildauer im Internet im gleichen Zeitraum um ca. 50 % auf mehr als 2 Stunden pro Tag gestiegen (Schenk et. al, 2011). Das weltweit benötigte Datenvolumen verdoppelt sich im Durchschnitt alle zwei Jahre und hat im Jahr 2011 die 1,8 Zettabyte-Marke erreicht (IDC, 2011). Die Folge ist, dass trotz Anstrengungen in der Vergangenheit den Ressourcenbedarf der IKT zu senken (Green in der IT), dieser kontinuierlich gestiegen ist. Dass dieser Anstieg in der IKT-Nutzung überhaupt möglich ist, ist zumindest teilweise auch auf die erreichten Effizienzsteigerungen zurückzuführen. Es liegen hier also z. T. erhebliche Rebound Effekte vor.

Von einem „Rebound-Effekt“ oder auch „Bumerang-Effekt“ wird gesprochen, wenn eine Effizienzverbesserung mit der Absicht vorgenommen wird, den Input (Energieverbrauch, Materialeinsatz etc.) zu senken, diese Wirkung dann aber nicht eintritt und der Ressourcenverbrauch möglicherweise mittel- und langfristig sogar steigt. Rebound-Effekte beschreiben also unbeabsichtigte Folgewirkungen. Arten und Gründe für Rebound-Effekte sind vielfältig und bedürfen einer differenzierten Betrachtung.

Auch im Bereich „Green durch IT“ sind erhebliche Rebound-Effekte festzustellen bzw. zu vermuten. Aktuelle wissenschaftliche Untersuchungen gehen davon aus, dass sich die Güterverkehrleistung in Deutschland von 2004 bis zum Jahr 2025 um 70 % erhöhen wird (BMVBS, 2010). Dieser Anstieg wird letztendlich erst durch die Effizienz steigernden IT-Lösungen in den Bereichen Verkehr und Logistik ermöglicht. Auch wenn Tools für Videokonferenzen und Online-Zusammenarbeit es ermöglichen, Dienstreisen und Berufsverkehr zu verringern, so ist doch mindestens teilweise davon auszugehen, dass die erzielten Zeitgewinne und andere Ressourcen für zusätzliche Mobilität genutzt werden. Bisherige Untersuchungen wie z. B. die Untersuchung Smart 2020 Addendum Deutschland (BCG/Gesi, 2009), die die Potenziale zur Ressourceneinsparung von „Green durch IT“ ermittelt haben, berücksichtigten solche Rebound-Effekte in der Regel nicht bzw. nur unzureichend.

Eng mit dem Thema Rebound-Effekte verbunden ist die Fragestellung, welche Möglichkeiten überhaupt bestehen, den Ressourcenbedarf insgesamt durch den intelligenten Einsatz von IKT-Produkten zu reduzieren. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass aufgrund der technischen, ökonomischen und sozialen Randbedingungen das Ausmaß der Rebound-Effekte in den verschiedenen Anwendungsbereichen unterschiedlich ist. Während insbesondere im Verkehrsbereich damit zu rechnen ist, dass Effizienzsteigerungen zu einem großen Teil zu einer Erhöhung der Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems und damit zu mehr Verkehrsleistung führen können, sind in anderen Bereichen wie z. B. im Bereich

Smart Buildings durchaus deutliche absolute Ressourceneinsparungen durch die effizientere Nutzung von Wärme und Strom möglich (Pöschk, 2010).

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Möglichkeiten, durch IKT-Lösungen Ressourcen zu sparen, abhängig von der Art der Green IT Lösung („Green in der IT“, „Green durch IT“) sind. Neben den Einsparungen im Bereich Energie werden in Zukunft zunehmend Fragen der Materialeffizienz und der Nutzung seltener Erden und Metalle eine wichtige Rolle spielen. Der Bereich „Green durch IT“ weist sehr hohe Effizienzpotenziale auf. Hier sind jedoch unterschiedliche Ausmaße von Rebound-Effekten zu erwarten. Die Ableitung von Maßnahmen, mit deren Hilfe die Ressourceneinsparpotenziale von Green IT - Lösungen gehoben und unterstützt werden sollen, muss diese genannten Aspekte berücksichtigen.

In Deutschland wurde bislang eine Reihe von Initiativen ergriffen, die sich um die Erschließung von Umweltentlastungspotenzialen in der Informations- und Kommunikationstechnologie (IKT) und durch IKT bemühen. Dazu zählen z. B. die Förderprogramme „it2green“ und „E-Energy“ des Bundeswirtschaftsministeriums, der Förderschwerpunkt „IT goes green“ im Umweltinnovationsprogramm von Bundesumweltministerium und Umweltbundesamt oder der Schwerpunkt "Leistungselektronik zur Energieeffizienz-Steigerung" innerhalb des Förderprogramms "IKT2020" des Bundesforschungsministeriums.

2.2 Ziel und Aufgabenstellung des Gutachtens

Gemäß Leistungsbeschreibung vom 14.12.2011 erwartet der Auftraggeber von dem Gutachten die Bearbeitung folgender Aufgabenstellung:

Es sollen die Einsatzmöglichkeiten von IKT-Lösungen, die daraus resultierenden Datenvolumina, und der dafür notwendige Ressourcenbedarf (insbesondere Energie) aufgezeigt, prognostiziert und analysiert sowie mit statistisch belastbaren Zahlen unterfüttert werden. Des Weiteren sollen folgende Fragen beantwortet werden: Welche Möglichkeiten für eine Reduzierung des Ressourcenbedarfs bei einer gleichzeitig fortschreitenden globalen Ausweitung der Internet-Infrastruktur bieten sich an? Welche Maßnahmen können ergriffen werden? Gleichzeitig ist zu fragen, welche Auswirkungen die Reduzierung des Ressourcenbedarfs hat? Zu diskutieren sind hierbei auch "Rebound"-Effekte insbesondere vor dem Hintergrund des Nutzerverhaltens hinsichtlich der Internet-Infrastruktur und die Frage, wie dies anhand des Forschungsstandes einzuschätzen ist?

Das Gutachten soll diese Fragen anhand der nachehend genannten Schwerpunkte beantworten:

Szenarien und Prognosen

- Entwicklung des Ressourcenbedarfs für den Betrieb der Internet-Infrastruktur unter Berücksichtigung der Trends bei der Mikro- und Nanoelektronik, bei den Rechenzentren ("Data Center") sowie bei den notwendigen Endgeräten
- Ansätze und Strategien zur Steigerung der Ressourceneffizienz unter Berücksichtigung des Verbrauchs seltener Metalle bzw. Erden

- Szenarien für "Green IT" in der Wirtschaft unter besonderer Berücksichtigung von "Smart Metering", von IKT-gestütztem Energiemanagement von Gebäuden und Quartiermanagement ("Smart Cities"), "Smart Mobility"
- Szenarien für neue Anwendungen und Dienste durch IT-Einsatz ("Green durch IT") unter Einbeziehung von Best-Practice-Beispielen (u. a. Cloud Computing)
- Analyse der Stärken und Schwächen insbesondere in Deutschland

"Rebound"-Effekte

- Diskussion der "Rebound"-Effekte vor dem Hintergrund des Forschungsstandes hinsichtlich der zunehmenden Verbreitung von internetfähigen Endgeräten, der Nutzung seltener Metalle bzw. Erden für die Herstellung von Netzkomponenten und internetfähigen Endgeräten, des Einsatzes von "Smart Metering", von IKT-gestütztem Energiemanagement von Gebäuden und Quartiersmanagement ("Smart Cities"), "Smart Mobility".

2.3 Aufbau des Gutachtens

Auf Basis der skizzierten Ausgangssituation gliedert sich das Gutachten in drei Hauptabschnitte:

AP 1: Aktueller Stand, Trends, Szenarien und Prognosen

Zunächst wird im Kapitel 3 eine Trendanalyse vorgenommen. Im Anschluss daran wird in Kapitel 4 der aktuelle Ressourcenbedarf der IKT in Deutschland dargestellt. Kapitel 5 befasst sich mit den Potenzialen zur Senkung des Ressourcenbedarfs durch IT-Lösungen in Bereichen außerhalb des IKT-Sektors, also im Bereich von Gebäuden, Stromnetzen, Verkehr usw. Dem Thema „Seltene Erden und Metalle“ wird mit Kapitel 6 ein eigenes Kapitel gewidmet. Im Anschluss daran werden in Kapitel 7 Szenarien und Prognosen zur künftigen Entwicklung der Ressourcenbedarfe und Einsparpotenziale durch Green IT Lösungen vorgestellt.

AP 2: Rebound-Effekte

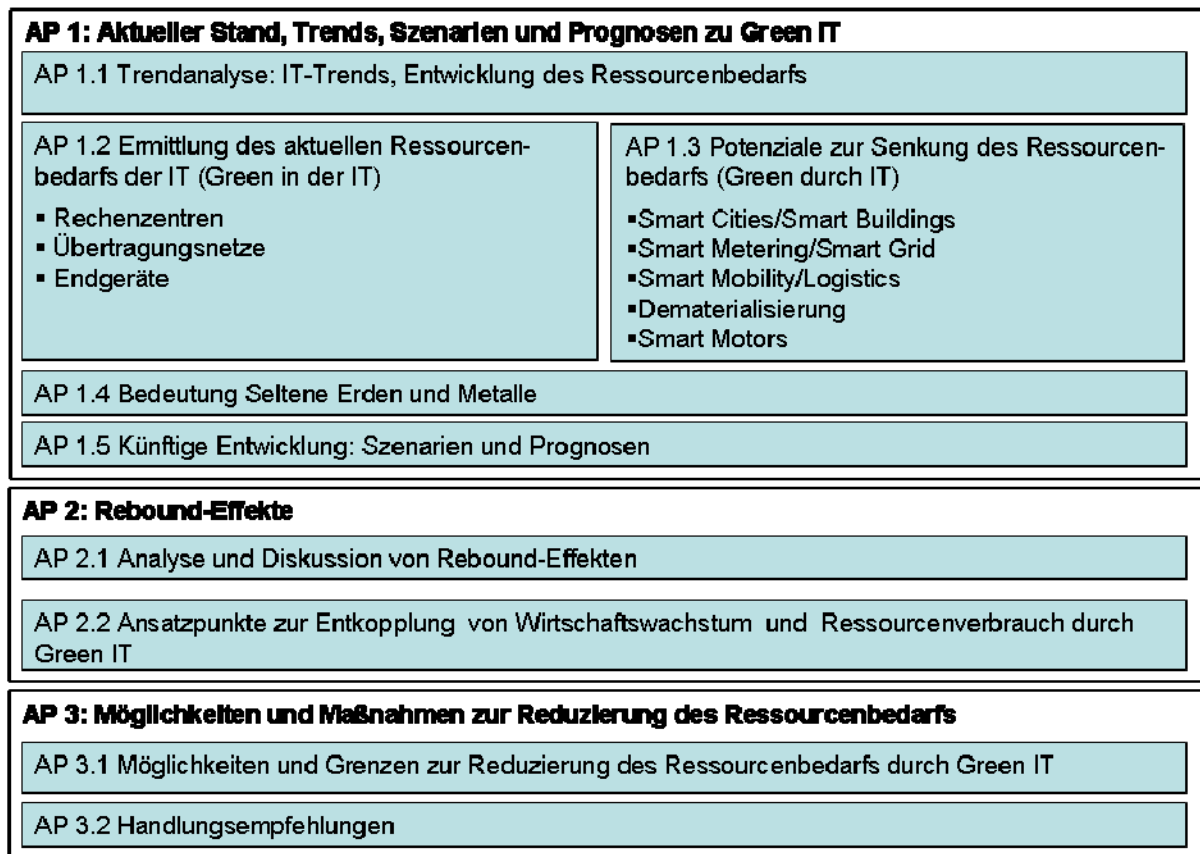
Kapitel 8 stellt die Problematik der Rebound-Effekte im IT-Bereich vor, nimmt eine Abschätzung potenzieller Rebound-Effekte in der Zukunft vor und gibt in diesem Zusammenhang erste Hinweise zu Möglichkeiten der Entkopplung von Wirtschaftswachstum und Ressourcenbedarf durch Green IT Lösungen.

AP 3: Möglichkeiten und Maßnahmen zur Reduzierung des Ressourcenbedarfs

In Kapitel 9 werden zusammenfassend die Potenziale zur Ressourcenschonung durch Green IT dargestellt und Handlungsempfehlungen für die Politik gegeben.

Das Gutachten fokussiert in seinen Analysen auf die Situation in Deutschland. Bezüge zu den internationalen Entwicklungen werden wenn nötig hergestellt, insbesondere, um die Stärken und Schwächen Deutschlands im Vergleich darzustellen.

Abbildung 1: Struktur des Gutachtens



Quelle: Eigene.

3 Trendanalyse: Ressourcenrelevante IKT-Trends

Im Vergleich zu anderen Branchen und Segmenten zeichnet sich die IKT insbesondere durch eine hohe Innovationsgeschwindigkeit und einen schnellen Wandel der Produkt- und Gerätevielfalt aus. Innerhalb weniger Jahre kommen völlig neue Produkte auf den Markt und es entwickeln sich neue Anwendungsfelder für IKT-Lösungen.

Für das Gutachten relevant sind z. B. aktuelle Trends in Rechenzentren, bei Netzwerkinfrastrukturen und Endgeräten, das Cloud Computing, das Web als Plattform, und die vielfältigen Einsatzmöglichkeiten von IKT-Lösungen in anderen Branchen. Beispielsweise werden aktuell intensiv diskutierte Konzepte wie Cloud Computing und Desktop Virtualisierung zu grundsätzlichen Veränderungen im Zusammenspiel zwischen Software und Hardware führen. Software und Rechenleistung wird ins Rechenzentrum verlagert, wo sie effizienter bereitgestellt werden kann. Dies führt aber nur zu Verbesserungen der Gesamteffizienz, wenn künftig auch für diesen Anwendungsfall geeignete effiziente Endgeräte eingesetzt werden.

Das folgende Kapitel soll einen Überblick über jene Trends geben, die für den Ressourcenverbrauch der IKT von Bedeutung sind. Diese lassen sich in drei Bereiche unterteilen:

- Der erste Bereich umfasst die übergreifenden Mega-Trends der IKT. Dies sind insbesondere die Trends „Digitales Leben“, „Mobilität“, „Ubiquitäre Intelligenz“, „Konvergenz“, „Wissensbasierte Ökonomie“ und „Vernetzung“.
- Der zweite Bereich beschreibt wesentliche technologische Trends der IKT. Dies umfasst z. B. aktuelle Trends in der Mikro- und Nano-Elektronik sowie in Internetinfrastrukturen, Übertragungsnetzen und Endgeräten. Gegliedert ist der Bereich in die Abschnitte „Elektronikbauteile“, „Rechenzentren“, „Netze“ und „Endgeräte“.
- Der dritte Bereich schließlich umfasst aktuelle Trends in der Nutzung von IKT-Lösungen, wie z. B. die deutliche Zunahme der audiovisuellen Unterhaltung über das Internet (Internetfernsehen, Musik, Foto, Video und Computerspiele) oder der Zunahme der mobilen Nutzung des Internets.

3.1 Megatrends mit Bezug zur IKT

Dieser Abschnitt beschreibt einige wesentliche Megatrends der gesellschaftlichen Entwicklung, die einen erheblichen Einfluss auf die künftige Nutzung der IKT haben und damit auch Umweltwirkungen der IKT-Nutzung beeinflussen.

3.1.1 Digitalisierung/Digitales Leben

Informations- und Kommunikationstechnologien bestimmen mehr und mehr unseren Alltag. Für viele Menschen ist IKT und insbesondere das Internet ein zentraler Bestandteil des privaten und beruflichen Alltags. Digitale Technologien führen zu Veränderungen bei Verwaltungs- und Produktionsprozessen in Unternehmen, Produkten des täglichen Gebrauchs und in der Freizeitgestaltung vieler Menschen.

Folgende Sachverhalte dokumentieren beispielhaft diese Entwicklung:

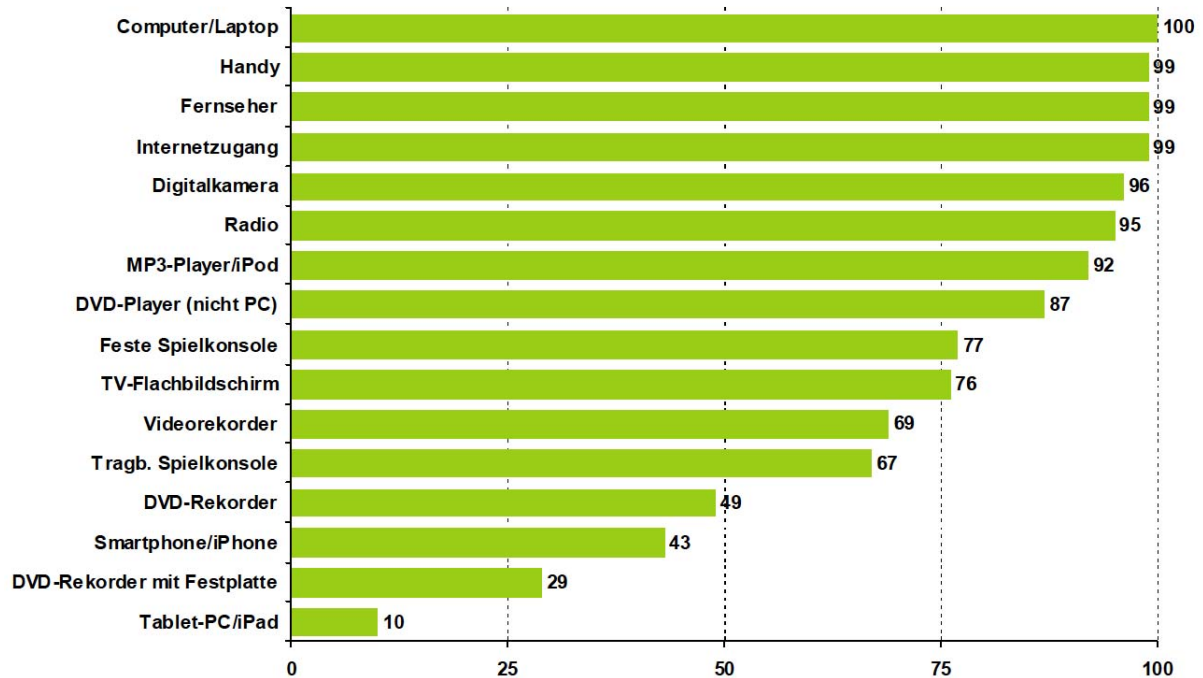
- Laut (N)ONLINER Atlas stieg der Anteil der Internetnutzer in den letzten Jahren kontinuierlich an – im Jahr 2003 waren es ca. 50 %, im Jahr 2011 bereits 75 % der deutschen Bevölkerung (Initiative D21, 2011, 11). Dabei steigt die durchschnittliche Nutzungszeit ebenfalls an. Laut ARD/ZDF-Online-Studie verbrachten die Internetnutzer im Jahr 2011 durchschnittlich 137 Minuten pro Tag an 5,6 Tagen pro Woche online (ARD/ZDF Onlinestudie, 2012).
- IKT dringt in immer mehr Lebensbereiche. Nach Angaben des BITKOM verfügt aktuell (Juni 2012a) fast jeder zweite verkaufte Fernseher (46 %) über einen Internetanschluss. In einer Marktstudie der GfK im Auftrag des BITKOM wurde ermittelt, dass in Deutschland bereits im Jahr 2010 fast 13 Milliarden EUR Umsatz mit „Connectable Products“ (zum Beispiel PCs, Notebooks, Tablet-PCs, Smartphones, Connected TVs, Blu-ray Player mit Internetzugang, Internetradios, Webcams etc.) gemacht wurde. Für das Jahr 2011 rechnet BITKOM mit einem Marktwachstum von ca. 30 % auf über 16 Mrd. €.
- Unter Stichwörtern non-territoriale Bürokonzepte, Shared Desk oder Plug & Work werden neue Büro- und Arbeitsmodelle erprobt. Diese Ansätze greifen zum einen ältere Konzepte des Teleworking auf und tragen zum anderen aktuellen Entwicklungen wie zunehmender Mobilität in spezifischen Branchen (Versicherungen, Softwareindustrie, etc.), erhöhten Betriebskosten und dem Wunsch nach einer Flexibilisierung von Arbeitsmodellen und -zeiten Rechnung.
- Traditionelle Plakatwerbung wird zunehmend durch digitale Medien ergänzt (siehe Abbildung 2). In Shopping-Centern, auf Bahnhöfen und Flughäfen und mehr und mehr auch im öffentlichen Verkehrsraum werden Flachbildschirme mit teilweise mehreren Metern Bildschirmdiagonale eingesetzt.
- Künftige Generationen wachsen mit IKT auf. Während in der Generation 50+ immer noch fast 50 % der Deutschen das Internet nicht nutzen, ist bei den sogenannten „Digital Natives“ – also Personen, die mit dem Internet aufgewachsen sind, dieser Anteil fast null. Entsprechend hoch ist die Ausstattung der Haushalte, in denen Digital Natives wohnen mit IKT-Produkten (vgl. Abbildung 3).
- Die Digitalisierung führt zur Konvergenz von Technologien und Endgeräten. Unter dem Stichwort Unified Communications erfolgt eine Integration von unterschiedlichen Kommunikationsmedien in einer einheitlichen Anwendungsumgebung. PCs werden zusätzlich als Telefone genutzt, Smartphones werden als mobile Internetzugänge oder Musikspeicher verwendet und WLAN-Infrastrukturen dienen neben der Verbindung mit dem Internet als Zugang für Internetradio und Fernsehen. Die Zukunft vieler Anwendungen, Endgeräte und ihrer Funktionen ist damit offen, zumal neue Technologien wie E-Paper und E-Reader mit weiteren Endgeräten, neuen Softwarestandards und Übertragungsprotokollen auf den Markt drängen.

Abbildung 2: Nutzung von Flachbildschirmen für Werbung



Bildquelle: Borderstep 2012.

Abbildung 3: Geräteausstattung in Haushalten mit Jugendlichen zwischen 12 und 19 Jahren



Quelle: JIM 2011, Angaben in Prozent

Basis: alle Befragten, n=1.205

Quelle: MFS 2011, 5.

3.1.2 Ubiquitäre Intelligenz

Mit den Stichwort „Ubiquitäre Intelligenz“ oder auch „Ubiquitous Computing“ oder „Pervasive Computing“ wird der Sachverhalt beschrieben, dass IKT zunehmend allgegenwärtig wird. Diese Vision, die bereits vor dem breiten Erfolg des Internets im Jahr 1988 von Mark Weiser formuliert wurde, wird mehr und mehr Realität. Informationen und Rechenleistungen stehen in Deutschland fast an jedem Ort zur Verfügung, wie folgende Zahlen belegen:

- Der Nutzung des Internets wird immer mobiler. 26,5 % der Deutschen benutzen bereits das mobile Internet (Initiative D21, 2012, 20).
- Der klassische PC wird mehr und mehr durch mobile und kleinere Geräte ersetzt. Verfügten im Jahr 2006 noch fast 65 % der Haushalte über einen stationären PC, so waren es im Jahr 2011 noch 61 %. Dafür stieg der Anteil der Haushalte, die einen mobilen PC besitzen, im gleichen Zeitraum von 21 % auf 52 % an. Der Ausstattungsgrad der Haushalte mit Mobiltelefonen liegt derzeit bei 90 % (Destatis, 2012).
- Das Internet der Dinge setzt sich mehr und mehr durch. Damit ist gemeint, dass immer mehr Gegenstände der realen Welt als „informatisiert“ also elektronisch identifiziert (AutoID) gelten und miteinander vernetzt werden können. Eine Studie von Ericsson geht davon aus, dass im Jahr 2020 weltweit insgesamt 50 Mrd. Geräte vernetzt sein werden.²
- Auch der Markt für RFID – Produkte (Radio Frequency Identification) entwickelt sich sehr dynamisch. Laut einer Studie von ABI Research soll der weltweite RFID-Markt aktuell jährlich um 14 % ansteigen und im Jahr 2013 bei 8,25 Mrd. US \$ liegen.³ In Deutschland sollen im Jahr 2012 im Regelaustausch alle 45 Mio. EC-Karten-Besitzer bei Sparkassen Schritt für Schritt EC-Karten mit RFID ausgestattet werden. Außerdem wollen viele Banken bis Mitte 2012 die kontaktlose Visa-Zahlungskarte (Visa payWave) an ihre Kunden ausgeben.

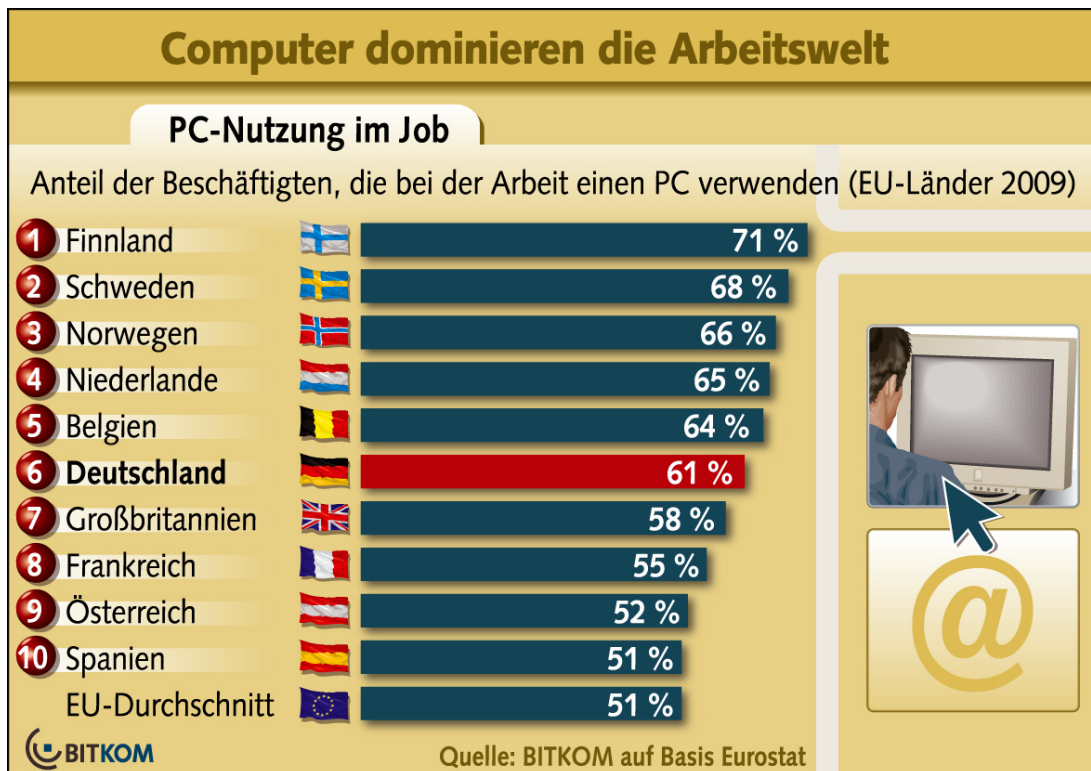
3.1.3 Wissensbasierte Ökonomie

Der Wandel der Ökonomie in Richtung Dienstleistungsgesellschaft ist gleichzeitig ein Wandel in Richtung wissensbasierte Ökonomie. Waren im Jahr 1996 noch 65 % der Beschäftigten in Deutschland im Tertiären Sektor tätig, so sind es im Jahr 2008 bereits 73 %. Der strukturelle Wandel geht mit einer Veränderung der Qualifikationsstruktur bei der erwerbstätigen Bevölkerung einher. In der Wissensgesellschaft gewinnen mittlere und höhere Bildungsabschlüsse zunehmend an Bedeutung.

² Vgl. <http://www.ericsson.com/res/docs/whitepapers/wp-50-billions.pdf>.

³ Vgl: VDI Nachrichten, <http://www.vdi-nachrichten.com/artikel/RFID-optimiert-Lager-und-Logistikprozesse/58303/2>.

Abbildung 4: Anteil der Beschäftigten, die am PC arbeiten, im europäischen Vergleich



Quelle: BITKOM 2010a.

3.1.4 Auswirkungen der Megatrends auf die ökologische Bedeutung der IKT

In Hinblick auf das Thema Green IT haben die genannten Megatrends vor allem zwei Auswirkungen. Zum einen steigen die Anzahl der IKT-Geräte sowie der Anteil der IKT in anderen Geräten und Anlagen wie z. B. Haushaltsgeräten, Automobilen und Fertigungsmaschinen weiter an. Zwar böte insbesondere die Konvergenz der Geräte auch Potenzial zur Verringerung der Anzahl der im Einsatz befindlichen Geräte sowie zur Dematerialisierung und Ressourceneffizienz, falls die Multifunktionalität der Endgeräte vom Anwender genutzt würden. Aktuell ist eine solche Entwicklung jedoch noch nicht erkennbar. Zum anderen bieten sich künftig zunehmend Chancen, durch IKT Energie und andere Ressourcen einzusparen. So können durch moderne Arbeitsplatzkonzepte z. B. Büro- und Infrastrukturf Flächen reduziert und durch die Verringerung des Pendelverkehrs Energie und andere Ressourcen eingespart werden. Das realisierbare Potenzial hängt jedoch stark von den jeweiligen Rahmenbedingungen und den Bilanzgrenzen ab. Auch sind Rebound-Effekte zu befürchten (siehe Kapitel 8). Bisher gibt es nur wenige Untersuchungen, die das Umweltentlastungspotenzial innovativer Bürokonzepte umfassend untersucht haben. Neben der Weiterentwicklung der organisatorischen und infrastrukturellen Aspekte der neuen Bürokonzepte besteht auch ein Bedarf, die dafür genutzte Hard- und Software entsprechend anzupassen.

3.2 Trends in der Technologieentwicklung

3.2.1 Aktuelle Trends in der Mikro- und Nano-Elektronik

Grundsätzlich wird die Herstellung immer kleiner strukturierter Halbleiter möglich. Diese Fortschritte in der Halbleiterindustrie bzw. die generelle Miniaturisierung bei den Elektronikbaugruppen wirken sich auf den Ressourcenbedarf der IKT in unterschiedlicher Weise aus. Hier sind mehrere gegenläufige Entwicklungen zu beobachten, die nicht genau quantifiziert werden können. Ein wichtiger Treiber der Entwicklung ist neben dem technischen Fortschritt auch der Kostendruck. Auffällig ist beispielsweise, dass bei der Aufbau- und Verbindungstechnik (AVT) nach kostengünstigen Lösungen gesucht wird. In einfachen Chip-Packages werden hochwertige Materialien wie Gold und Palladium (z. B. bei Drahtbonds) teilweise durch Aluminium ersetzt. Auch bei Oberflächenfinishes wird gespart, was sich in der Material-Bilanz positiv auswirkt.

Gleichzeitig nehmen bei komplexeren Baugruppen (Multi-Chip-Module) die Anforderungen an die Verdrahtung/Kontaktierung wieder zu. Des Weiteren steigt die Lagenzahl und Bestückung der Platine mit aktiven Bauelementen bzw. die Erweiterung über Speicherkartensockel. Gerade die Kontaktflächen weisen hauchdünne Goldbeschichtungen auf. Der künftige Bedarf an Gold, Silber, Palladium und anderen Materialien für die Aufbau- und Verbindungstechnik ist nicht genau zu bestimmen und müsste in weiterführenden Studien untersucht werden.

Schwer zu beurteilen sind auch die umweltbezogenen Auswirkungen der immer leistungsfähigeren Halbleiterbauelemente. Hier besteht ein unmittelbarer Zusammenhang zwischen Performanceaspekten und Materialzusammensetzung. Es ist davon auszugehen, dass die Anzahl der Prozessorkerne pro Server weiter ansteigen wird. Insbesondere die kleineren Strukturen und gestiegenen thermischen Anforderungen könnten den Einsatz hochwertiger Materialien wieder befördern. Probleme bestehen bezüglich der Stabilität und Alterung der Chips. Infolge könnte es zu kürzeren Nutzungszyklen und damit einer erhöhten Nachfrage an Halbleiterbauelementen kommen. Noch sind aber die meisten Halbleiterbauelemente von diesen Problemen nicht betroffen.

Auch die Entwicklung bei Kühlkörpern hat potentielle Auswirkungen auf die Materialzusammensetzung. Das am häufigsten verwendete Material ist Aluminium. Aufgrund geringer Kosten, des leichten Gewichts und guter Verarbeitungsmöglichkeiten wird Aluminium für passive Kühlkörper verwendet. Ein Nachteil von Aluminium ist gegenüber Kupfer die geringere Wärmeleitfähigkeit. Daher wird Kupfer bei kompakteren Bauformen (z. B. Blades) zur Kühlung von Prozessoren, Chipsätzen und anderen leistungsstarken Halbleiterbaugruppen verwendet. Aufgrund des zunehmend kompakteren Aufbaus der Elektronik (hohe Bestückungsdichte mit aktiven Bauelementen) kommt eine aktive Wärmeableitung über Kupfer-Rohre (Heatpipes) vermehrt zum Einsatz. Diese Trends werden voraussichtlich zu einem zunehmenden Bedarf an Kupfer führen. In einer Untersuchung des Borderstep Institutes zum Materialbestand der Rechenzentren in Deutschland für das Umweltbundesamt aus dem Jahr 2010 (Hintemann und Fichter, 2010) wird davon ausgegangen, dass sich der Anteil der Kupferkühlkörper von derzeit ca. 25 % auf 33 % im Jahr 2015 erhöhen wird. Eine weitere mögliche Entwicklung sind Kühlkörper aus keramischen Werkstoffen, da sie gute Eigenschaften bezüglich Wärmeleitfähigkeit, Kompaktheit und Stabilität aufweisen.

Der in der Industrie kontrovers diskutierte Einsatz von Festkörperlaufwerken (Solid State Drives, SSD) und Hybridfestplatten (Hybrid Hard Disk, HHD) könnte sich (unabhängig von technischen Parametern wie Kapazität, Zugriffsgeschwindigkeit und Leistungsaufnahme) in zweierlei Hinsicht auswirken. Einerseits sind SSD kleiner im Formfaktor, was in einer Reduktion des Gehäuse-Materials (Aluminiumguss bei herkömmlichen magnetischen HDD-Festplatten) resultiert. Andererseits steigt der elektronikspezifische Materialanteil durch die Verwendung von deutlich mehr Halbleiterbauelementen (Chips) und die entsprechende Aufbau- und Verbindungstechnik (AVT). Positiv könnte sich der Trend zu SSD bezüglich des Bedarfs an Ruthenium bzw. Platin auswirken. Diese Materialien werden in geringen Mengen (auf den ermittelten Bestand gerechnet ca. 40 kg) in der Beschichtung der eigentlichen Platten eingesetzt. Die o. g. Borderstep-Studie geht davon aus, dass der Anteil von SSD-Festplatten an der Gesamtzahl der Festplatten im Jahr 2015 ca. 20 % betragen wird.

3.2.2 Trends im Bereich Rechenzentren

Generell ist im Bereich Rechenzentren weiterhin mit einer deutlichen Zunahme des Bedarfs an zentraler Rechenleistung und Datenspeicherkapazität zu rechnen. Dabei ist davon auszugehen, dass es zu einer weiteren Konzentration der Rechenleistung in großen Rechenzentren kommt. Treiber hierfür sind unter anderem auch die Anstrengungen zur Verbesserung der Energieeffizienz und Wirtschaftlichkeit.

Aktuelle IT-Trends wie Virtualisierung oder Cloud Computing können eine materialeffiziente Nutzung der zentralen Hardware im Rechenzentrum ermöglichen. Diese Konzepte helfen, die Auslastung der Systeme deutlich zu erhöhen und freie Rechenkapazitäten für andere Anwendungen und Nutzer zur Verfügung zu stellen. So liegt die Auslastung bei nicht-virtualisierten Volumen-Servern häufig nur bei 10-15 %. Über Virtualisierung ist eine erhebliche Steigerung möglich. Damit sinkt der Materialbedarf; die Reduktion der Serveranzahl bis zum Faktor 10 beim Einsatz von Virtualisierung ist heute keine Seltenheit (BITKOM 2008b, 23).

Virtualisierung und Cloud Computing

Virtualisierung und Cloud Computing gelten als die derzeit stärksten Mittel, um die steigende Nachfrage nach Hardwareressourcen bzgl. Speicherung, Datentransfer und Rechenleistung zu befriedigen und gleichzeitig die daraus resultierende Nachfrage nach Energie auf ein möglichst geringes Maß zu begrenzen.

Der Begriff der Virtualisierung beschreibt ein Prinzip, mit dem die Nutzung von den konkreten Ressourcen in der IT von der tatsächlichen Hardware abstrahiert wird.

Bei der Server-Virtualisierung werden mehrere virtuelle Server auf einem einzigen physischen Server ausgeführt. Ebenso wird damit die Bündelung mehrerer physischer Server zu einem virtuellen Server (Computercluster) bezeichnet.

Virtualisierung ist insbesondere für Rechenzentren von großer Bedeutung, da durch das Bereitstellen von mehreren (virtuellen) Servern pro physischem Server die Auslastung der Hardware wesentlich gesteigert werden kann, und in der Konsequenz weniger physische Server eingesetzt werden müssen

(Ihlenfeld, 2007). Virtualisierung ist die Voraussetzung für Cloud Computing, das als nächster Schritt in der Abstraktion aufgefasst werden kann.

Cloud Computing (deutsch etwa Rechnen in der Wolke) bezeichnet primär den Ansatz, abstrahierte IT-Infrastrukturen (z. B. Rechenkapazität, Datenspeicher), fertige Programmpakete und Programmierungsumgebungen dynamisch an den Bedarf angepasst über ein Netzwerk zur Verfügung zu stellen. Sekundär geht es bei Cloud Computing auch darum, „alles“ als dynamisch nutzbaren Dienst zur Verfügung zu stellen, sei es nun Rechenkapazität, Buchhaltung, einfachste von Menschen verrichtete Arbeit, eine fertige Softwarelösung oder beliebige andere Dienste.

Trendaussagen

Die Hilfsmittel und Unterstützung für Virtualisierung werden sich weiter verbessern und eine bessere Integration aller Komponenten ermöglichen. Auch der Linuxkernel 3.0 verfügt inzwischen über volle Virtualisierungsunterstützung für Gastbetriebssysteme. Die Ausbreitung der Virtualisierung lässt sich auch an wirtschaftlichen Erfolgen ablesen. Der Hersteller der Virtualisierungssoftware VMware konnte beispielsweise ein Umsatzplus von 30 % vorweisen (Heise Online, 2011a).

Cisco (2011b) vermutet, dass insbesondere Spiele von „offline“ zur „online / cloud“ wechseln werden (Gaming, Gaming-on-demand, Streaming gaming). Die derzeitige Internetbandbreite von Spielen hat Ciscos Angaben nach nur einen Anteil an 0.04 % der gesamten Information. Sollte sich das Spielen auf Cloud-Plattformen durchsetzen, könnte „Spielen“ schnell zu der Kategorie mit der größten Internetbandbreite werden.

Ressourcenrelevanz

Durch Virtualisierung und Cloud-Architektur kann die Nutzung von Hardwareressourcen optimiert werden. Es werden nur die Hardwareressourcen eingesetzt, die für einen Service benötigt werden. Physische Server können ausgeschaltet werden, wenn geringe Lastanforderungen vorliegen. Überkapazität kann an andere Dienste delegiert werden. Damit sind erhebliche Energieeinsparungen möglich.

Einsparungen haben auch indirekt Einfluss auf andere Ressourcen. Firmenrechenzentren werden ausgegliedert, da sich damit das Verhältnis von Wartungsaufwand zu Serveranzahl wesentlich verbessern lässt. Damit fallen viele Kosten für den Erhalt eines Rechenzentrums weg (das bezieht sich auch auf den Platzbedarf und die für den Betrieb durch Menschen notwendige Infrastruktur). Unter dem Strich beruht der Effizienzgewinn darauf, dass die zur Abdeckung von Lastspitzen notwendigen Reservekapazitäten sehr vieler Nutzer zu Pools zusammengefasst werden, wodurch sich die Last verstetigt und also die durchschnittliche Auslastung der physischen Kapazitäten verbessert.

Als Beispiel sei darauf hingewiesen, dass die US-Regierung die Schließung von 800 Rechenzentren plant, weil die entsprechenden Dienste effizienter über Cloud-Dienste bereit gestellt werden können (Lohr, 2011).

Hardware-Entwicklung in Rechenzentren

Die Hardware von Rechenzentren ist Gegenstand zahlreicher Optimierungsbemühungen. Neben Prozessoren und Festplatten wird auch die Gleichstromversorgung ganzer Rechenzentren erprobt. Neben immer energieeffizienteren Ein- oder Mehrkernprozessoren sind für spezielle rechnergestützte Simulationsaufgaben neue, hocheffiziente Prozessor- und Servertypen in der Erprobung⁴. Diese beruhen auf eingebetteten Prozessoren (Embedded Processors), die im Verhältnis Rechenoperationen zu Stromverbrauch eine 400fach höhere Leistung aufweisen als konventionelle Serverchips. Bereits eingesetzt werden Festplatten (Serial ATA; siehe Glossar unter „SATA“), die bis zu 44 % weniger Energie im Betrieb benötigen als früher verwendete Festplatten. Großes Potenzial birgt noch der Einsatz von Solid-State-Festplatten oder Hybrid-Hard-Drive (HHD-Festplatten) in Rechenzentren, die die Technik herkömmlicher Festplatten mit der von SSD-Festplatten kombinieren. Schließlich bietet die zentrale Stromversorgung von Rechenzentren mit Gleichstrom ein erhebliches Effizienzpotenzial (siehe Glossar: Gleich- und Wechselstromversorgung in Rechenzentren). Erste Versuche zeigen, dass durch die Reduktion von Wandlungsverlusten sowie den Einsatz gleichstromfähiger Komponenten (Server, USV, etc.) in Rechenzentren mindestens 10 % Energie im Vergleich zum effizienten Betrieb mit Wechselstrom eingespart werden können⁵.

Es zeigen sich aktuell folgende Trends:

- Aktuell ist ein Trend zur Konzentration der Rechenleistung auch innerhalb von Rechenzentren festzustellen. Neben dem generellen Trend zur Miniaturisierung und Leistungssteigerung wird künftig insbesondere damit gerechnet, dass die Absatzzahlen von Mainframe-Systemen und Blade-Servern weiter zunehmen werden (BITKOM, 2008a: 3; Fraunhofer IZM/ISI, 2009). Diese Konzentration der Rechenleistung und die effiziente Nutzung von Rechnerkapazitäten führen zu einer relativen Materialersparnis.
- Experten rechnen damit, dass die heute verbreiteten rotierenden Festplatten in einigen Jahren durch Solid State Disks (SSD) mit Flash-Speicher-Chips abgelöst werden. Die aktuellen Preisentwicklungen bei SSD machen diese Entwicklung wahrscheinlich. Bezüglich des Produktgewichts und des Energieverbrauchs weisen SSD deutliche Vorteile auf.
- Die aktuellen Anstrengungen zur Verbesserung der Energieeffizienz der IT-Systeme haben einen positiven Materialeffekt auf die Rechenzentrumsinfrastruktur. Benötigen die IT-Systeme weniger Strom und erzeugen damit auch weniger Abwärme, so werden damit kleinere USVs und Klimaanlage benötigt.
- Kühlsysteme und -medien: Aufgrund der steigenden Energiepreise der letzten Jahre sind die Effizienzsteigerung in der Kühlung sowie die Suche nach neuen Kühlsystemen und -medien zu ei-

⁴ Siehe hierzu das Forschungsprojekt GREEN FLASH des Lawrence Berkeley National Laboratory unter <http://www.lbl.gov/CS/html/greenflash.html> [19.05.2009].

⁵ Siehe aktuelle Forschungsarbeiten des Lawrence Berkeley National Laboratory unter unter: <http://hightech.lbl.gov/dc-powering/> [19.05.2009].

ner zentralen Herausforderung für den Betrieb von Rechenzentren geworden. Bislang eher in großen Rechenzentren erprobte, alternative Kühlungsansätze beruhen z. B. auf Low-exergy-Wärme aus solarthermischen Anlagen oder der Fernwärmeversorgung mit der thermische Kälteanlagen wie z. B. Absorptions- oder Adsorptionsanlagen betrieben werden. Außerdem sind erste Anlagen zur Nutzung geothermischer Kältequellen (z. B. Boden oder Grundwasser) im Einsatz (BMU, 2008, 30 f.). Anwendungen beschränken sich bisher auf wenige Demonstrationsanlagen. Hier besteht noch reichlich Entwicklungs-, Anpassungs- und Transferbedarf um das bestehende Potenzial für eine breite Anwendung zu erschließen.

- Chipbasierte Kühlkonzepte: Effizienter als die Klimatisierung des gesamten Rechenzentrums ist eine direkte Kühlung der thermisch aktiven und sensitiven Teile eines Rechenzentrums und damit vor allem der Prozessoren. Eine besonders effiziente Kühlung der Prozessoren lässt sich mit Wasser als Kühlmedium realisieren, das einen sehr guten Wärmeübergang ermöglicht. Aufgrund der dann möglichen, niedrigeren Betriebstemperatur der Prozessoren kann auch eine Erhöhung der Leistung und der Lebensdauer erreicht werden. Während wassergekühlte Chips in Nischenanwendungen bereits seit einigen Jahren eingesetzt werden, forcieren große Chipentwickler und Serverhersteller den Einsatz nun durch die Entwicklung neuer dreidimensional vom Kühlmedium durchströmter Prozessoren, die hochwirksamen Wärmeübergang ermöglichen. Das Prinzip der Wasserkühlung ist auch auf andere Komponenten mit hoher thermischer Last, wie z. B. Netzteile und Speichermedien und auf andere Kühlmittel übertragbar. Mehrere Ansätze befinden sich im Stadium der Erprobung.
- Erhöhung der Arbeitstemperatur und Abwärmennutzung: In Verbindung mit den bereits genannten Maßnahmen der Kühlung stellen die Erhöhung der Arbeitstemperatur von Rechenzentren sowie die Nutzung der verbleibenden Abwärme zusätzliche Maßnahmen zur energetischen Optimierung eines Rechenzentrums dar. Es existieren eine Reihe von Beispielen aus Rechenzentren, die die Betriebstemperatur und damit auch die Ablufttemperatur auf deutlich über 30°C erhöht haben, ohne wesentliche Geräteausfälle zu riskieren (BMU, 2008, 26 f.). Dadurch verringert sich der Kühlbedarf erheblich. Dieser Ansatz kann insbesondere in Verbindung mit der gezielten Wasserkühlung thermisch sensibler Bauteile ein sinnvoller Ansatz sein. Die durch die Abluft und das Kühlwasser anfallende Abwärme kann zusätzlich zu Heizzwecken eingesetzt werden. Das Kühlwasser kann im Sommer effizient frei gekühlt werden. Erste Rechenzentren setzen bereits Wärmepumpen ein, um den Abwärmestrom auf ein für Heizzwecke nutzbares Niveau anzuheben und damit Heizenergie einzusparen.
- Skalierbare und adaptive Rechenzentren: In Zusammenhang mit der Konsolidierung von Rechenzentren stehen auch Konzepte zur Skalierung und Adaption von Rechenzentrumsinfrastrukturen. Anwender großer Rechenzentren nutzen teilweise hochmodulare Strukturen, die einen einfachen Austausch sowie eine Erweiterung von Komponenten (Server, Kühlung, Stromversorgung, etc.) im laufenden Betrieb ermöglichen. Zur kurzfristigen Erweiterung oder der vorübergehenden Einrichtung von Rechenzentren werden auch mobile Rechenzentren mit kompaktem Aufbau (z. B. auf Basis von Containern) angeboten. Diese Angebote spiegeln den Bedarf adaptiver Infrastrukturen im Bereich von Rechenzentren und IKT-Infrastruktur wieder. Modulare und adaptive

Strukturen sind jedoch auch für kleine und mittlere Rechenzentren relevant, da sie ein bedarfsgerechtes Wachsen ermöglichen und als Systemeinheiten aus Servern, Kühlung und Stromversorgung effizient gestaltet werden können. Modulare und adaptive Strukturen könnten so auch den Austausch einzelner besonders energierelevanter Komponenten vereinfachen und insgesamt zu einer längeren Nutzung des Gesamtsystems beitragen.

Softwareentwicklung für Rechenzentren sowie neue Betreibermodelle

- *Energieeffiziente Betriebssysteme:* Ein wichtiges, bisher noch nicht ausreichend berücksichtigtes Optimierungspotenzial für Rechenzentren liegt in softwaretechnischen Lösungen, die eine höhere Energieeffizienz des Serverbetriebs ermöglichen. Beispielsweise kann durch ein effizient programmiertes oder spezifisch konfiguriertes Betriebssystem, das speziell auf Größe und Anforderungen von Servern und Rechenzentrum zugeschnitten ist, Energie eingespart werden. Überflüssige Softwareprozesse und -dienste, die in standardisierten Serverbetriebssystemen als Grundeinstellung die Server und das Rechenzentrum durch zusätzliche Prozessor- und Netzaktivität belasten, können dadurch vermieden werden. Am Markt erhältlich sind bereits Serverbetriebssysteme mit modularem Aufbau, die gut an spezifische Anforderungen angepasst werden können. Insbesondere in kleinen Rechenzentren werden diese jedoch kaum genutzt, da ihre Einrichtung mit einem höheren Initialaufwand verbunden sein kann, der sich jedoch im Betrieb rasch amortisieren kann.
- *Load-Balancing und Virtualisierung:* Ein weiterer softwaretechnischer Ansatz zur Steigerung der Energieeffizienz in Rechenzentren liegt in der dynamischen Lastverteilung des Datenverkehrs und der Auslastung von Servern. Dafür werden z. B. Ansätze des Load-Balancing oder der Virtualisierung genutzt, bei denen umfangreiche Berechnungen oder Anfragen geclustert und auf mehrere parallel arbeitende Server verteilt werden. So kann die Auslastung der benötigten Server konstant gehalten werden. Die Überlastung einzelner, dezidierter Server in Rechenzentren kann vermieden und nicht benötigte Serverkapazitäten können in den Standby-Modus versetzt werden. Große Internetdienstleister nutzen die Ansätze des Load-Balancing und der Virtualisierung bereits, z. B. um stark schwankenden E-Mail- oder Internetverkehr auf mehrere Server zu verteilen und dadurch die benötigten Server möglichst optimal auszulasten.
- *Sensorbasiertes Energiecontrolling und –management:* Eine wichtige Voraussetzung für die Optimierung von Energieverbräuchen in Rechenzentren ist die Erfassung von Messwerten wie z. B. Stromverbrauch und Temperatur. Dafür sind erste Sensorsysteme erhältlich, die kabel- oder funkgestützt die Messwerte erfassen und diese für eine Auswertung in einer Energiecontrollingsoftware verfügbar machen. Erste Ansätze eines sensorbasierten Energiemanagements ist in großen Rechenzentren realisiert worden und wird dort zur Zustandsüberwachung von Hardware und Klimatisierung sowie für ein kontinuierliches Energiecontrolling genutzt. Für mittlere Rechenzentren stellt die Skalierung und Anpassung solcher Ansätze einen wichtigen Ansatz zum Energiecontrolling und zur Steigerung der Betriebssicherheit dar.
- *Sichere Energieversorgung:* Die Energieversorgung und auch die Unterbrechungsfreie- und Notstromversorgung gehört zu den kritischen Infrastrukturelementen von Rechenzentren. Während

kinetische Energiespeicher (Schwungrad) aufgrund ihrer im Vergleich zu Akkus hohen Lebensdauer bereits als Bestandteile von Unterbrechungsfreien Stromversorgungen (USV) eingesetzt werden, besteht noch ein erheblicher Bedarf, diese an die Anforderungen kleinerer Rechenzentren anzupassen und weiterzuentwickeln. Gleiches gilt für die Technik der Brennstoffzelle (siehe Glossar), die sich aufgrund ihrer raschen Mobilisierbarkeit und dem durch sie erzeugten Gleichstrom (siehe oben) als effiziente Notstromversorgung bzw. den Einsatz in mobilen Rechenzentren eignet. In Bezug auf Brennstoffzellen sind aufgrund des erwarteten technischen Fortschritts bei den verwendeten Membrane und den nutzbaren Brennstoffen große Fortschritte innerhalb der kommenden fünf Jahre zu erwarten. Diese Entwicklungen werden auch durch den geplanten Einsatz von Brennstoffzellen in der Automobilindustrie unterstützt, die den Einsatz der Technik auch in kleineren Anwendungen ermöglichen können.

- *Betreibermodelle und Energie-Contracting für Rechenzentren:* Im Zuge der oben erläuterten Ansätze der Konsolidierung und der Entwicklung adaptiver Rechenzentren werden auch Betreiber- und Contractingmodelle für den Betrieb von Rechenzentrumsinfrastrukturen relevant. Durch die Verknüpfung hocheffizienter Anbieter von Energieversorgung und Kühlung (siehe auch oben) bzw. die Nutzung von Abwärme ließen sich hocheffiziente Systemlösungen für den Betreiber von Rechenzentren entwickeln. Betreiber- und Contractingmodelle für die Rechenzentrumsinfrastruktur sind bisher kaum realisiert.

Ressourcenrelevanz

Insgesamt kann festgestellt werden, dass im Bereich Server und Rechenzentren viele Entwicklungen existieren, die bereits heute zu einer deutlichen Verbesserung der Energie- und Materialeffizienz führen. Es ist aber fraglich, ob diese Effizienzsteigerungen nicht durch die starke Zunahme des Bedarfs an IT-Leistung und Datenvolumen sowie die steigenden Verfügbarkeitsanforderungen kompensiert werden.

Während große Rechenzentrumsbetreiber die genannten Ansätze teilweise bereits realisiert haben, besteht in der Anpassung solcher Systeme an die Anforderungen kleiner und mittelständischer Anbieter ein großer Entwicklungsbedarf. Denkbar sind in diesem Zusammenhang auch innovative Outsourcing-Konzepte, die Load-Balancing und Virtualisierung integrieren.

3.2.3 Trends bei IKT-Endgeräten

Die IKT-Branche rechnet für die Zukunft mit einer weiteren Zunahme der Innovationsdynamik. Es werden noch raschere Technologiewechsel und Produktlebenszyklen erwartet (BITKOM/Berger, 2007, 164). Die Mega-Trends der Digitalisierung, der Allgegenwärtigkeit (Ubiquität) und wissensbasierten Ökonomie führen aktuell dazu, dass immer mehr und immer kleinere IKT-Geräte produziert und in den Markt gebracht werden. Außerdem nimmt der IKT-Anteil in anderen Produkten wie z. B. Automobilen oder Haushaltsgeräten ständig zu.

Verbunden mit diesen Trends ist auch ein erheblicher Preisverfall bei IKT-Hardware. Diese Preissenkungen führen wiederum zu einer erhöhten Nachfrage nach Geräten, so dass der Materialverbrauch

erhöht wird und Rebound-Effekte entstehen können (siehe Kapitel 8). Insgesamt ist auch weiterhin mit einem deutlichen Anstieg der Anzahl von IKT-Geräten in Haushalten, Unternehmen und Behörden zu rechnen. Fraunhofer IZM/ISI geht von einem Anstieg des Gerätebestands bei Computern und Peripherie in Haushalten von ca. 40 % bis zum Jahr 2020 aus, bei mobilen Geräten sogar um 50 % (Basisjahr 2007) (Fraunhofer IZM/ISI, 2009). In Unternehmen und Behörden wird mit einem Anstieg von PCs, Laptops und deren Peripherie um ca. 20 % gerechnet (Fraunhofer IZM/ISI, 2009), was die steigende Bedeutung einer umweltfreundlichen Beschaffung unterstreicht.

Reduktion und Nutzerfreundlichkeit

Entgegen den bereits genannten Entwicklungen zur weiteren Leistungssteigerung und Verbreitung von IKT-Technologien lässt sich auch ein gegenläufiger Trend zur bewussten Reduktion von Leistung und technischen Funktionen feststellen.

Beispielsweise werden vermehrt Subnotebooks, Netbooks und Mini-PCs angeboten. Diese Geräte arbeiten teilweise ohne aktive Kühlung mit niedrig getakteten Prozessoren z. T. auf Basis offener Betriebssysteme und Office-Software (z. B. Linux und Open Office). Sie sind in ihrem Funktionsumfang und der Softwareausstattung bewusst reduziert und nutzerfreundlich gestaltet, um so Gewicht, Energieverbrauch und Preis niedrig zu halten. Z. T. ist die Entwicklung dieser Geräte erst durch die Verfügbarkeit kleiner, kostengünstiger Notebook- und Mobilfunkkomponenten (z. B. angepasste Prozessoren und Flashspeicher) ermöglicht worden. Eine vergleichbare Entwicklung lässt sich im Bereich der Mobiltelefone beobachten, hier werden verstärkt für sehr junge oder ältere Nutzer bedienerfreundliche Telefone mit reduziertem Funktionsumfang angeboten.

Ob solche Geräteklassen tatsächlich Ausdruck für einen eigenständigen und signifikanten Trend hin zu einfacheren, reduzierten Geräteklassen sind, kann derzeit nicht abschließend beurteilt werden. Da viele Computerarbeitsplätze mit einer verhältnismäßig einfachen Softwareausstattung auskommen, könnten Mini-PCs oder auch Thin Clients in vielen Bereichen (Büro, Verwaltung, etc.) eingesetzt werden und dadurch zu einer Reduktion beim Material- und Energieverbrauch beitragen.

Die genannten Basistrends bilden den Hintergrund vor dem sich eine Vielzahl spezifischer Entwicklungen in den Feldern Rechenzentren, Arbeitsplatzcomputern und in den Bereichen Infrastruktur, Internet sowie neue Arbeitsformen abzeichnen. Diese werden in den folgenden Abschnitten kurz beschrieben und anhand erkennbarer Trends Abschätzungen über die weitere Entwicklung getroffen. Sie bilden Ansatzpunkte für innovative Förderfelder und –themen.

Miniaturisierung

Die Miniaturisierung im Bereich der IKT-Komponenten schreitet weiter voran und ermöglicht die Unterbringung größerer Rechen- und Speicherkapazitäten und einer höheren Funktionsvielfalt auf immer weniger Raum. In Verbindung mit neuen Herstellungsverfahren und hohen Stückzahlen werden dadurch neue Einsatzbereiche für IKT (wie z. B. in der Automatisierungs- und Medizintechnik, Steuer- und Regelungstechnik) erschlossen. Die Miniaturisierung wird somit zukünftig sehr wahrscheinlich zu einer noch stärkeren Verbreitung von IKT-Technologien beitragen.

Im Falle von IKT-Endgeräten hat sich die Miniaturisierung bisher in zweierlei Richtungen ausgewirkt. Zum einen sind die Geräte (z. B. PCs, Notebooks, Server, Telefone) deutlich kleiner und leichter geworden, zum anderen hat ihre Leistungsfähigkeit deutlich zugenommen.

Miniaturisierung bedeutet die Verringerung des Endgerätegewichtes. Ob damit eine Verringerung des Ressourcenbedarfs einhergeht, hängt von der Rohstoffintensität, dem Verarbeitungsaufwand der eingesetzten Materialien sowie dem zu realisierenden Recyclinganteil ab und kann nur durch detaillierte Analysen im Einzelfall geklärt werden (Fichter et al., 2009, 14). Der Trend der Miniaturisierung ist außerdem nicht zwangsläufig mit einer Zunahme der Energieeffizienz verbunden. Während die einzelnen Komponenten z. B. Prozessoren, Speicher und Netzwerkkomponenten durchaus effizienter werden, können diese relativen Effizienzgewinne durch den ubiquitären Einsatz der Techniken leicht überkompensiert werden (Rebound-Effekte).

Chancen können sich aus dem Trend der Miniaturisierung ergeben, wenn sich dieser mit den Trends zur Reduktion und zur Konvergenz von Technologien verbinden lässt und dadurch Dematerialisierungseffekte, z. B. in Form von multifunktionalen, kleinen, material- und energieeffizienten Netbooks entstehen (siehe auch nächster Abschnitt).

Arbeitsplatzbezogene Computerlösungen

Bei den arbeitsplatzbezogenen Computerlösungen lassen sich folgende Trends erkennen:

- *Energieeffiziente Anwendersoftware und Betriebssysteme:* Wie bereits am Beispiel von Rechenzentren erläutert wurde, hat Software einen deutlichen Einfluss auf den Energieverbrauch von IKT. Für Endgeräte an Arbeitsplätzen sollte sich die Weiterentwicklung sowohl von Betriebssystemen als auch Office- und Anwendersoftware konsequenter als bisher am Energieverbrauch orientieren. Opensource-Anwendungen, wie z. B. ressourcarme Betriebssysteme wie sie bereits für Netbooks, PDAs (siehe Glossar) oder auch Mobiltelefone existieren, können als Vorbild dienen und sollten auf weitere Geräteklassen wie z. B. Arbeitsplatzrechner oder technische Rechnerplätze in Produktionsanlagen angepasst werden. Im Bereich der Thin Clients ist insbesondere der Vergleich von Thin-Client-Software und Ansätzen des Hosted-Virtual-Desktop und der dafür benötigten Prozessor- und Speicherleistung interessant. Diese Lösungen sind für kleine und mittelständische Unternehmen auch aus administrativer und betriebswirtschaftlicher Perspektive interessant, es fehlt jedoch eine ausreichende Anzahl praktischer Umsetzungen in unterschiedlichen Branchen. Darüber hinaus können auch technische Computer- oder Thin-Client-Arbeitsplätze wie z. B. zur Prozessüberwachung und –steuerung einbezogen werden.
- *Softwarebasiertes Energiemanagement von IKT-Arbeitsplätzen:* Neben Anwendersoftware und Betriebssystemen ist das softwaregestützte Energiemanagement von Desktop- und Notebookcomputern ein wichtiger Ansatzpunkt. Bereits erhältlich sind Lösungen, die basierend auf adaptiven, lernenden Verfahren das Nutzerverhalten analysieren und dementsprechend Regeln für das Energiemanagement (Standby-Optionen, Energiesparregeln, etc.) ableiten. Insbesondere in Verbindung mit optimierten Endgeräten (z. B. Desktop-PC oder Thin Client mit schnell verfügbarem

Arbeitsspeicher) können solche Lösungen einen wichtigen Beitrag zum Energiesparen leisten. In kleinen und mittleren Organisationen gibt es hiermit jedoch bisher wenige Erfahrungen.

- *Energieeffiziente Komponenten:* Für die Steigerung der Energieeffizienz von arbeitsplatzbezogenen Computerlösungen stehen eine Vielzahl von technischen Optionen und die Weiterentwicklung von einzelnen Komponenten zur Verfügung. Im Segment der Prozessoren stellen energieeffiziente Prozessoren, die z. T. originär für mobile Endgeräte entwickelt wurden die Basis einer neuen Gerätegeneration dar. Im Bereich der Speicher ermöglichen der Einsatz und die Optimierung von SSD-Festplatten und Arbeitsspeichern noch Energieeinsparpotenzial. Neue Displaytechnologien wie z. B. OLED-Bildschirme (siehe Glossar) oder polymerbasierte Ansätze aus der Entwicklung von E-Paper stellen energieeffiziente Varianten für den Ersatz bestehender Bildschirmtechnologien dar. Netzgeräte, Lüfter, Graphik- und Netzwerkkarten unterliegen ebenfalls kontinuierlichen Optimierungen. Viele der genannten Optimierungsansätze stammen aus der Entwicklung von mobilen Endgeräten wie z. B. Notebooks und Mobiltelefonen. Ihr Einsatz in energieoptimierten Desktop-PCs, Mini-PCs und Thin Client Arbeitsplätzen besitzt noch großes Potenzial.
- *Energieautarke (mobile) Endgeräte:* Mobile Endgeräte wie z. B. Notebooks, PDAs und Mobiltelefone haben aufgrund der Vielzahl der in neuen Geräten integrierten Funktionen (z. B. hintergrundbeleuchtete, farbige Displays, leistungsstarke Antennen, Ortungsfunktionen) einen steigenden Energiebedarf, der dem eigentlichen Zweck der mobilen Verwendung entgegensteht. Es gilt daher, funktionale Ansätze für die zusätzliche Energieversorgung von mobilen Endgeräten z. B. basierend auf Ethanol-Brennstoffzellen, Photovoltaik und Thermogeneratoren weiterzuentwickeln und daraus in Verbindung mit Softwarelösungen zum Energiemanagement sowie energieeffizienten Hardwarekomponenten neue Geräteklassen mit hoher Energieeffizienz zu entwickeln. Viele der genannten Ansätze existieren bereits in ersten Pilotanwendungen. Um sie für den Endanwender verfügbar zu machen, müssen daraus jedoch nutzerfreundliche Systemlösungen, z. B. ein einfach zu bedienendes Kartuschensystem für die Betankung von Brennstoffzellen, geschaffen werden. Das Segment der mobilen Endgeräte kann aufgrund seiner hohen Anforderungen an die Energieeffizienz und –speicherung somit auch Schrittmacher für die Entwicklung energieeffizienter Hardware insgesamt sein. Ansätze der Energieautarkie und der Energieeffizienz sind zudem auch für die Inselversorgung technischer Infrastrukturen wie z. B. Verkehrsüberwachung, Wassermanagement oder auch Sendeanlagen der Telekommunikation von großer Relevanz und werden dort z. T. auch schon eingesetzt.
- *Modulare und multifunktionale Computerlösungen:* Die Entwicklung von Arbeitsplatzcomputern wird bisher vor allem durch die Integration neuer Funktionalitäten wie z. B. größere Graphikleistung, Mediacenter- sowie Telefonfunktionen bestimmt. Diese Integration erfordert wiederum eine größere Prozessorleistung und hat einen höheren Energieverbrauch zur Folge. Daneben existieren zunehmend weitere spezialisierte Endgeräte, wie z. B. Netbooks, PDAs, Smartphones, E-Books (siehe Glossar), etc. die je nach Leistungsumfang z. T. über vergleichbare Funktionen verfügen. Anstelle einer weiteren Diversifizierung der Endgeräte und ihrer Funktionen wäre prinzipiell auch ein modularer sich ergänzender Aufbau von Arbeitsplatzcomputern denkbar, der z. B. im Kern aus einem schlanken Prozessor- und Speichereinheit besteht, das über Zusatzmodule mit

Plug&Play-Funktionalitäten im Leistungsumfang erweitert und an arbeitsplatzspezifische Anforderungen angepasst werden kann. Als Bildschirm könnte beispielsweise ein leichtes Polymerdisplay fungieren, das gleichzeitig als E-Book und Notepad genutzt werden könnte. Erste konzeptionelle Entwürfe solcher multifunktionalen Geräte existieren bereits für den Consumermarkt. Sie könnten jedoch für mobile Arbeitsplätze bzw. in Verbindung mit Teleworking sinnvoll sein, da sie einen Aufbau paralleler Arbeitsplatzstrukturen verhindern und damit zu einem effizienten Einsatz der Geräte beitragen könnten.

- *Erweiterbare Thin Clients:* Vergleichbar dem oben vorgeschlagenen modularen Aufbau von PCs und Notebooks lassen sich auch Thin Clients gestalten und sich so gezielt an arbeitsplatz- und branchenspezifische Anforderungen anpassen. Graphikprozessoren, Arbeitsspeicher und Telekommunikationsfunktionalitäten ließen sich bereits für spezifische Anwendungsfelder in Thin Clients integrieren. Dies würde die möglichen Einsatzfelder von Thin Clients deutlich erweitern und sollte im Rahmen weiterer Pilotanwendungen und –branchen demonstriert werden.

Ressourcenrelevanz

Die Folgen dieser technologischen Entwicklung für den Energie- und Materialbedarf der IKT sind jedoch keineswegs klar und zum Teil gegenläufig:

- Durch Digitalisierung und Konvergenz kann sich prinzipiell die Zahl der Einzelgeräte verringern. Beispiele sind Multifunktionsgeräte (Drucker, Kopierer, Scanner, Fax) oder Mobiltelefone, die gleichzeitig als Kamera, Audio- und Video-Player, Spielekonsole, Diktiergerät oder zum mobilen Internetzugang genutzt werden. In der Realität ist diese Entwicklung allerdings bislang nicht festzustellen. Auch wenn bestimmte Geräte durchaus multifunktional ausgelegt sind, gibt es zumeist dennoch Spezialgeräte. Außerdem kommen neue Geräte wie Settop-Boxen für TV, WLAN-Equipment, Zweit-Notebooks für die Reise (Netbooks) hinzu. Die Digitalisierung führt zudem zu einem erheblichen Anstieg der Datenmenge und des Datenverkehrs; so ist sie insbesondere für die Vervielfachung des Datenverkehrs im Internet durch Audio- und Videodigitalisierung verantwortlich (Cisco, 2011b).
- Miniaturisierung bedeutet eine Verringerung des Endgerätegewichts. Ob damit eine Verringerung des Ressourcenbedarfs einhergeht, hängt von der Rohstoffintensität und dem Verarbeitungsaufwand der eingesetzten Materialien ab und kann nur durch detaillierte Analysen im Einzelfall geklärt werden. Miniaturisierung und Leistungssteigerung ermöglichen gleichzeitig aber auch weitere Einsatzfelder der IKT. Teilweise werden die Vorteile, die durch die Miniaturisierung von Komponenten beim Gerätegewicht erreichbar wären, durch zusätzliche Komponenten und Funktionalitäten vollständig kompensiert. So ist die Masse eines PCs in den vergangenen 20 Jahren nicht gesunken. Auch bei Mobiltelefonen ist zurzeit festzustellen, dass die Geräte nicht mehr kleiner werden, sondern multifunktionaler und bedienfreundlicher – z. B. über deutlich größere Displays.

3.2.4 Technische Trends im Bereich Netze

Der Markt für Breitbandzugänge im Festnetz wächst weiter (Bitkom, 2012b):

- Der Umsatz wird 2012 voraussichtlich um 1,8 % auf 13,6 Milliarden Euro zunehmen.
- Trotz des Trends zum mobilen Internet ist auch im Bereich Festnetz ein Zuwachs zu erwarten.
- Die Zahl der Breitbandanschlüsse wird in 2012 um 2,8 % auf 27,6 Millionen wachsen.

Durch die genannten Entwicklungen wird die Netzinfrastruktur für die Datenverarbeitung und Informationsübermittlung stark an Bedeutung zunehmen. Sie stellt die wesentliche Voraussetzung für die standortverteilte und dezentrale Verbindung von Geräten und Komponenten dar. Die Entwicklung der Netzinfrastruktur ist dabei auch erheblich von sicheren und effizienten Datenübertragungsstandards und –techniken abhängig. Beginnend beim Personal- und Local-Area-Network bis zum Wide- und Global-Area-Network müssen verschiedene Ebenen von Netzen miteinander verbunden werden und durch entsprechende Standards und Protokolle Daten und Informationen übertragbar sein. Erst dadurch werden viele neue Anwendungen und Dienstleistungen nutzbar wie z. B. die derzeitige Zunahme von Standortbezogenen Diensten (Location Based Services; siehe Glossar) im Mobilfunkbereich zeigt.

Intelligente und flexible Infrastruktur

- *Netzinfrastruktur:* Zu den zentralen Herausforderungen für die weitere Entwicklung der IKT-Technik, ihrer Anwendungen sowie zukünftiger Dienstleistungen, zählt der weitere Ausbau der kabel- und funkbasierten Netzinfrastruktur. Das Netz gilt in seiner heutigen Struktur und Leistungsfähigkeit als limitierender Faktor in Bezug auf die übertragenen Datenmengen, als auch die Ausfallsicherheit der angebotenen Dienste. Softwarefehler und Zwischenfälle in der Energieversorgung haben die Verwundbarkeit der Netzinfrastruktur in den letzten Jahren deutlich gemacht. Da das Netz zudem selbst zu einem erheblichen Anteil des IKT-bezogenen Energieverbrauchs beiträgt, sind die Weiterentwicklung kabel- und funkbasierter, energieeffizienter Netzwerk- und Übertragungskomponenten von großer Wichtigkeit. Ausfallsicherheit und Energieautarkie sind weitere wichtige Vorgaben besonders kritischer Knotenpunkte in der Infrastruktur. Hierfür stellt z. B. auch die Energieversorgung und Kühlung aus regenerativen Quellen (z. B. geothermischer Energie oder Brennstoffzellen) einen entscheidenden Beitrag dar.
- *Software und Übertragungsstandards:* Neben der Infrastruktur stellen für die Datenübertragung im Netz die angewendeten Softwarekonzepte sowie die genutzten Übertragungsstandards entscheidende Einflussfaktoren für den Ausbau und die Energieeffizienz der Netzinfrastruktur dar. Ein Ausbau des Cloud Computing oder von Software as a Service Ansätzen (siehe Glossar) wirkt sich z. B. deutlich auf die durch das Netz zu übertragenden Datenmengen aus. Vergleichbar stellt sich die verstärkte Nutzung von Netbooks, mobilen Thin Clients mit Serveranbindung oder auch die Nutzung von Smart Phones in Kombination mit Location Based Services dar. Die Weiterentwicklung energie- und dateneffizienter Übertragungskonzepte, -protokolle und –standards sowie entsprechende Funktechnologien (z. B. ZigBee (siehe Glossar) und WLAN-Standards für den Nah-

bereich) sind daher von großer Bedeutung für den weiteren Ausbau der Netzinfrastruktur und den Trend zur Virtualisierung und dezentralen Vernetzung.

3.3 Trends bei der Nutzung von IKT

Die aktuellen Trends bei der Nutzung der IKT werden umfassend von Hilty, Lohmann und Wölk (2012) analysiert. Aufbauend auf deren Vorarbeit, können die ressourcenrelevanten Trends der Nutzung der IKT wie folgt beschrieben werden:

3.3.1 Multimediale Nutzung von IKT

Aufgrund zunehmender Digitalisierung und des immer kostengünstiger zur Verfügung stehenden Speicherplatzes werden immer mehr Fotos, Musik und Videos auf IKT-Geräten verwendet und gespeichert. Zusätzlich zu den enormen Datenmengen, die so auf den Endgeräten gespeichert werden, wächst zunehmend der Datenverkehr im Internet, da ein wesentlicher Grund für die Digitalisierung auch in der Möglichkeit des Austausches, z. B. über soziale Netzplattformen wie Facebook oder Videoportale wie Youtube besteht.

Durch den Trend zum Cloud-Computing werden immer mehr Fotos, Musik und Videos auch direkt auf externen Servern gespeichert. Damit liegen die Dateien teilweise gar nicht mehr auf den Endgeräten, sondern werden und zur Nutzung heruntergeladen bzw. als Audio- oder Videodateien gestreamt. So ist z. B. Facebook mittlerweile zu einem der größten Foto-Archive des Netzes angewachsen. Nach Angaben von Pixable werden derzeit jeden Monat sechs Milliarden Fotos hochgeladen werden (Pixable Blog, 2011).

Foto-, Musik- und Videodateien, die auf so auf zentralen Plattformen im Netz gespeichert werden, beanspruchen bei jeder Nutzung Bandbreite entsprechend ihrer Größe.

Trendaussagen

Da Speicherplatz weiterhin billig bleibt bzw. noch billiger wird, ist eine weitere Verstärkung hin zu (lokal oder im Netz) auf Festplatten gespeicherten Medieninhalten zu erwarten. Ferner ist zu erwarten, dass diese Inhalte immer mehr in der "Cloud" (d. h. auf externen Servern) gespeichert werden. Amazon, Google und Apple führen derzeit Dienste ein, die es Nutzern erlauben, ihre Medienbibliotheken bei Anbietern von Speicherplatz zu lagern und sie überall zugriffsbereit zu haben (Amazon.com Inc., 2011; Miller, 2011; Wüthrich, 2011).

Ressourcenrelevanz

Mit dem Erwerb mithilfe von Downloads würde die Anzahl von Kompressionsvorgängen auf heimischen Rechnern und damit der Energieverbrauch sinken, insbesondere weil jeder Medieninhalt nur

einmal vom Anbieter komprimiert werden müsste⁶. Hier besteht ein Trade-Off zur wiederholten Datenübertragung für gleiche Inhalte, die aufgrund der beanspruchten Bandbreite die Anforderungen an Hardwareressourcen wiederum steigen.

2015 würden nach Einschätzung von Cisco jede Sekunde 1 Million Minuten Videoinhalte durch das Netz fließen, so Cisco. Dieser Trend werde sich fortsetzen (Cisco, 2011a; Cisco, 2011b). Ebenso wachsen damit die Anforderungen an den Anbieter von Speicherlösungen für mediale Inhalte.

Beispiel YouTube: Man nimmt an, dass YouTube in 2007 soviel Bandbreite verbraucht hat wie das gesamte Internet im Jahre 2000.

3.3.2 Nutzung der Softwarebereitstellungsform „App“

„App“ ist die Kurzform von application program (Anwendungsprogramm). Im gegenwärtigen Sprachgebrauch bezeichnet es insbesondere kleine Anwendungsprogramme, die meist über einen Online-Shop zu erwerben und leicht zu installieren sind. Oft haben Apps nur eine oder wenige Funktionen, die dafür aber eine klar definierte Aufgabe gut unterstützen. Derzeit existieren rund 520.000 Apps (BITKOM, 2011b).

Apps finden sich in der allgemeinen Software-Architektur auf der Anwendungsebene wieder. Derzeit unterscheiden sich die Schnittstellen zu den Betriebssystemen auf den mobilen Geräten (bzw. werden wegen des Geschäftsmodells bewusst geschlossen gehalten), so dass Apps für ähnliche Geräte neu erstellt oder angepasst werden müssen. Die verbreitetsten, untereinander weitgehend inkompatiblen Systeme sind iOS, Android, Symbian, WindowsPhone, RIM OS und WebOS. Zwei asiatische Betriebssysteme von Baidu Inc. und Alibaba Group mit zu erwartender großer Verbreitung sind in Entwicklung (Fletcher, 2011).

Trendaussage

Die Zahl der Apps wird auch weiterhin stark anwachsen, da sich hier ein neues Geschäftsfeld darbietet (BITKOM, 2011b). Für 2011 rechnet BITKOM mit erneuten Anstieg des Smartphoneabsatzes auf 10,1 Millionen Stück (BITKOM, 2011b) und damit eine Vergrößerung des Marktes für Apps.

Dabei werden sich die Bestrebungen verstärken, gleiche Apps auf verschiedenen Geräten ohne Neuprogrammierung zu erstellen, als Beispiel sei die noch junge Sprache Mobl (Mobl, 2011) zur plattformunabhängigen Programmierung auf mobilen Geräten genannt. Model Driven Development (MDD) wird ebenfalls schrittweise für mobile Plattformen eingesetzt (Holstein, 2011).

Nebenbei werden verstärkt Web-Apps (Apps, die ohne Installation durch das Web bereitgestellt werden und gewöhnlich innerhalb eines Browsers ablaufen) auf der Grundlage von HTML5 erstellt.

⁶ Aus ökologischer Sicht könnte ebenso die Vermeidung von Transport von physischen Objekten (DVDs u.ä.) von Vorteil sein (Weber et al., 2010).

Eine weitere Verbreitung von Apps ist zu erwarten. Die Einfachheit der Installation, Deinstallation und die Reduktion auf die jeweils wesentlichen Aufgaben wird die Entwicklung antreiben, auf PCs gewohnte Dienste in App-Form als mobile Variante zu erwarten. Weiterhin ist absehbar, dass sich auch auf dem PC das Konzept einfach zu handhabbarer Software stärker durchsetzt. Als weitere Entwicklung ist eine verstärkte Rolle von Web-Apps als Zwischenschritt auf dem Weg zu Browser-basiertem Rechnen (der Browser stellt die gesamte Schnittstelle des Gerätes dar) zu erwarten.

Ressourcenrelevanz

Apps sind i. d. R. klein und effizient, da man den Akku der mobilen Geräte möglichst schonen möchte. Relevant werden sie durch die Vielzahl der Installationen und den damit verbundenen Übertragungs- und Speicherbedarf. Laut BITKOM haben allein die deutschen Handy-Nutzer im Jahr 2010 rund 900 Millionen mobile Anwendungen auf ihre Mobiltelefone geladen (BITKOM, 2011b).

Andererseits stellen viele Apps Dienste aus dem Internet vereinfacht bereit, z. B. die Apps für Twitter und Facebook. Dadurch kommt es zu einer verstärkten Nutzung dieser Dienste, da sie von überall und jederzeit mobil ansprechbar sind. Sie generieren damit einen erhöhten Aufwand auf der Anbieterseite. Der vermehrte Datenverkehr wird über Mobilfunk durchgeführt und erhöht daher den Energieverbrauch.

Für mobile Anwendungen werden andererseits weniger Daten übertragen (z. B. weniger Bilder/Designs etc. der anbietenden Webseite), damit die vom Nutzer wahrgenommene Geschwindigkeit möglichst hoch bleibt. Oft vermeidet man dabei auch die Ausführung rechenintensiver Skripte, die Energie verbrauchen würden, wenn beispielsweise eine Webseite von einem PC aus geladen hätte. Das Nichtausführen von Flash-Werbung kann beispielsweise durchschnittlich 3 Watt Leistung einsparen (Simons und Prag, 2010).

Kleinere Softwarepakete verbrauchen generell weniger Energie, insbesondere, wenn sie im Hauptspeicher gehalten werden müssen.

Die Reduktion auf die wesentliche Aufgabe und den kleinen verfügbaren Platz führt andererseits auch zu einer geringeren Leistungsanforderung an die Endgeräte. Dies könnte relevant werden, wenn sich bestätigt, dass sich Apps auf PCs behaupten. Es ist also denkbar, dass die Welt der stationären Endgeräte von der effizienzbewussteren Welt der mobilen Endgeräte lernt. Umgekehrt zahlt man in der mobilen Welt einen hohen energetischen Preis für die Datenübertragung (im Vergleich zur hocheffizienten Übertragung durch Glasfasernetze).

3.3.3 Nutzung von Anwendungssoftware im Internet

Als Web-basierte Software lassen sich Programme bezeichnen, die mit Hilfe von Webbrowsern ausgeführt werden und/oder die für deren Ausführung auf das Web angewiesen sind. Die Kommunikation mit dem Web stützt sich dabei entweder auf die durch den Webbrowser bereitgestellte Infrastruktur oder auf spezielle Unterstützung durch die Middleware.

Ein Webbrowser ist *Anwendungssoftware*, die einem Nutzer einen einfachen Zugang zum Internet ermöglicht und in der Regel um Zusatzmodule (Plugins, Addons) erweitert werden kann. Scripts (eingebettete Programme) in Webseiten oder Plugins können auf Schnittstellen des Browsers und somit erweiterte Funktionalität zugreifen. Aus Sicht der Software stellt somit der Browser das Betriebssystem für die Anwendung dar.

Neben den vielen jetzt in mobilen Geräte genutzten Apps werden vermehrt Web-Apps angeboten werden, also web-basierte Mini-Programme, die ähnliche Funktionalität wie Apps auf ähnliche Weise anbieten, aber als Dienst im Web. Einerseits wird so der Mehraufwand der Entwicklung für verschiedene Plattformen gering gehalten; andererseits werden die Nutzer ab einer bestimmten Menge von Anwendungen nicht für jede weitere Aufgabe separat Software installieren wollen. Damit wird sich der Ansatz des Software-as-a-Service auf dem Umweg über das „Prinzip App“ weiter durchsetzen.

Insgesamt ist ein klarer Trend hin zu Browser-based Computing zu erkennen, d. h., eine Verlagerung zu Tätigkeiten des Computers, die alle mit Hilfe des Browsers und entsprechender Web-Anwendungen erledigt werden können.

Zwei Beispiele für web-basierte Büro-Lösungen sind Google Docs und das neu veröffentlichte Office 360 von Microsoft (Heise Online, 2011b), welches man in unterschiedlichen Paketen buchen kann. Die Universität Nebraska hat ihre Verwaltung bereits auf Office 360 umgestellt (Heise Online, 2011c). Bei Google arbeitet man selber mit der hauseigenen web-basierten Software (Gray, 2011).

Ressourcenrelevanz

Die Nutzung von Ajax bietet Einsparpotenzial, weil weniger Daten vom Server „eingepackt“ und versendet werden müssen. Auf Clientseite muss der Browser nur den geänderten Teil neu darstellen. Ein komplettes „Rendering“ der Seite entfällt damit. Das Chrome-Book kann als Thin Client betrachtet werden. Schon aufgrund der Marktmacht von Google könnte es relevante Verbreitung finden und zur Energieeinsparung beitragen, wenn sich Tätigkeiten von normalen „ineffizienten“ PCs auf das Chrome-Book verlagern lassen.

Die Verwendung von Web-Apps führt zu einem erhöhten Datenvolumen. Auf Anbieterseite müssen ggf. die vom Nutzer gespeicherten Daten bereitgestellt werden (z. B. bei Google Docs). Das Programm wird bei jeder Verwendung erneut heruntergeladen. Dadurch entsteht einerseits ein Mehraufwand.

Soweit sich das beurteilen lässt, stellen die Web-Apps geringere Anforderungen an die Hardware eines Nutzers. Wir erwarten daher mögliche Energieeinsparungen, da „nicht-hochleistungsfähige“ Hardware als Client ausreicht. Die erhöhte Komplexität von Web-basierten Programmen wie z. B. bei Office360 wiederum erfordert vermutlich von Clients eine höhere Rechenleistung.

3.3.4 Nutzung sozialer Netzwerke

Im Kontext des WWW versteht man unter einem sozialen Netz (auch: soziales Netzwerk, social network) eine Plattform auf der Basis von Web-Anwendungssoftware, über die die Nutzer persönliche

Daten austauschen und Beziehungen zueinander herstellen und vertiefen. Aufgrund der Bündelung sehr großer Zahlen von Nutzern spielt die Datenhaltung und die Datenübertragung durch Plattformen für soziale Netze eine große Rolle. Das derzeitige Wachstum der Nutzerzahlen ist für die Rechenzentren der Plattformen sehr relevant.

Die Mitglieder von sozialen Netzen stellen ihr Profil mit persönliche Daten, Hobbys, Interessen, Vorlieben, Freunden und Fotos ins Netz. Eine wesentliche Rolle in dem hier betrachteten Kontext spielt der Austausch multimedialer Daten (Bilder, Videos, Links zu weiteren Dokumenten, etc.). Es gibt sowohl breit angelegte soziale Netze wie Facebook oder MySpace, aber auch solche für spezifische private oder berufliche Interessen. Mittlerweile gibt es nahezu für jede Alters-, Religions-, Berufs- oder Personengruppe soziale Netze, für Studierende oder Schüler, für die Kleinkindererziehung oder für ältere Personen, für Jäger oder Hundebesitzer.

Facebook ist weltweit die größte und bekannteste Community mit – nach eigenen Angaben – über 900 Millionen Mitgliedern (Facebook, 2012). LinkedIn ist eine Online-Plattform zur Pflege und zum Knüpfen von Geschäftskontakten und hat nach eigenen Angaben weltweit mehr als 100 Millionen Mitglieder in mehr als 200 Ländern und Regionen, davon über eine Millionen Mitglieder in der DACH-Region (Deutschland, Österreich, Schweiz; Stand: März 2011). Xing berichtet von über 10,8 Millionen Mitgliedern weltweit (Stand: März 2011). Die Zahl der Nutzer in Deutschland, Österreich und der Schweiz wird derzeit mit rund 4,7 Millionen beziffert. Netlog hat mehr als 80 Millionen Mitglieder in Europa (Netlog, n.d.). Twitter (engl. für zwitschern) hat eigenen Angaben zufolge weltweit 200 Millionen Mitglieder. Twitter ist eine Anwendung zum Mikroblogging, einer Form des Bloggens, bei der die Benutzer SMS-ähnliche Kurznachrichten von maximal 140 Zeichen veröffentlichen. Seit Ende Juni hat Google das Konkurrenzprodukt Google+ in einer Testphase gestartet.

Die Plattformen sind in der Regel auf der Basis von Cloud Computing realisiert. Dabei kann die Plattform auch auf unterschiedlicher Ebene der Cloud angesiedelt sein.

Trendaussagen

Der Zuwachs von Nutzern in sozialen Netzwerk-Plattformen wird sich voraussichtlich fortsetzen. Dass der Markt als zukünftig relevant eingeschätzt wird, belegt auch das Engagement von großen Unternehmen wie Nokia, Intel oder Samsung. Mittelfristig ist eine Konzentration auf die derzeit dominanten Plattformen zu erwarten. Zusätzlich werden sich kulturell bedingt Plattformen in Asien und im arabischen Raum entwickeln. Es werden kleinere interessengebundene Plattformen entstehen. Möglicherweise kommt es auch zu einer Vernetzung zwischen den Netzen.

Die mobile Nutzung dieser Plattformen wird zunehmen. Neben dem allgegenwärtigen Zugriff werden auch ortsbezogene Dienste wie Foursquare eingebunden. Das Hochladen von Fotos über das Smartphone zu jeder Gelegenheit wird zunehmen. Dies gilt insbesondere bei Facebook, da jetzt das Taggen der Fotos (Markieren der Personen auf dem Foto mit ihren Namen) automatisch vorgeschlagen wird (Ihlenfeld, 2011). Seit August 2011 gibt es Places (Siehe Abschnitt ortsbasierte Dienste).

Die neue Generation der sozialen Netze greift verstärkt auf Ortungstechnologien wie GPS, WLAN oder Mobilfunk zurück (vgl. Abschnitt zu ortsbasierte Dienste) und erlaubt damit auch ad-hoc-

organisierte, standortbezogene Information und Kommunikation. Dies forciert wiederum das Wachstum der Nutzung. So erlaubt es die Nutzung der entsprechenden Dienste von sozialen Netzen auf GPS-fähigen Mobiltelefonen, dass automatisch Freunde lokalisiert und kontaktiert werden können, die sich gerade in der Nähe befinden. Aber auch Fotos, Videos und andere Daten können mittels Geotagging einem bestimmten Ort zugeschrieben und über diese lokale Angabe wieder von anderen Netzteilnehmern gefunden werden. Neben dem von Nutzern erzeugten Content sind die neuen sozialen Netze darüber hinaus auch für standortbasierte Werbung und Mikromarketing interessant.

Ressourcenrelevanz

Der Effekt auf den Energieverbrauch wird bei der Nutzung sozialer Netze im Wesentlichen durch die mobile Nutzung getrieben. Die Vielzahl an Nutzern stellt außerdem enorme Anforderungen an die Datenhaltung. Im Falle von Facebook sind das beispielsweise die Zugangsdaten, Postings, und Fotoalben von über 900 Millionen Nutzern. Die Bedeutung von sozialen Netzplattformen wie Facebook als Hauptmedium für viele Menschen führt dazu, dass zunehmend Organisationen bzw. Unternehmen dort präsent sind bzw. sein müssen. Je mehr Mitglieder eine Plattform hat und je höher die Interaktion ist, desto attraktiver ist die Community für werbetreibende Unternehmen. Als Konsequenz werden Mittel zur Verlängerung der Verweildauer eingesetzt (meist Spiele). Dies führt wiederum zu einer weiteren Erhöhung des Datenverkehrs.

3.3.5 Nutzung standortbezogener Dienste

Der Einsatz von Ortungsdiensten über Mobilfunk und WLAN sowie die Allgegenwart von GPS macht standortbezogene Dienste möglich. Es existieren schon eine Vielzahl von Anwendungen, z. B. Angaben zu Immobilien in der Umgebung. Standortbezogene Dienste (Location-Based Services, LBS) sind Dienste, die sich auf die aktuelle geographische Position ihres Nutzers beziehen. Typischerweise besteht der Dienst in der Bereitstellung einer ortsabhängigen Information über ein mobiles Gerät. Aus der Sicht der Ressourceneffizienz sind nur die Dienste interessant, die eine Kommunikation mit anderen erfordern. In diesem Falle können die mobilen Geräte im Rahmen der Kommunikation entweder ihre Position mitteilen oder vom Dienstanbieter geortet werden.

Trendaussagen

Ein Trend in Richtung Konvergenz unterschiedlichster Funktionen und Dienstleistungen, wie Telefonie, Foto und Video, Navigation, Chat, und Austausch multimedialer Daten, ist zu beobachten. Dabei werden insbesondere für wichtige soziale Netze gezielt Applikationen für Smartphones entwickelt, die Zugang und Nutzung erleichtern.

Die Kommunikation über mobile Verbindungen wird zusammen mit dem Angebot neuer standortbasierter Dienste und der Integration solcher Dienste in Plattformen für soziale Netze zunehmen.

Ressourcenrelevanz

Die Zunahme der Nutzung solcher Dienste führt zu einem erhöhten Energieaufwand für die Kommunikation. Da die Dienste zunehmend standortbezogen sind, werden sie hauptsächlich mit mobilen Geräten genutzt, was wiederum einen höheren Energieverbrauch bei der Übertragung der Daten bedeutet.

Aus Sicht der Hardware-Ressourceneffizienz ist die Vielzahl der Daten relevant, die zu speichern und zu übermitteln sind. Bei ortsbasierten Diensten kommt oft auch die Speicherung von Standortdaten hinzu, die als Metadaten anderer Daten (z. B. Fotos oder Textnachrichten) gespeichert werden.

3.3.6 Gesten und gesprochene Sprache für die Interaktion

Neue, natürlichere Interaktionsformen zwischen Mensch und Maschine werden voraussichtlich hohen Bedarf an Hardwareressourcen erzeugen. Die betrifft die Spracherkennung, die Gestenerkennung sowie die 3D-Gestenerkennung.

Trendaussagen

Zukünftig werden verstärkt neue Gesten- und Sprachsteuerungen vorgeschlagen und eingesetzt. Es wird neue Anwendungssoftware entwickelt werden, die die Interaktionsmöglichkeiten ausnutzt oder erst durch diese Interaktionen möglich wird. Die Entwicklung wird auch begünstigt durch die Unterstützung kommerzieller Anbieter wie PrimeSense oder Microsoft in Referenzimplementationen oder Schnittstellen für die nichtkommerzielle Nutzung.

Berührungssensitive Oberflächen werden in allen Bereichen des täglichen Lebens Einzug halten. Beispielsweise hat Microsoft kürzlich eine Unterstützung zur Programmierung berührungssensitiver Oberflächen veröffentlicht (Cabrera, 2011). Der Marketingtitel lautet "Write once - touch everywhere".

Vergrößerungen von Touchscreens machen neue Anwendungssoftware möglich oder erhöhen die Nutzbarkeit, wie z. B. bei der Implementation von Fleetcommander auf einem Wand-großen Touchscreen und Handsteuerung (Steinlechner, 2011c).

Neue Anwendungsmöglichkeiten bieten sich auch mit der 3D Gestenerkennung an. Beispielsweise hat Apple ein Patent eingereicht, bei dem die Tastatur die Finger mit Kameras überwacht werden können (Donath, 2011). Damit könnte später einmal die Maus oder das Touchpad bei Laptops überflüssig werden.

Insbesondere die preislich günstige Hardware Kinect von Microsoft hat eine intensive Beschäftigung mit 3D Gesten und Gesichtserkennung auch außerhalb von Forschungslabors angestoßen. Microsoft hat 2011 ein nicht-kommerzielles Entwicklerpaket für die Kinect freigegeben. Mit FAAS steht ein freier Werkzeugkasten zur Verfügung, um auf einfache Weise Bewegungen auf existierende Tastatur- und Mausereignisse abzubilden (Suma, et al., 2011). Dies erleichtert die Entwicklung von Anwendungssoftware, die die Kinect als Eingabe einsetzen.

Ressourcenrelevanz

Spracherkennung ist rechnerisch aufwendig. Dies gilt ebenso für die Analyse von Informationen aus den Bewegungssensoren. Beispielsweise liefert Kinect von Microsoft 30 Mal pro Sekunde ein VGA Bild mit Tiefenzusatzinformation für mehr als 2000 Stufen, aus denen das interne Modell für die zu beobachtenden Objekte mit Hilfe einer Software zusammengesetzt werden muss. Der zu analysierende Datenstrom beträgt rund 12 Megabytes pro Sekunde durch die Tiefenkamera und 9 Megabytes pro Sekunde durch die Farbkamera. Die Rechenleistung muss hoch genug sein, um den Datenstrom in Echtzeit zu verarbeiten und alle notwendigen Berechnungen durchzuführen.

Dass die Steuerung über Bewegungen begehrt ist, zeigt sich u. a. daran, dass die Kinect 2011 das am schnellsten verkaufte Consumer Electronics Gerät war. Der Anstieg des Energieverbrauchs durch den Einsatz neuer Geräte wie der Kinect und der dadurch massiv erhöhten Anforderungen an Hardwareressourcen lässt sich nur schwer abschätzen. Der Trend zu neuen Interaktionsformen ist aber auf jeden Fall relevant, weil sie möglicherweise die Tür öffnen zu vielen neuen Anwendungen, deren Auswirkungen auf den Ressourcenbedarf erheblich sein können.

3.4 Zwischenfazit

Die Trendanalyse liefert drei zentrale Erkenntnisse, die mit Blick auf die Abschätzung der Ressourcenbedarfe der IKT und möglicher Ressourceneinsparpotenziale relevant sind:

- (1) Die Trends zeigen die hohe Innovations- und Veränderungsdynamik im Technologie- und Anwendungsfeld IKT. Die hohe Dynamik erschwert mittel- und langfristige Aussagen über Ressourcenbedarfe und Ressourceneinsparpotenziale.
- (2) Die Analyse offenbart gegenläufige Trends: Einerseits nimmt die Anzahl von IKT-Geräten und –Anwendungen sowie das Ausmaß der Nutzung von Informations- und Kommunikationstechnologien z. T. rasant zu, was tendenziell zu einer Erhöhung der IKT-bedingten Ressourcenbedarfe und Emissionen führt. Andererseits verbessert sich in vielen Fällen die Energie- und Materialeffizienz von Endgeräten, Netzen und Rechenzentren erheblich, was hohe Ressourceneinsparmöglichkeiten eröffnet.
- (3) Der systemische Charakter und die hohe Komplexität der Querschnittstechnologie IKT, die o. g. hohe Veränderungsdynamik sowie die Gleichzeitigkeit gegenläufiger Trends von Ressourcenbedarfen und Ressourceneinsparmöglichkeiten erschweren belastbare Aussagen über die gesamtwirtschaftlichen bzw. gesamtgesellschaftlichen Umwelteffekte der IKT.

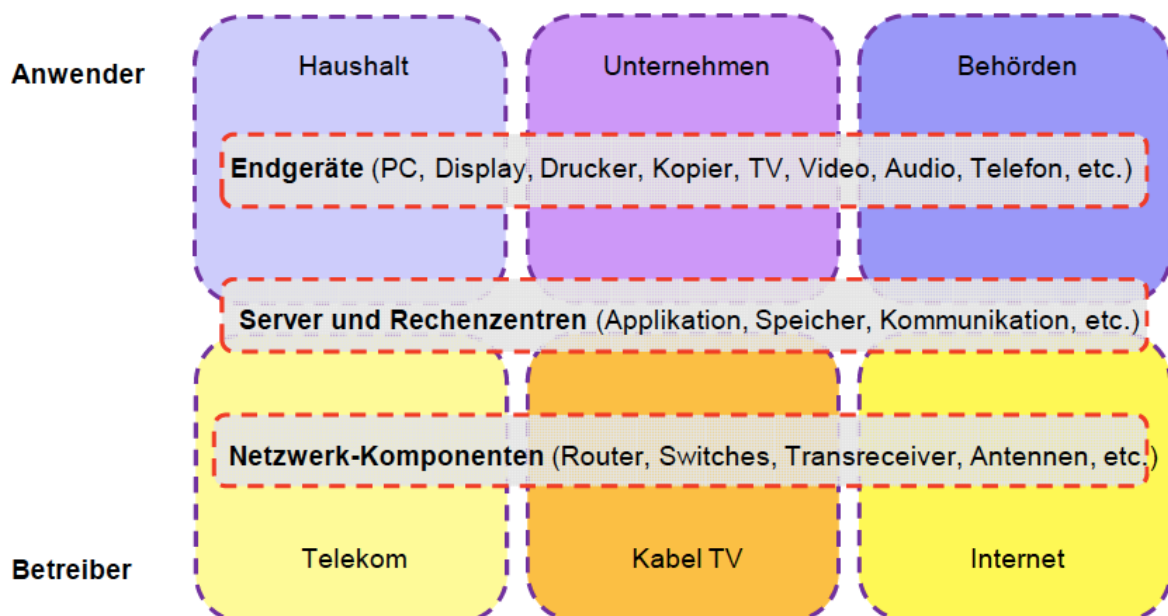
4 Der aktuelle Ressourcenbedarf der IKT in Deutschland

Grundsätzlich können zwei Arten von Green IT-Lösungen unterschieden werden. Zum einen existieren Lösungen, mit deren Hilfe der Energie- und Ressourcenbedarf der IT selbst gesenkt wird. Diese Lösungen werden im Allgemeinen mit dem Begriff „Green in der IT“ beschrieben. Dazu ist es allerdings zentral, den aktuellen Ressourcenverbrauch von Rechenzentren, Netzinfrastrukturen und IKT-Endgeräten zu kennen. Dieser wird im vorliegenden Kapitel beleuchtet. Zum anderen existieren IT-Lösungen, durch deren Einsatz in anderen Bereichen wie z. B. in Gebäuden, Stromnetzen oder im Bereich Verkehr, also außerhalb des IKT-Sektors, Ressourcen eingespart werden können. Solche Lösungen werden mit dem Begriff „Green durch IT“ bezeichnet und werden in Kapitel 5 analysiert.

Der Energie- und Materialverbrauch, der entlang des Produktlebensweges von Informations- und Kommunikationstechnologien (Herstellung, Nutzung, Recycling/Entsorgung) entsteht, kann in drei große Bereiche unterteilt werden:

- Endgeräte in Privathaushalten, Unternehmen und öffentlicher Verwaltung.
- Server und Rechenzentren
- IKT-Netze (Netzzugang und Kernnetze).

Abbildung 5: Strukturelle Gliederung der Informations- und Kommunikationstechnik



Quelle: Fraunhofer IZM/ISI, 2009, 3.

Obwohl die Umwelteffekte der IKT bereits seit den 1990er Jahren untersucht werden (Behrendt, Pfitzner, Kreibich und Hornschild, 1998; Fichter, 2001), ist die Datenlage bis heute äußerst lückenhaft und erlaubt mit Blick auf die gesamtgesellschaftlichen Effekte nur grobe Abschätzungen. Jenseits einzelner produktbezogener Umweltbewertungen wie z. B. von PCs und Notebooks, beschränken sich die meisten bislang vorliegenden Untersuchungen auf den Energieverbrauch in der Nutzungsphase von Informations- und Kommunikationstechnologien. Andere Ressourcenbedarfe sind bis auf wenige Ausnahmen kaum untersucht. So stellt z. B. eine im Auftrag des Umweltbundesamtes durchgeführte Untersuchung aus dem Jahre 2010 zum Materialbestand in Rechenzentren in Deutschland die weltweit erste solche Untersuchung dar (Hintemann und Fichter, 2010). Ähnlich verhält es sich um Untersuchungen, die sich mit den Umweltwirkungen der IKT bei der Herstellung, Transport und in der Entsorgungsphase befassen. Auch hier liegen in der Regel keine oder nur sehr lückenhafte Daten vor (Fichter et al., 2009).

Vor diesem Hintergrund soll im Folgenden zunächst auf den Stromverbrauch der gesamten IKT in Deutschland eingegangen werden. Anschließend werden die für die drei oben genannten Hauptbereiche der IKT (Endgeräte, Server/Rechenzentren und IKT-Netze) vorliegenden Daten zum Ressourcenverbrauch in Deutschland vorgestellt.

4.1 Stromverbrauch der IKT in Deutschland

Eine erste Abschätzung des Strombedarfs der gesamten Informations- und Kommunikationstechnik in Deutschland nahmen 2003 Cremer et al. in einer Auftragsstudie für das Bundeswirtschaftsministerium vor. Sie ermitteln dabei für das Jahr 2001 einen Gesamtstrombedarf von rund 38 TWh. Dies entsprach einem Anteil von knapp 8 % am gesamten Stromverbrauch der Endenergiesektoren in Deutschland, der 2001 bei 484 TWh gelegen hat (Cremer et al. 2003, 25). In der Studie wurde damals von einem Anstieg des Stromverbrauchs auf 55,4 TWh in 2010 ausgegangen, was einem jährlichen Wachstum von 4,3 % entspräche.

Abbildung 6: Erste Abschätzung des Strombedarfs der IKT in Deutschland für das Jahr 2001

2001	Strombedarf (GWh)			
	Normalbetrieb	Bereitschaftsbetrieb	Schein-Aus	Summe
IuK-Endgeräte in Haushalten	10279	6987	1849	19115
IuK-Endgeräte in Büros	4575	2584	628	7787
Haushalts-Infrastruktur	1102	2108	192	3402
Büro-Infrastruktur	5153	273	0	5425
Infrastruktur Telekommunikation	2250	0	0	2250
Gesamt	23359	11951	2669	37979

Quelle: Cremer et al. 2003, 25.

Eine jüngere Untersuchung, die das Fraunhofer IZM und ISI im Auftrag des Bundeswirtschaftsministeriums im Jahr 2009 durchgeführt haben, kommt zu dem Schluss, dass der Stromverbrauch der IKT in

Deutschland schneller angestiegen ist, als es Cremer et al. 2003 angenommen haben. Nach Abschätzung von Fraunhofer IZM/ISI lag der Stromverbrauch der gesamten Informations- und Kommunikationstechnologie bereits im Jahr 2007 bei rund 55,4 TWh. Das entspricht einem Anteil von 10,5 % am gesamten Stromverbrauch in Deutschland, der in dem betreffenden Jahr bei 529 TWh lag (Fraunhofer IZM/ISI, 2009, 13). Wie Tabelle 1 zeigt, verursachen die Endgeräte in Privathaushalten mit knapp 60 % bzw. 33 TWh den größten Anteil des IKT-bedingten Stromverbrauchs. Der Stromverbrauch der Endgeräte in Unternehmen und öffentlicher Verwaltung wird auf 6,8 TWh geschätzt, was einem Anteil von 12 % des gesamten IKT-bedingten Stromverbrauchs entspricht. Bedeutend ist ebenfalls der Stromverbrauch von Servern und Rechenzentren, der für das Jahr 2007 mit rund 9,1 TWh ermittelt wurde. Auch die IKT-Netze (Mobilfunk und Festnetz) sind mit 6,4 TWh ein gewichtiger Stromverbraucher in Deutschland (Fraunhofer IZM/ISI, 2009, 13).

Mit Blick auf die Prognosen, die in der Studie von Fraunhofer IZM/ISI vorgenommen werden (vgl. Kapitel 7.1.1) ist davon auszugehen, dass der Stromverbrauch der IKT zwischen 2007 und 2010 weiter angestiegen ist (Fraunhofer IZM/ISI, 2009, 68). Dabei wird in 2010 von einem IKT-bedingten Stromverbrauch von 59,6 TWh ausgegangen (vgl. Abbildung 12). Mit Blick auf den Gesamtverbrauch in Deutschland, der in 2010 bei 538 TWh lag (UBA 2012, 2), betrug der Anteil des durch IKT-bedingten Stromverbrauchs am Gesamtstromverbrauchs in Deutschland in 2010 damit bei 11 %.

Tabelle 1: Stromverbrauch der IKT in Deutschland nach Sektoren im Jahr 2007

Sektor	Stromverbrauch in 2007 (GWh)		
	Alle Modi	Active Mode	Standby Mode ¹⁾
Private Haushalte	33.010	23.548	9.462
Computer ²⁾	11.217	8.664	2.552
Mobile Geräte	479	332	146
Television ²⁾	15.833	12.119	3.714
Audio-Geräte	3.212	1.287	1.925
Telefone, Router	2.270	1.145	1.125
Unternehmen³⁾	6.817	5.128	1.689
<i>darunter: öffentl. Verwaltung</i>	<i>578</i>	<i>426</i>	<i>152</i>
Computer ²⁾	6.196	5.008	1.188
Telefone, Router	622	120	501
Server und Rechenzentren	9.122	9.122	0
<i>darunter: öffentl. Verwaltung</i>	<i>644</i>	<i>644</i>	<i>0</i>
Server	3.649	3.649	0
Rechenzentren-Infrastruktur	5.473	5.473	0
Netzzugang und Kernnetz	6.436	6.436	0
Mobilfunk	3.107	3.107	0
Festnetz	3.329	3.329	0
Summe IKT	55.385	44.233	11.151

1) Netzwerk-Standby, passives Standby, Schein-Aus, 2) Inkl. Peripheriegeräte, 3) In der Abgrenzung der WZ-2003-Systematik der Wirtschaftszweige: WZ-Abschnitte D-O; darunter " Öffentliche Verwaltung, Verteidigung, Sozialversicherung" (WZ L)

Quelle: Fraunhofer IZM/ISI 2009, 14.

4.2 Rechenzentren

Unter „Rechenzentrum“ wird hier ein Gebäude bzw. werden hier Räumlichkeiten verstanden, in denen die zentrale Rechentechnik (Server, aber auch die zum Betrieb notwendige Infrastruktur) einer oder mehrerer Firmen oder Organisationen untergebracht sind. Nach Berechnungen des Borderstep Instituts waren im Jahr 2008 insgesamt 2,18 Mio. Server in Deutschland installiert, davon 52 % in Rechenzentren. Rund 1 Mio. Server (48 %) wurden dahingegen als Einzelrechner (Stand-Alone) oder in „kleinen Serverschränken“ (1-2 Server) betrieben. Dass Einzel- und Zweifachrechner begrifflich von „Rechenzentren“ abgegrenzt werden, steht im Einklang mit üblichen Abgrenzungen, wie sie z. B. vom Bundesverband Informationstechnik, Telekommunikation und Neue Medien e.V. (BITKOM) vorgenommen werden. Der Großteil der Server, die nicht in Rechenzentren betrieben werden, sind Einzel-

server in Unternehmen und Behörden. Dies sind ca. 650.000 Einzelserver (Stand-alone). Weitere 250.000 Server sind in Installationen mit 2 Servern vorhanden.

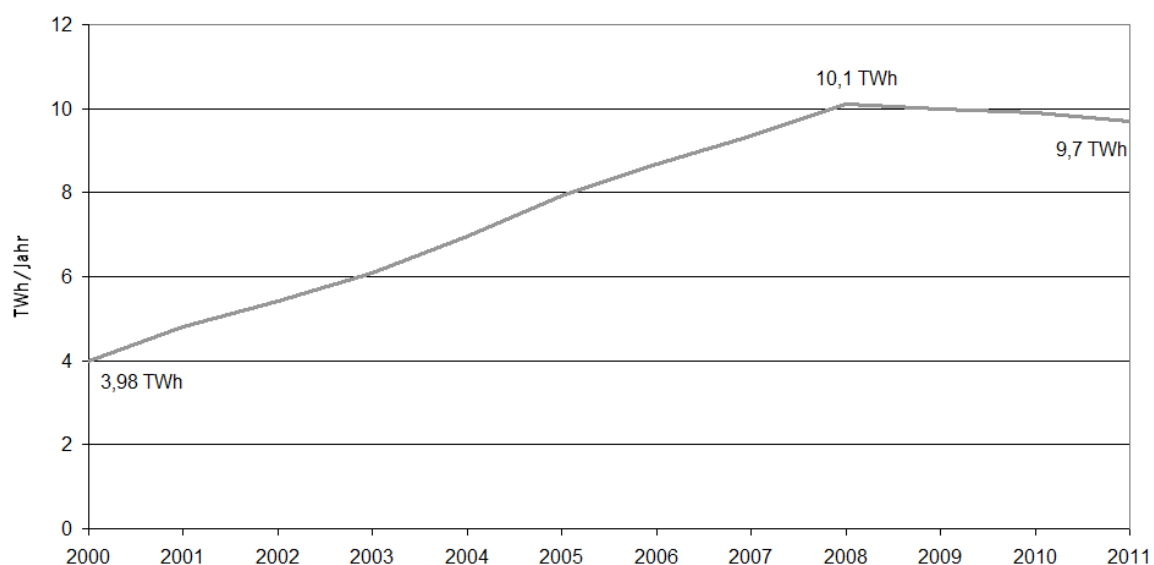
Nach aktuellen Berechnungen des Borderstep Instituts lag der Stromverbrauch von Servern und Rechenzentren in Deutschland im Jahr 2011 bei 9,7 Terawattstunden (TWh) (vgl. Abbildung 7). Damit liegt er um ca. 4 % unter dem Strombedarf des Jahres 2008 – und dies trotz steigender Zahl der installierten Server. Der Stromverbrauch entspricht einem Anteil von 1,8 % am Gesamtstromverbrauch in Deutschland. Es sind ca. vier mittelgroße Kohlekraftwerke notwendig, um diese Strommenge zu erzeugen.

Die mit dem Stromverbrauch der Server und Rechenzentren verbundenen Stromkosten beliefen sich im Jahr 2011 auf ca. 1,2 Mrd. €. Bedingt durch die gestiegenen Strompreise sind die Stromkosten im Vergleich zum Jahr 2008 um 12 % angestiegen.

Im Jahr 2011 gab es in Deutschland ca. 2,34 Mio. Server (7 % mehr als im Jahr 2008), von denen 1,42 Mio. Server in Rechenzentren installiert waren und 0,91 Mio. als Stand-Alone-Server betrieben wurden.

Die Daten zeigen, dass es in den vergangenen Jahren gelungen ist, den Trend des ansteigenden Stromverbrauchs der Server und Rechenzentren in Deutschland zu stoppen.

Abbildung 7: Entwicklung des Energieverbrauchs von Servern und Rechenzentren in Deutschland



Quelle: Hintemann und Fichter 2012, 2.

Die erreichte Reduktion des Stromverbrauchs hat verschiedene Gründe. Zum einen ist die Informationstechnik selbst effizienter geworden. Insbesondere im Teillastbereich, also in Zeiten, in denen die Server nicht voll ausgelastet sind, konnte der Stromverbrauch verringert werden. Allerdings wurde die verbesserte Effizienz der Informationstechnik durch die steigende Zahl der Server, die erhöhten

Speicherbedarfe und das Mehr an Netzwerktechnik ausgeglichen. Insgesamt stieg der Stromverbrauch der IT-Komponenten in den Rechenzentren sogar geringfügig um 2 % an. Dass der Anstieg nicht höher ausgefallen ist, ist auch durch die wirtschaftliche Krise des Jahres 2009 begründet, die zu einem Einbruch der Serververkäufe um mehr als 10 % geführt hat. Dadurch ist der Bestand der Server in den Jahren 2008 bis 2011 deutlich geringer angestiegen als in den Jahren zuvor.

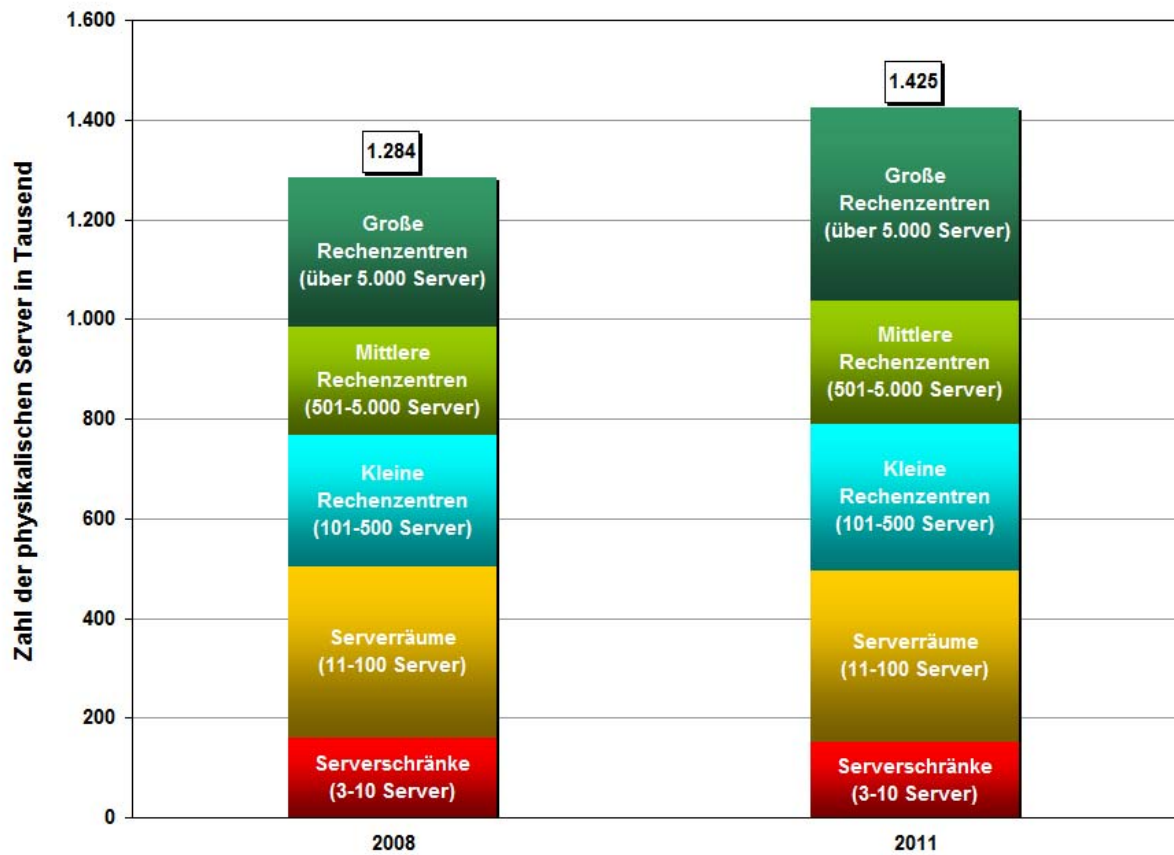
Die erreichte Verringerung des Strombedarfs der Rechenzentren um ca. 400 Gigawattstunden ist durch die deutlichen Effizienzgewinne in der Klimatisierung und bei den Unterbrechungsfreien Stromversorgungen (USV) begründet.

Insgesamt gab es in Deutschland im Jahr 2011 ca. 52.000 Rechenzentren, 2,2 % weniger als im Jahr 2008. Diese Verringerung ist im Wesentlichen darauf zurück zu führen, dass die Zahl der kleinen Lokationen (Serverschränke mit 3 – 10 bzw. 11- 100 Servern) von über 33.000 auf ca. 31.500 zurückgegangen ist. Die Zahl der größeren und mittleren Rechenzentren (über 500 physikalische Server) ist demgegenüber um 15 % auf ca. 500 angestiegen. Abbildung 8 zeigt, dass die Zunahme der Serverzahl fast ausschließlich in diesen Rechenzentren erfolgte. Der Trend zu Cloud-Computing und Outsourcing ist in Deutschland deutlich zu spüren, auch wenn die Mega-Rechenzentren der Internetgiganten Google, Facebook, Microsoft, Amazon und Apple bislang nicht in Deutschland errichtet werden.

Eine im Auftrag des Umweltbundesamtes durchgeführte Studie ermittelt erstmalig die Ausstattungen und Materialbestände der deutschen Rechenzentren für das Bezugsjahr 2008 und prognostiziert ihre Entwicklung bis zum Jahr 2015 (Hintemann und Fichter, 2010). Vergleichbare Studien für andere Länder oder Regionen liegen bislang nicht vor. In der Untersuchung wird eine Methodik entwickelt, mit der die Zahl der Rechenzentren in unterschiedlichen Größenklassen und ihre durchschnittlichen Ausstattungen mit IT-Geräten und Infrastrukturelementen wie Klimatisierung und Stromversorgung ermittelt werden kann. Weiterhin wurde anhand von Referenzprodukten eine detaillierte Bestimmung der Materialzusammensetzung einzelner Komponenten in Rechenzentren vorgenommen. Auf dieser Basis werden in der Studie detaillierte Aussagen zur materiellen Ausstattung der rund 53.000 Rechenzentren in Deutschland gemacht, die es im Jahr 2008 in Deutschland gab (Hintemann und Fichter, 2010).

Für die Ermittlung des Materialbestandes in deutschen Rechenzentren wurde folgende Abgrenzung getroffen. Es werden Geräte, Anlagen und Materialien betrachtet, die sich innerhalb des baulichen Abschnittes „Rechenzentrum“ befinden. Dabei gilt als Rechenzentrum jede räumliche Zusammenfassung von mindestens drei physikalischen Servern, wobei es sich zumindest um einen eigenständigen Raum mit sicherer Stromversorgung und Klimatisierung handeln muss. Die Gebäude- und Raumhülle von Rechenzentren inklusive der Beleuchtung, Brandschutzmaßnahmen und Sicherheitsvorkehrungen gegen unbefugtes Betreten wird nicht mit erfasst. Auch werden IT-Geräte und Ausstattungen, die sich in Unternehmen und Behörden außerhalb von Rechenzentren befinden – wie Arbeitsplatz-Computer oder auch Netzwerktechnik – nicht mit betrachtet (Hintemann und Fichter, 2010, 11).

Abbildung 8: Entwicklung der Serverstruktur in den Rechenzentren in Deutschland



Quelle: Hintemann und Fichter, 2012, 4.

Im Jahr 2008 betrug die Summe an Materialien, die in deutschen Rechenzentren gebunden war, rund 110.200 t. Mehr als ein Drittel der Materialien (34 %) sind in den IT-Geräten, also den Servern, Speicher- und Netzwerkgeräten gebunden (37.500 t.). Erhebliches „Gewicht“ haben auch die Serverschränke (Racks) und Einhausungen mit 30.600 t. sowie die Stromversorgung (Unterbrechungsfreie Stromversorgung, Stromverteilung, Notstromaggregate) mit 29.900 t. Die Kühl- und Klimatisierungsanlagen schlagen mit 12.200 t. zu Buche.

Tabelle 2: Summe der Massenmaterialien in Rechenzentren in Deutschland im Jahr 2008

2008	Server, Speicher, Netzwerk		Racks und Einhausungen		Klimatisierung		Stromversorgung	
	in t	in (%)	in t	in (%)	in t	in (%)	in t	in (%)
Serverschrank	3.400	9%	3.300	11%	400	3%	1.000	3%
Serverraum	9.100	24%	8.800	29%	2.200	18%	6.700	22%
Kleines Rechenzentrum	7.600	20%	5.900	19%	2.300	19%	6.600	22%
Mittleres Rechenzentrum	7.200	19%	5.100	17%	2.800	23%	6.800	23%
Großes Rechenzentrum	10.200	27%	7.600	25%	4.400	36%	8.900	30%
Summe	37.500	100%	30.600	100%	12.200	100%	29.900	100%

Quelle: Hintemann und Fichter, 2010, 106.

Tabelle 3: Gesamtbestand der Materialien in Rechenzentren in Deutschland im Jahr 2008

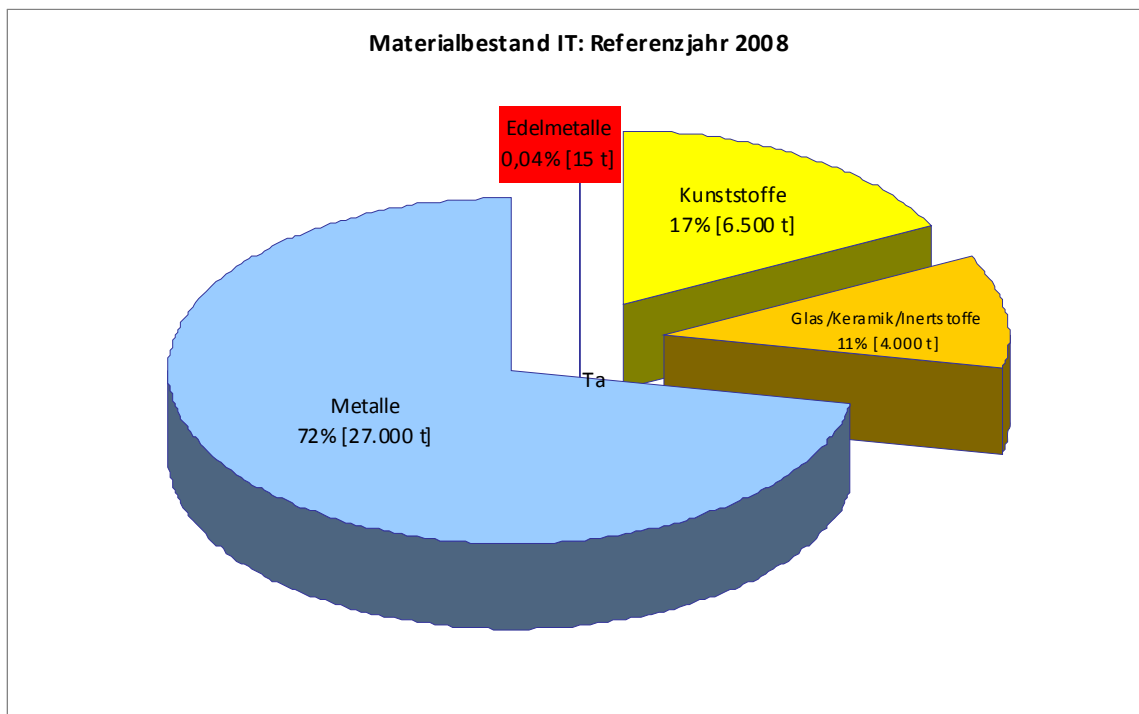
		Materialbestand Rechenzentren in Deutschland						Network	2,5" NS	3,5" NS	Summe RZ
2008		Tower RZ	Blade	Rack	Unix	Mainframe					
		[kg]	[kg]	[kg]	[kg]	[kg]	[kg]	[kg]	[kg]	[kg]	
Kunststoffe											
	Epoxy	54.000	145.000	430.000	270.000	24.000	92.000	18.000	180.000	1.213.000	
	PVC	85.000	90.000	330.000	190.000	24.000	72.000	36.000	350.000	1.177.000	
	sonstige Kunststoffe	193.000	300.000	1.400.000	840.000	58.000	280.000	115.000	975.000	4.161.000	
Glas/Keramik/Inertstoffe											
	E-Glas	90.000	215.000	660.000	410.000	35.000	140.000	30.000	300.000	1.880.000	
	SiO	19.000	50.000	140.000	90.000	8.000	30.000	6.000	64.000	407.000	
	Keramik	66.000	205.000	580.000	380.000	33.000	130.000	21.000	220.000	1.635.000	
	Silizium	1.200	4.000	11.000	7.000	600	2.400	400	4.000	30.600	
Metalle											
	Fe	1.100.000	1.250.000	5.000.000	3.000.000	250.000	1.100.000	460.000	4.400.000	16.560.000	
	Cu	230.000	410.000	1.400.000	880.000	80.000	300.000	105.000	1.000.000	4.405.000	
	Al	163.000	330.000	1.400.000	700.000	35.000	260.000	198.000	2.500.000	5.586.000	
	Ni	5.400	14.000	43.000	26.000	2.300	9.000	1.700	18.000	119.400	
	Sn	8.200	29.000	80.000	51.000	4.500	17.000	3.100	29.000	221.800	
	Zn	2.400	6.500	20.000	12.000	1.100	4.100	700	6.700	53.500	
	Pb	6.100	17.000	50.000	31.000	2.700	10.500	1.900	20.000	139.200	
Edeelmetalle											
	Au	65	240	650	430	38	143	23	215	1.804	
	Pt	0	1	3	0,3	0	0	1	12	17	
	Pd	28	105	285	190	17	62	7	96	790	
	Ag	275	977	2.700	1.750	155	585	96	965	7.503	
	Ru	0,5	1	3,1	0,3	0	0	1	12	18	
	Sonstige	170	613	1.700	1.100	98	366	43	606	4.696	
	Summe	2.030.000	3.070.000	11.500.000	6.900.000	563.000	2.400.000	1.000.000	10.000.000	37.463.000	

Quelle: Hintemann und Fichter, 2010, 58.

Die Gesamtmenge an Materialien, die in der Informationstechnik (Server, Speicher, Netzwerk) in Rechenzentren in Deutschland gebunden sind, beträgt für das Referenzjahr 2008 rund 37.500 t. Mit gut 16.500 t. hat Eisen (meist leicht veredeltes Stahlblech) den größten Anteil, gefolgt von Aluminium

mit 5.600 t. (anteilig größte Menge ist Aluguss aus den Gehäusen der Festplatten), Kunststoffen mit 6.500 t. (Leiterplatten und Gehäuse), sowie Kupfer mit 4.400 t. (Kühlkörper und Kabel). Glas, Keramik und Inertstoffe machen in Summe etwa 4.000 t. aus. Der Hauptanteil ist Glas (Glasmatte in Leiterplatten). Von der prozentualen Verteilung entfallen mehr als 72 % auf Metalle, 17 % Kunststoffe, 10 % Glas, Keramik, Inertstoffe und lediglich 0,04 % auf Edelmetalle (vgl. Tabelle 3).

Abbildung 9: Materialbestand der IT-Komponenten in Rechenzentren nach Stoffgruppen



Quelle: Hintemann und Fichter, 2010, 59.

4.3 Endgeräte

Bei den IKT-Endgeräten kann zwischen Endgeräten in Privathaushalten einerseits und Endgeräten in Unternehmen und öffentlichen Einrichtungen wie Behörden, Schulen und Hochschulen andererseits unterschieden werden. Auf diese soll im Folgenden getrennt eingegangen werden.

4.3.1 Endgeräte in Haushalten

Wie Zahlen des Statistischen Bundesamtes zeigen, ist der Ausstattungsgrad und Ausstattungsbestand der Privathaushalte in Deutschland mit IKT-Endgeräten seit 2004 kontinuierlich gewachsen. Lediglich bei stationären PCs gab es zwischen 2010 und 2011 einen leichten Rückgang, der allerdings durch den erheblichen Anstieg von mobilen Computern (Notebooks etc.) überkompensiert wurde.

Tabelle 4: Ausstattung der Haushalte mit Informations- und Kommunikationstechnik in Deutschland

	2004	2005	2006	2007	2009	2010	2011
Erfasste Haushalte (Anzahl)	5 919	7 858	7 771	7 828	7 947	7 835	7 888
Hochgerechnete Haushalte (1 000)	35 375	35 528	35 555	35 887	36 462	36 521	36 640
Anteil der Haushalte in % (Ausstattungsgrad)							
Personalcomputer (PC)	63,6	68,6	71,6	72,8	78,8	80,8	82
PC stationär	58,7	62,9	64,5	63,8	62,9	63,1	61,1
PC mobil (Notebook, Laptop, Netbook)	13,3	17,2	21,3	25,1	40	45,5	51,9
Internetzugang, -anschluss	47,1	54,6	57,9	60	68,9	72,9	75,9
ISDN-Anschluss	20,4	23,9	25,1	26	32,1	.	.
Telefon	98,7	99,3	99,4	99,4	99,5	99,4	99,6
Festnetztelefon	95,1	95,9	95,2	95,4	91,5	91,6	92,7
Mobiltelefon	72,1	76,4	80,6	81,8	86,7	88,9	90
Anrufbeantworter stationär	46,1	47,1	48,7	48,8	52	.	.
Telefaxgerät stationär	17,2	18,7	18,9	18,6	19,2	20,1	19
Navigationsgerät	.	4,4	7,7	12,3	27	33,2	38,9
Anzahl der Güter je 100 Haushalte (Ausstattungsbestand)							
Personalcomputer (PC)	89,7	98,5	106,8	110,9	129,1	138,5	145,3
PC stationär	75	79,3	82,8	82,5	81,2	80,7	77,7
PC mobil (Notebook, Laptop, Netbook)	14,7	19,2	24	28,4	47,8	57,8	67,5
Internetzugang, -anschluss	49,5	57,2	60,1	62,7	73,3	77,6	83,3
ISDN-Anschluss	20,6	24,4	25,5	26,3	32,4	.	.
Telefon	222,5	241,3	261,2	267	270,6	273,2	280,3
Festnetztelefon	107,8	114,7	124	125,9	113,7	112,3	114,6
Mobiltelefon	114,7	126,5	137,1	141,1	156,9	160,9	165,7
Anrufbeantworter stationär	47,3	48	49,7	49,7	53,5	.	.
Telefaxgerät stationär	17,4	18,9	19,1	18,7	19,4	21,7	19,3
Navigationsgerät	.	4,6	8	12,9	29,2	36,5	43,3

Quelle: Destatis, 2012.

Der Stromverbrauch aller IKT-Geräte in Privathaushalten in Deutschland lag nach Berechnungen von Fraunhofer IZM/ISI (2009) im Jahr 2007 bei rund 33 TWh. Die Privathaushalte verursachten damit rund 60 % des gesamten IKT-bedingten Stromverbrauchs in Deutschland.

Tabelle 5: Stromverbrauch durch IKT-Endgeräte in Privathaushalten in Deutschland im Jahr 2007

	Stromverbrauch in 2007 (GWh)		
	Alle Modi	Active Mode	Standby Mode ¹⁾
Private Haushalte	33.010	23.548	9.462
Computer ²⁾	11.217	8.664	2.552
Mobile Geräte	479	332	146
Television ²⁾	15.833	12.119	3.714
Audio-Geräte	3.212	1.287	1.925
Telefone, Router	2.270	1.145	1.125

1) Netzwerk-Standby, passives Standby, Schein-Aus, 2) Inkl. Peripheriegeräte
Quelle: Fraunhofer IZM/ISI 2009, 14.

Zahlen für die Jahre 2010 oder 2011 liegen derzeit nicht vor. Die Basisprognose von Fraunhofer IZM/ISI (2009) geht allerdings davon aus, dass der IKT-bedingte Stromverbrauch der privaten Haushalte weiter zunehmen wird (vgl. dazu Kapitel 7.1.1). Bis 2020 wird ein Anstieg um fast 25 % von 33 TWh in 2007 auf knapp 40 TWh erwartet. Der Zuwachs erfolgt dabei in erster Linie in den Produktgruppen Television und Computer (TV+ bzw. PC+, jeweils inkl. Peripheriegeräte), während der Verbrauch in den übrigen Bereichen stagniert (Fraunhofer IZM/ISI, 2009, 70).

4.3.2 Endgeräte in Unternehmen und öffentlichen Einrichtungen

Seit den 1980er Jahren hat sich der Desktop-PC zur dominierenden Form der arbeitsplatzbezogenen Computerlösungen entwickelt. Der Bestand an Arbeitsplatzcomputern in Unternehmen und öffentlichen Einrichtungen (Behörden, Schulen, Hochschulen) betrug im Jahr 2010 rund 26,5 Mio. (BMU, UBA und BITKOM, 2011, 3). Diese setzen sich zusammen aus 50 % Desktop-PCs, 41 % Notebooks, 8 % Thin Clients und 1 % Mini-PCs (oder auch Kompakt-PCs bzw. Nettops), die als neue Gerätegeneration erst seit wenigen Jahren am Markt verfügbar sind.

In den vergangenen Jahren haben insbesondere Notebooks aufgrund ihrer mobilen Einsatzmöglichkeit rasant an Bedeutung gewonnen. Daneben stehen aber auch seit über zehn Jahren leistungsfähige serverbasierte Konzepte wie das Thin Client & Server Based Computing zur Verfügung. Letztere stellen die für einen Arbeitsplatz notwendige Anwendungssoftware durch sogenannte Terminalserver zur Verfügung, so dass am Arbeitsplatz kein Desktop-PC mehr notwendig ist. Lediglich ein kleiner intelligenter „Kasten“, ein „Thin Client“, der den Datentransfer zwischen Terminalserver und Ein- und Ausgabegeräten wie Bildschirm, Tastatur und Maus steuert, wird dann noch benötigt. Der „Desktop“

ist also nur noch dem Eindruck nach vorhanden, die eigentlichen Rechen- und Speicherleistungen finden im Terminalserver statt. Aus diesem Grund kann hier auch von „Desktop-Virtualisierung“ gesprochen werden. Desktop-Virtualisierung stellt eine langjährig bewährte Form dessen dar, was in jüngerer Zeit als „Cloud Computing“ diskutiert wird.

Die rund 26,5 Mio. Arbeitsplatzcomputer, die in Unternehmen, Behörden und Bildungseinrichtungen (Schulen und Hochschulen) in Deutschland im Jahr 2010 im Einsatz waren, verbrauchten pro Jahr 3,9 TWh an Strom (BMU, UBA und BITKOM 2011, 76). Das ist mehr Strom als ein großes Kohlekraftwerk im Jahr produzieren kann. Zusammen mit der Energie, die zur Herstellung der Geräte nötig ist, ergibt sich für das Jahr 2010 ein Primärenergiebedarf für die Herstellung und den Betrieb von Arbeitsplatzcomputern in Deutschland von 13,2 TWh (BMU, UBA und BITKOM 2011, 76).

Mit Blick auf stationäre Computerarbeitsplätze deuten alle bis dato vorliegenden Untersuchungen und Informationen darauf hin, dass Thin Client & Server Based Computing ökologische Vorteile gegenüber dem „klassischen“ Desktop-PC bietet (Fraunhofer UMSICHT, 2008; BMU, UBA und BITKOM, 2011, 9 f.). Eindeutig und klar fundiert ist dies mit Blick auf die bessere Energieeffizienz des TC&SBC. Während ein PC bei einer durchschnittlichen Büronutzung pro Jahr einen kumulierten Primärenergieaufwand (KEA) von ca. 700 kWh hat (ohne Monitor), liegen Notebooks, Mini-PCs und Thin Clients (inkl. Serveranteil) gerade einmal bei rund der Hälfte. Gemittelt über alle Geräteklassen liegt der durchschnittliche Jahresenergiebedarf (KEA) eines Arbeitsplatzcomputers derzeit bei 499 kWh (vgl. Tabelle 6). Wie die Tabelle zeigt, ergibt sich auch bzgl. des Materialeinsatzes ein ähnliches Bild.

Daten zur Rohstoffeffizienz von Computerlösungen liegen bis dato kaum vor, so dass eine abschließende Bewertung hier nicht vorgenommen werden kann. Gleichwohl weisen die deutlich geringeren Endgerätegewichte (inkl. Serveranteil) des TC&SBC gegenüber Desktop-PC-Lösungen darauf hin, dass TC&SBC-Lösungen ebenfalls Vorteile bei der Materialeffizienz bieten. Bis dato sind auch keinerlei Hinweise erkennbar, dass diese Miniaturisierung bei den Endgeräten mit ökologischen Nachteilen wie z. B. erhöhten Schadstoffkonzentrationen, erhöhtem Verbrauch besonders knapper Metalle oder schlechterer Recyclingfähigkeiten verbunden ist.

Tabelle 6: Verschiedene Typen von Arbeitsplatzcomputern im Vergleich

	Arbeitsplatzcomputer in Deutschland 2010				
	PC	Mini-PC	Notebook	Thin Client	Gesamt
Bestand an Computerendgeräten					
Anzahl Geräte in Stück	13.000.000	300.000	11.000.000	2.200.000	26.500.000
Ausstattungsstruktur in Prozent	49,1	1,1	41,5	8,3	100,0
Energieverbrauch					
Jahresstromverbrauch pro Computerendgerät p.a. in kWh (ohne Monitor etc.) in der Nutzungsphase	201	74	65	43	
Jahresenergieaufwand Nutzung Endgeräte (KEA) in kWh	549	202	177	117	
Herstellungenergie (KEA) für Endgerät in kWh	584	285 ⁷	340	141	
Nutzungsdauer in Jahren	5	5	4	8	
Herstellungenergie pro Nutzungsjahr in kWh (KEA)	117	57	85	18	
Herstellungs- und Nutzungsenergie pro Gerät p.a. in kWh (KEA)	666	259	262	135	
Kumulierter Energieaufwand gesamt durch Nutzung von zentralen IT-Ressourcen pro Computerarbeitsplatz p.a. in kWh (KEA)	32	32	32	249	
Herstellungs- und Nutzungsenergie pro Computerarbeitsplatz p.a. in kWh (KEA)	698	291	294	384	499
Materialeinsatz					
Produktgewicht Gerät in kg	8	2	2,2	1,5	
Gewicht Dockingstation in kg			0,2		
Produktgewicht gesamt in kg	8	2	2,4	1,5	
Anteiliges Gewicht Terminalserver (25 kg) pro Arbeitsplatz in kg ⁸	0,07	0,07	0,07	0,55	
Gewicht Endgerät und Terminalserveranteil pro Arbeitsplatz in kg ⁹	8,07	2,07	2,47	2,05	5,18
Klimawirkung					
CO ₂ -Emissionsfaktor dt. Strommix g/kWh	580	580	580	580	580
Treibhausgaspotenzial durch Stromverbrauch in CO ₂ äq. p.a. pro Computerarbeitsplatz in kg	122,9	49,4	44,1	75,4	85,4

Quelle: Berechnung und Zusammenstellung der Daten durch Borderstep Institut 2010. Vgl. BMU, UBA und BITKOM, 2011, 9 f.

⁷ Bei der Berechnung des kumulierten Energieaufwandes (KEA) für Mini-PC wurden die Daten eines Notebooks ohne Monitor verwendet, da hier in der Regel Notebookteile verwendet werden.

⁸ Da ein Terminalserver mehrere Arbeitsplätze „bedient“, wird das Gewicht nur anteilig zugeordnet.

⁹ Damit ist gemeint, welches Gewicht die Computergeräte haben, die für einen einzelnen Arbeitsplatz benötigt werden. Dazu zählt nicht nur das Gewicht des Endgerätes, sondern anteilig auch das Gewicht des Terminalservers, der durch diesen Arbeitsplatz in Anspruch genommen wird.

4.4 Festnetz und Mobilfunknetze

Neben den Rechenzentren und IKT-Endgeräten fällt auch für das Betreiben der Netzzugänge zu Telefon- und Internetnetzen sowie der Kernnetze selbst ein Stromverbrauch an, der ebenfalls dem IKT-bedingten Stromverbrauch zuzurechnen ist. Die einzige Studie, die bis dato eine Abschätzung des Stromverbrauchs der Netze vorgenommen hat, ist eine Untersuchung von Fraunhofer IZM/ISI (2009) im Auftrag des Bundeswirtschaftsministeriums. Die für den Netzbetrieb ebenfalls nötigen Rechenzentren wurden dabei nicht betrachtet, sondern sind bereits im oben bilanzierten Stromverbrauch der Server und Rechenzentren enthalten. Dem Bereich "Netzzugang und Kernnetz" werden daher im Folgenden nur die reinen Netzwerkkomponenten zugeordnet, wobei zwischen Festnetz und Mobilfunk unterschieden wird.

Die Erfassung des Gerätebestandes für den Bereich Netzzugang und Kernnetz stellt aufgrund des Fehlens etablierter Strukturmodelle und Statistiken ein Problem dar. Für die Bestandsaufnahme wurde von Fraunhofer IZM/ISI (2009) daher anhand existierender Netzformen und Übertragungstechniken (Standards) eine eigene Struktur konzipiert.

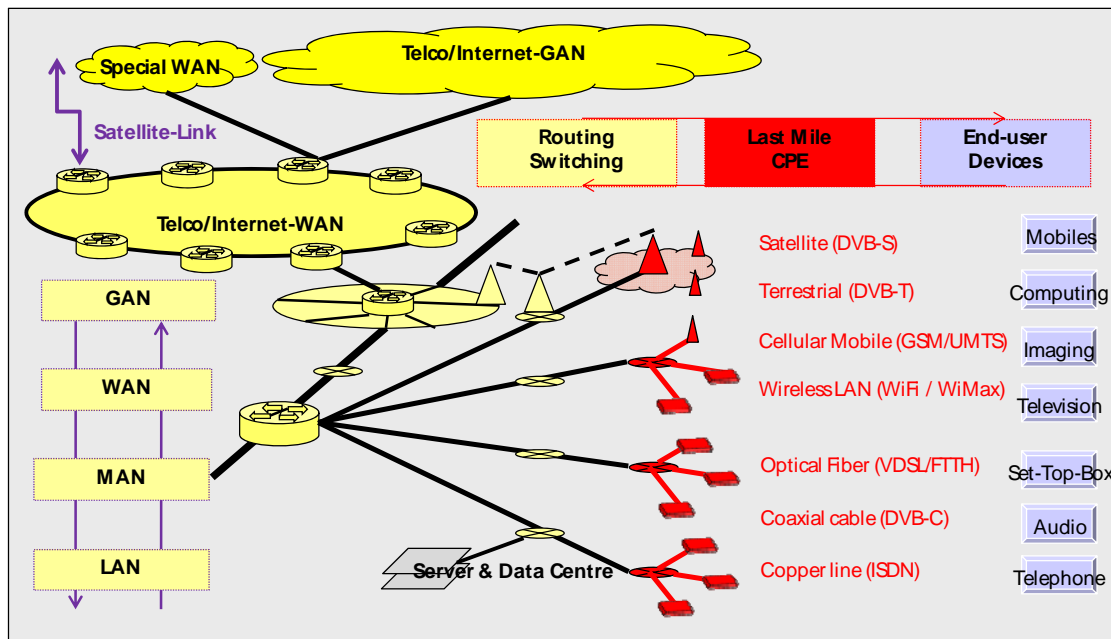
Abbildung 10 verdeutlicht diesen Ansatz. Die Darstellung zeigt einzelne Netzwerkebenen, die sich sowohl regional hierarchisch (Orts- und Regionalnetze sowie globale Fernnetze) als auch nach Betreibern (Telekom- und Internetnetzbetreiber) ordnen lassen. Zudem lassen sich die „Last Mile“ oder Netzzugangstechnologien in drahtgebunden und drahtlos unterscheiden. Der Gerätebestand umfasst allgemein Netzübergangsschnittstellen und Vermittlungsknoten (Gateways, Router und Switches), Signalverstärker und Sende/Empfangseinheiten (Repeater, Basisstationen, Antennen) sowie Richtfunk (Funktürme und Satellitenlinks). Die Mehrzahl dieser funktionalen Kommunikationskomponenten sind Recheneinheiten, die in 19-Zoll-Schränken (Racks) stecken und in Servern untergebracht sind.

Auf dieser Grundlage wurde für den Mobilfunk für das Jahr 2007 ein Bestand an Basisstationen in Deutschland von etwa 135.000 ermittelt, davon 85.000 für die GSM-Netze und 50.000 für die UMTS-Netze. Als Ergebnis dieser Berechnungen entfiel im Jahr 2007 auf den zellularen Mobilfunk selbst, d. h. Basisstationen und Vermittlungsstellen, ein Stromverbrauch von 3,1 TWh (Fraunhofer IZM/ISI, 2009, 12).

Für den Bereich des Festnetzes war in der Untersuchung von Fraunhofer IZM/ISI (2009) aufgrund der eingeschränkten Datenlage keine Bestimmung des Strombedarfs über Bestandswerte und spezifische Stromverbräuche möglich. Daher wurde für das Basisjahr 2007 pauschal ein durchgängiger Stromverbrauch von 10 W pro Haushaltsversorgung angenommen (87,6 kWh/a pro Haushalt). Daraus ergibt sich ein Stromverbrauch von rund 3,3 TWh für das Festnetz in Deutschland. Diese Annahme und die entsprechende Größenordnung des Festnetzverbrauches wurden von der Industrie bestätigt. Eine genaue Modellierung des Festnetzverbrauches steht noch aus und erfordert weiteren Forschungsbedarf (Fraunhofer IZM/ISI, 2009, 12).

Der gesamte Stromverbrauch für den Bereich Netzzugang und Kernnetz im Jahr 2007 wird von Fraunhofer IZM/ISI (2009, 13) somit auf rund 6,4 TWh geschätzt.

Abbildung 10: Heterogene Netzwerkstruktur mit Komponenten



Quelle: Fraunhofer IZM/ISI, 2009, 12.

4.5 Zwischenfazit

Wie die Ausführungen in den vorangegangenen Abschnitten zeigen, ist der IKT-bedingte Stromverbrauch (Server und Rechenzentren, Endgeräte, Netze) in den vergangenen zehn Jahren erheblich angestiegen und machte in 2010 bereits 11 % des Gesamtstromverbrauchs in Deutschland aus, Tendenz steigend. Die Ausführungen zeigen weiterhin, dass die Datenlage bezüglich des Ressourcenverbrauchs der IKT noch äußerst lückenhaft ist und sich bisherige Untersuchungen weitgehend auf den Energieverbrauch in der Nutzungsphase von IKT-Geräten und –Infrastrukturen beschränken. Hinzu kommt, dass verschiedene Studien unterschiedliche Systemabgrenzungen und Datenerhebungsmethoden verwenden, wodurch die bislang vorliegenden Daten nicht ohne weiteres vergleichbar sind und auf nationaler Ebene aggregiert werden können. Bislang fehlt ein differenziertes, methodisch einheitliches und kontinuierliches nationales Monitoring der Umwelteffekte des IKT-Einsatzes in Deutschland.

5 Green durch IT: Ein Beitrag zur Reduktion des Ressourcenverbrauchs?

„Green durch IT“-Lösungen werden ein sehr hohes Potenzial zur Reduktion des Ressourcenverbrauchs zugeschrieben. Die durch die Telekommunikationsindustrie initiierte Studie „Smart 2020 Addendum Deutschland“ kommt in ihrer umfangreichsten Potenzialabschätzung zu dem Ergebnis, dass mit Green durch IT-Lösungen bis zum Jahr 2020 in Deutschland über 194 Mt CO₂e eingespart werden können (BCG 2009). Dabei wird in ein höheres, theoretisch mobilisierbares und ein niedrigeres, auf heutigen Geschäftsmodellen beruhendes Potenzial unterschieden. Im Vergleich zu den in der gleichen Studie errechneten CO₂e-Emissionen von 25 Mt durch die IKT selbst könnte also achtmal mehr eingespart werden, als die IKT selbst verursacht. Andere Institutionen wie der WWF (World Wild Fund for nature) kommen zu ähnlichen Aussagen (WWF, 2008).

Grundsätzlich sei an dieser Stelle angemerkt, dass im Bereich Green durch IT alle angegebene Potenziale nur Abschätzungen einzelner Maßnahmen darstellen, die nicht auf vollständigen Energiebilanzen beruhen. Diese begriffliche Einordnung ist wichtig, da es sich bei diesen Potenzialen um theoretisch erreichbare Zustände handelt, die implizit oder explizit von spezifischen Annahmen oder Szenarien ausgehen. Die in den 1990er Jahren im Zuge der Einführung von PCs in die Arbeitswelt oft verbreitete Vision eines papierlosen Büros mag die Zwiespältigkeit solcher Abschätzungen verdeutlichen. Seitdem ist die Menge an bedrucktem Papier in Büros nicht gesunken. Vor diesem Hintergrund bedürfen die möglichen und chancenreichen Beiträge von Green durch IT-Lösungen einer genaueren Analyse, die jedoch im Rahmen dieses Gutachten nicht geleistet werden kann. Von wenigen Ausnahmen abgesehen (siehe z. B. Erdmann et al., 2004), liegen bisher keine umfassenden Abschätzungen zu solchen Lösungen und ihren möglichen Folgeeffekten vor.

In der Studie „Smart 2020 Addendum Deutschland“ werden folgende Felder als besonders aussichtsreich zur Realisierung von Ressourceneffizienzpotenzialen durch den Einsatz von IT gesehen (BCG, 2009):

- Smart Buildings
- Smart Grid
- Smart Logistics
- Dematerialisierung
- Smart Motors

Die Auswahl der Bereiche berücksichtigt zum einen Felder, die aufgrund des Ressourcen- und Energieverbrauchs (z. B. Anteil am Endenergieverbrauch) für Deutschland von besonderer Bedeutung sind. Zum anderen werden Bereiche analysiert, in denen Deutschland aufgrund seiner Stellung in Forschung und Wirtschaft im internationalen Vergleich eine wichtige Rolle einnimmt.

In den nachfolgenden Kapiteln werden diese Bereiche aufgegriffen, konzeptionell geringfügig erweitert, in ihrer Bedeutung dargestellt und um Ergebnisse aktueller Studien zu diesen Themenfeldern

ergänzt. Die analysierten Bereiche sind demnach Smart Buildings, Smart Grid, Smart Mobility und Logistics, Dematerialisierung, Teleworking und Videokonferenzen sowie Smart Industry und Smart Motors. Es wird jeweils auf die theoretisch realisierbaren Einsparpotenziale Bezug genommen, um das gesamte Potential der Green durch IT-Lösungen zu verdeutlichen.

5.1 Smart Buildings

Städte mit ihrer Infrastruktur stellen einen wesentlichen Faktor für die Entwicklung einer nachhaltigen Gesellschaft und Lebensweise dar. Nach Einschätzung der Vereinten Nationen lebten im Jahr 2007 erstmals in der Geschichte mehr Menschen in Städten als auf dem Land. Der Anteil der Stadtbevölkerung wird demnach bis zum Jahr 2030 voraussichtlich auf über 60 % steigen und im Jahr 2050 rund 70 % erreichen. In absoluten Zahlen bedeutet dies eine Verdopplung der Stadtbevölkerung zwischen 2005 und 2050 von ca. drei auf gut sechs Milliarden Menschen (UN, 2007). Auch die Lebens- und Arbeitsweise von Menschen, mit Ihren Bedürfnissen z. B. an Wohnraum, Arbeitsplätze, Kommunikation und Mobilität hat sich stark verändert. Zu den wesentlichen Umwelteffekten der Urbanisierung zählen (OECD, 2008):

- Zunahme der Zersiedelung (Urban Sprawl) und Ausdehnung der Ballungszentren in Verbindung mit belastenden Flächennutzungen, Bodendegeneration, der Zerschneidung natürlicher Lebensräume und steigenden Treibhausgas- und Luftschadstoffemissionen. Private Haushalte und Dienstleistung sind ein Hauptverursacher für die starke Zunahme der Flächennutzung (UGR 2011, 85)
- In Entwicklungsländern stellt zudem die Entwicklung einer umweltfreundlichen, städtischen Infrastruktur (Wasserver- und Abwasserentsorgung, Abfallentsorgung und öffentliche Verkehrsinfrastruktur) eine große Herausforderung dar.

Nicht immer sind die Zusammenhänge zwischen Verstädterung und Umweltauswirkungen jedoch negativ, wie die folgenden Punkte verdeutlichen:

- So steht beispielweise den augenscheinlichen Effekten einer zunehmenden Versiegelung und der lokalen Konzentration von Verkehrs- und Ressourcenströmen in städtischen Strukturen, ein geringerer spezifischer Ressourcen- und Energieverbrauch bzw. eine effizientere Nutzung von Ressourcen und Skalenvorteile in den Feldern Wirtschaften und Wohnen gegenüber. Beispielsweise ist die Flächeninanspruchnahme einer Person, die im mehrgeschossigen Wohnungsbau lebt geringer, als die eines Bewohners von einem Einfamilienhaus in ländlichen Strukturen.
- Urbane Räume besitzen aufgrund dieser Effekte oftmals eine effiziente Infrastruktur für die Energie- und Wasserversorgung sowie die Abwasser- und Abfallentsorgung. Hinzu kommt, dass Städte zu einem veränderten Mobilitätsverhalten führen können, wenn wie in vielen Metropolen der Fall, gut ausgebaute öffentliche Personennahverkehrsnetze existieren (siehe auch Kap. 5.3 und 5.4).

Betrachtet man den aktuellen Energie- und Ressourcenverbrauch von Städten differenzierter so stellt man fest, dass neben der Flächennutzung und den materiell gebunden Ressourcen in Infrastruktur und Gebäuden, vor allem der Energieverbrauch in Form von Strom und Wärme eine signifikante Grö-

ßenordnung einnimmt. Insbesondere der Verbrauch privater Haushalte ist neben den Sektoren Industrie, Verkehr und Gewerbe/ Handel/ Dienstleistungen von großer Bedeutung. Er trägt mit 28 % zum gesamten deutschen Endenergieverbrauch bei wovon rund 73 % für Raumwärme benötigt werden (UGR, 2011). Dieser wird somit wesentlich durch Heizenergie bestimmt, die von der genutzten Heiztechnik (Zentralheizung, Etagenheizung, Fernwärme, etc.) und dem bauphysikalischen Zustand (Baujahr, Sanierungszustand, etc.) abhängt. Hinzu kommt, dass 57 % und damit rund 23 Mio. der privaten Haushalte in Deutschland in Mietwohnungen leben. Im Jahr 2008 befanden sich zudem geschätzte 53 % der privaten Haushalte in sogenannten Mehrfamilienhäusern, d.h. in Gebäuden mit drei und mehr Wohnungen (Statistisches Bundesamt, 2009), wovon in den nächsten 20 Jahren rund die Hälfte energietechnisch saniert werden müssen.

Tabelle 7: Wohngebäudeart privater Haushalte

Haushalt/ Gebäudeart	Einheit	Deutschland			Altes Bundesgebiet			Neue Länder und Berlin Ost		
		1998	2003	2008	1998	2003	2008	1998	2003	2008
Erfasste Haushalte	Anzahl	68.863	59.713	58.984	54.928	48.227	45.652	13.935	11.486	13.332
Hochgerechnete Haushalte	1000	36.703	37.931	39.077	29.921	30.861	31.771	6.783	7.070	7.306
Wohngebäude mit 3 und mehr Wohnungen	%	53,4	52,2	53,3	49,8	49,3	50,8	70,6	64,6	64,3
Einfamilienhaus	%	30,8	32	33	32,8	33,6	34,3	21,3	25,6	27,4
Zweifamilienhaus	%	14,3	13,9	11,9	15,9	15,2	13,1	7,3	8,2	6,7
Sonstige Gebäude	%	1,4	1,8	1,7	1,5	1,9	1,8	0,8	1,6	1,5

Quelle: Statistisches Bundesamt 2009.

Daraus ergibt sich ein entscheidender, bisher stark vernachlässigter, Ansatzpunkt für die Entwicklung einer intelligenten städtischen Infrastruktur. Durch die Entwicklung intelligenter (smarter) Infrastrukturen und Gebäude, z. B. in Form von Hausautomatisierungstechnik für das Energiemanagement im mehrgeschossigen Wohnungsbau, lassen sich bis zu 30 % des Heizenergieverbrauchs einsparen (Riedel, 2006; Riedel, 2007). Die damit verbundenen Einsparpotenziale sind mit denen klassischer Wärmedämmverbundsysteme vergleichbar. Berechnungen des Borderstep Institutes haben ergeben (Beucker et al., 2012), dass sich durch eine gezielte Förderung solcher Energiemanagementlösungen und der Kombination mit klassischen Dämm- und Sanierungsmaßnahmen im mehrgeschossigen Wohnungsbau, die im Energiekonzept der Bundesregierung formulierte Zielsetzung einer 20 %igen Reduktion des Wärmeverbrauchs bis zum Jahr 2020 erreichen ließen und CO₂e in einer Größenordnung von 15 Mt CO₂e vermeiden ließen. Weitere große Potenziale lassen sich mit der Technik in Immobilien der öffentlichen Hand (Schulen, Ämter, Verwaltungsgebäude, etc.) erreichen. Vergleich-

bare Erfolge werden durch den Einsatz von Mess-, Steuer- und Regelungstechnik für das Energiecontrolling in Industrie und Gewerbe erzielt (Dena, 2009).

Die aus diesem Einsatz von Automatisierungs- sowie Mess-, Steuer- und Regelungstechnik resultierenden Effekte sind somit eindeutig positiv zu bewerten und ein gutes Beispiel für die Realisierung von wesentlichen Energieeffizienzpotenzialen durch den Einsatz von Informations- und Kommunikationstechnik. Der Eigenverbrauch der Technik (z. B. Ressourcen und Energieverbrauch für die Steuer- und Regelungstechnik) ist gegenüber den großen und langfristigen Einsparungen der Technik gering. Durch die Technik können zudem die warmen Nebenkosten im mehrgeschossigen Wohnungsbau stabilisiert bzw. leicht gesenkt werden, was angesichts steigender Energiekosten und der aktuellen Diskussion um eine sozialverträgliche Umsetzung der Energiewende ein entscheidender Aspekt ist.

Zudem stellt die Technik einer adaptiven Heizungssteuerung ein wichtiges Bindeglied für eine zukünftige Energieversorgung und die Entwicklung intelligenter Energienetze (siehe auch Kapitel 5.2) dar, da sie die Ermittlung spezifischer Energiebedarfe in Haushalten ermöglicht und somit die Einbindung von Gebäuden in eine dezentrale und virtualisierte Energieversorgung ermöglicht.

Die Absicht dieser auf Verbrauchsreduktion abzielenden Technik ist auch ein wichtiges Unterscheidungsmerkmal von vielen anderen Smart Building Technologien. Diese können im Einzelfall zwar auch zu einer Reduktion des Energieverbrauchs, z. B. durch eine Beleuchtungssteuerung führen, ihre Absicht ist jedoch primär auf Komfortgewinn und die Vernetz- und Integrierbarkeit von Smart-Home-Ansätzen ausgerichtet und birgt damit auch Gefahren von Reboundeffekten (siehe Kapitel 8).

5.2 Smart Grid

Ein weiteres Potenzial für die Mobilisierung von Ressourcen- und Energieeffizienz durch IT liegt in der Entwicklung einer intelligenten Energieversorgung. Die Bruttostromerzeugung in Deutschland betrug im Jahr 2011 ca. 615 TWh (AGEB, 2011). Sie trägt damit zu einem hohen Anteil (ca. 40 %) der CO₂-Emissionen bei. Hinzu kommt, dass durch den Beschluss der Bundesregierung zur Energiewende der Wandel der Energieversorgung deutlich schneller vorangetrieben werden muss. Neben dem Ausstieg aus der Kernkraft, ist ein weiterer Ausbau der erneuerbaren Energien, der Ausbau der Stromversorgungsnetze und der Kraftwärmekopplung, die Entwicklung von Speichertechniken und eine Erhöhung des Anteils an Elektromobilen sowie die Umsetzung von Energiespar- und Effizienzmaßnahmen geplant. Außerdem unterliegt der Energiemarkt europäischen und nationalen Regulierungen, wie z. B. der Forderung nach einer Liberalisierung und Entflechtung des Marktes oder der Verbesserung der Endenergieeffizienz und der verfügbaren Energiedienstleistungen, welche beispielsweise auch die Einführung von flexiblen Stromtarifen und transparenter Abrechnungssysteme beinhaltet.

Alle angestrebten Zielsetzungen haben gemeinsam, dass sie genaue Kenntnisse über den tatsächlichen Energieverbrauch und –bedarf und damit eine bidirektionale Kommunikation im Energienetz voraussetzen. Insbesondere die Optimierung der Energieerzeugung aus konventionellen und erneuerbaren Quellen, setzt eine kleinräumigere und kurzfristigere Planung von Angebot und Nachfrage voraus. Darunter fällt z. B. auch die Abstimmung von Energieerzeugung im Verbund von regenerativen Energien, Kraft-Wärme-Kopplung und dem Verbrauch in Industrie, Gewerbe und Haushalten. Ein

entsprechend informations- und kommunikationstechnisch ausgerüstetes Energienetz wird auch als Smart Grid bezeichnet. Seine Entwicklung erfordert neben dem Ausbau des Energieversorgungsnetzes, die Entwicklung einer informationstechnischen Infrastruktur, bestehend aus Erfassungs- und Messtechnik (Smart Meter), Kommunikationstechnik (Smart Meter Gateway) sowie die Etablierung von Abrechnungs-, Handels- und Dienstleistungsplattformen.

Einer der zentralen Faktoren für die Mobilisierung von Energieeffizienzpotenzialen in einem zukünftigen Smart Grid wird darin gesehen, dass die Nachfrage nach Strom in gewissem Umfang elastisch ist, d. h. Stromverbrauch vorgezogen oder nachgeholt werden kann. Der Anreiz für eine solche Elastizität in der Nachfrage soll über eine Flexibilisierung von Stromtarifen geschaffen werden und dem Energieversorger bzw. Netzbetreiber so Möglichkeiten für ein Last- oder Demand Side Management¹⁰ verschaffen, in das sowohl Privathaushalte als auch Industrie und Gewerbe einbezogen werden können. Für den Energieversorger bzw. Netzbetreiber besteht der Anreiz für ein Lastmanagement darin, die Beschaffung teurer Ausgleichs- und Regelenenergie auf dem Energiemarkt zu vermeiden.

Während die Potenziale des Lastmanagements in Industrie und Gewerbe aufgrund der gezielt ansprechbaren Großverbraucher und bereits bestehender Tarifangebote besser abschätzbar sind, ist das Potenzial in privaten Haushalten umstritten. Es wird derzeit deutschland- und europaweit in einer Vielzahl von Feldversuchen erprobt. Die Schätzungen schwanken je nach zugrunde gelegtem Tarifmodell und den einbezogenen Verbrauchern (Haushaltsgeräte, Wärmepumpen, etc.) stark. Von großer Relevanz für die Abschätzung des Potenzials sind angenommene Rahmenbedingungen. Hierzu zählen neben der Schwankungsbreite der Stromtarife, die Systemkosten¹¹, die angenommenen Lastverläufe und -schwankungen, die Entwicklung von Regelungen zum Datenschutz¹², die realen Nutzungsregime der Geräte in den Haushalten sowie die möglichen Verhaltensänderungen und die Bedienerfreundlichkeit der entwickelten Lösungen.

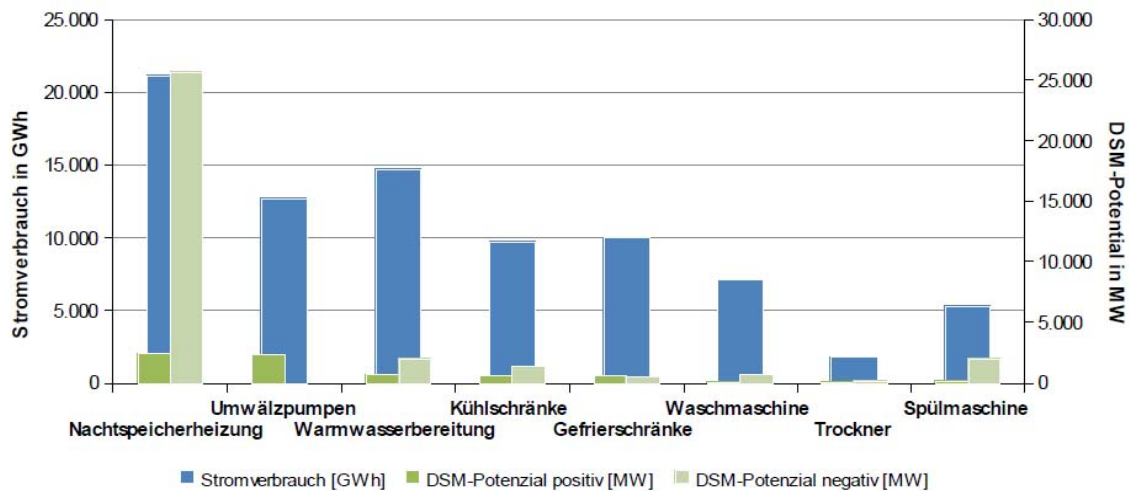
In einer aktuellen Abschätzung des Lastmanagementpotenzials (Dena, 2010) wird das durchschnittliche positive Demand-Side-Management-Potenzial in Haushalten auf 6.732 MW und das negative Potenzial auf 35.278 MW abgeschätzt. Unter Umweltgesichtspunkten ist vor allem das negative Demand-Side-Management-Potenzial interessant, da es für die Einspeisung fluktuierender, regenerativer Energien in das Netz genutzt werden kann.

¹⁰ Es wird zudem unterschieden zwischen positivem Demand-Side-Management-Potenzial, bei dem Verbraucher vorübergehend keinen Strom aus dem Netz beziehen (auch „Peak Shifting“ genannt) und so zur Minderung von Lastspitzen in der Stromnachfrage beiträgt, und negativem Demand-Side-Management-Potenzial, bei dem Verbraucher vorübergehend aktiviert werden, um überschüssigen Strom, z. B. aus regenerativen Energien, zu nutzen (auch „Valley Filling“ genannt).

¹¹ Z. B. zusätzliche Kosten für Smart Meter und deren Betrieb sowie Steuerungselektronik für die Haushaltsgeräte.

¹² Derzeit wird vom Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI) ein sogenanntes Schutzprofil für Smart Meter entwickelt, das den Umgang mit personenbezogenen Energiedaten regeln soll.

Abbildung 11: Durchschnittlichen Potenziale für Demand Side Management im Haushaltssektor



Quelle: Dena 2010 nach EWI.

Wird das Lastmanagement auf Haustechnik ausgedehnt, können zudem auch der Betrieb von Wärmepumpen und elektrischer Warmwasseraufbereitung verlagert oder an die Nutzung von Strom aus regenerativen Quellen gekoppelt werden. Hierdurch könnten große schaltbare Lasten in die Energieverteilung und -versorgung einbezogen werden. So werden z. B. ein großer Teil der in Deutschland installierten rund 350.000 Wärmepumpen mit einer Anschlussleistung von 1.400 MW bereits mit eigenem Tarif und Zähler betrieben und für ein Demand-Side-Management genutzt (BMP, 2010). Auch die gezielte Wandlung und Speicherung von Wind- oder Solarstrom in Form von Wärme (z. B. in Form von Wasser, latenter Wärme oder der Kernaktivierung von Gebäuden) ist auf diese Weise möglich.

Die Studie Smart 2020 gibt für das Lastmanagement ein theoretische Einsparpotenzial von 11 Mt CO₂e im Jahr 2020 an (BCG, 2009). Dabei wird jedoch davon ausgegangen, dass 30 % des Stromverbrauchs in Haushalten, Gewerbe, Dienstleistung und Handel über eine direkte Lastkontrolle durch den Energieerzeuger bzw. den Netzbetreiber aktiv geschaltet werden können (z. B. in Form von Waschmaschinen, Kühlaggregaten, etc.) und so zu einer gleichmäßigeren Auslastung von Kraftwerken und damit geringeren CO₂-Emissionen führen. Dieses Potenzial muss jedoch nach Auswertung aktueller Forschungsergebnisse in den Modellregionen von E-Energy (BAUM, 2012) mit Vorsicht bewertet werden.

Entscheidend für eine umfassende Mobilisierung der Lastmanagementpotenziale ist die Entwicklung von Anreizen und rechtlichen Rahmenbedingungen, die eine Flexibilisierung der Stromtarife fördern und damit Anreize für Endkunden und Dienstleister schaffen Energie einzusparen. Die existierenden Tarifstrukturen bieten insbesondere für Privathaushalte derzeit keine Anreize Stromverbrauch in Niedriglastzeiten zu verlagern. Gleiches gilt für die Entflechtung der Energiewirtschaft in Energieversorgung und Netzbetreiber. Für den Energieversorger bestehen in der jetzigen rechtlichen und marktlichen Situation nur eine geringe Motivation flexible Tarife anzubieten, da die hieraus resultie-

renden möglichen Gewinne aufgrund fixierter Netzgebühren und Steuersätzen nicht realisiert werden können.

Vergleichbar ist die Situation im Bereich der Smart Meter, die für die Übermittlung von Preissignalen und die Abrechnung der Tarife benötigt wird. Ein marktlich getriebener Roll-Out von Smart Metern, der sich alleine über die auf Effizienzgewinnen des Meterings und einer größeren Transparenz beim Endkunden finanziert, ist unter den aktuellen Bedingungen unwahrscheinlich. Die aus reinem Smart Metering realisierbaren Einsparpotenziale von ca. 5 % können die Kosten der bisher angebotenen Dienstleistungen nicht kompensieren. Zudem beruhen viele der Einsparungen auf Einmaleffekten (z. B. dem Austausch energieineffizienter Geräte).

Zu weiteren möglichen informations- und kommunikationstechnischen Maßnahmen mit, wenn auch, geringeren Energieeinsparpotenzialen, können laut der Studie Smart 2020 die Netzüberwachung und –absicherung (0,7 Mt CO₂e im Jahr 2020), ein verbesserter Vorhersageservice für die Einspeisung erneuerbarer Energien (1,7 Mt CO₂e im Jahr 2020), virtuelle Kraftwerke (1,7 Mt CO₂e im Jahr 2020) und die Flottenoptimierung von Großkraftwerken (3,2 Mt CO₂e im Jahr 2020) zählen (BCG 2009).

Die genannte Potenziale eines Smart Grid unterliegen damit je nach angenommen Rahmenbedingungen in der Energiewirtschaft und im Energierecht großen Schwankungen. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Umgestaltung und Optimierung der deutschen Energieversorgung und des Stromnetzes eine Maßnahme von größter Bedeutung ist, die neben der Sicherung der Energieversorgung auch der deutschen Wirtschaft große Technologie- und Wettbewerbsvorteile verschaffen kann. Eine Realisierung aller genannten Möglichkeiten erscheint jedoch aufgrund des derzeit hochregulierten deutschen Energiemarktes und der daraus resultierenden rechtlichen Situation kurzfristig unwahrscheinlich.

5.3 Smart Mobility und Logistics

Neben der Infrastruktur und der Energieversorgung ist vor allem der Verkehr mit rund 28 % für große Anteile des gesamtdeutschen Endenergieverbrauchs verantwortlich. Innerhalb des Sektors Verkehr steht der private Straßenverkehr an erster Stelle gefolgt vom Nutzverkehr. Der Straßenverkehr insgesamt ist mit 155 Mio. T CO₂e in Summe für ca. 85 % der verkehrsbezogenen und 20 % der gesamten CO₂-Emissionen Deutschlands verantwortlich. Die verbleibenden Verkehrsemissionen entfallen auf Schiffs-, Zug- und Luftverkehr (BCG, 2009).

Neben technischen Maßnahmen, alternativen Antriebskonzepten sowie Kraftstoffen, als auch der Vermeidung von Verkehr, kommt der Informationstechnik eine große Bedeutung für die Emissionsminderung im Verkehr zu. Unter Smart Mobility und Smart Logistics werden solche Maßnahmen zusammengefasst, die durch die Verbindung von Informations- und Kommunikationstechnik mit Verkehrstechnik zu einer Optimierung und damit zu einer Reduktion des Verkehrs und seiner Emissionen beitragen. Folgende Beispiele sollen das Potenzial verdeutlichen, das durch den Einsatz von Informationstechnik im Verkehrssektor mobilisiert werden kann:

- Logistik: Das Logistikaufkommen steigt weltweit stark an. Bis zum Jahr 2020 wird ein Anstieg um 27 prognostiziert (BCG, 2009). Das Logistikaufkommen führt insbesondere in Form von LKW-

gebundener Binnen- und Transitlogistik zu einer starken Zunahme von Emissionen Umweltwirkungen. Informations- und Kommunikationstechnik kann auf verschiedenen Arten dazu beitragen den Energie- und Ressourcenverbrauch von Güterlogistik zu senken. Eine wichtige Rolle spielt beispielsweise das IT-gestützte Flottenmanagement, bei dem Aufträge nach Wegstrecken, Beladung und Verkehrssituation optimiert werden können und so Energieverbrauch und überflüssige Leerfahrten reduziert werden können. Zusätzlich können Telematikkomponenten (z. B. Ortungs- und Mobilfunktechnik), Schnittstellen zu Lagerverwaltungs- und Gebäudemanagementsystemen und Smart Tags (Intelligente Etiketten) genutzt und so einzelne Güter oder Ladungen entlang der Lieferkette nachverfolgbar werden. Dadurch kann z. B. in der Lebensmittellogistik die Lagerhaltung und der damit verbundene Kühl- und Klimatisierungsaufwand reduziert werden, indem Kühltemperaturen und Lagerbestände angepasst werden. Beispiele aus der Praxis zeigen, dass durch den Einsatz von Logistiksteuerungssystemen Transporte optimiert, Warte- und Standzeiten verringert, überflüssiger Fahrten reduziert und somit der Energieverbrauch und Kosten der Logistik gesenkt werden können (Dena, 2009). Das Einsparpotenzial dieser Technik wird für Deutschland bei rund 2,8 Mio. T CO₂e gesehen (BCG, 2009). Vergleichbare Effekte können auch durch die Optimierung von Luftverkehrs-, Schifffahrts- oder Schienenlogistik erzielt werden. Werden durch die Technik zusätzlich die Schnittstellen zwischen einzelnen Transportmedien, wie z. B. zwischen Lastkraftverkehr und Schiene optimiert und dadurch mehr Transporte auf CO₂-effizientere Logistikmedien verlagert so ließen sich dadurch bis zu 6,9 Mio. T CO₂e einsparen (ebd.).

- Telematiksysteme und Verkehrsleittechnik: In einer Vielzahl von Vorhaben wird die Verbesserung des Verkehrsflusses mit Hilfe von Telematiksystemen und Verkehrsleittechnik erprobt. Durch Optimierung soll die vorhandene Verkehrsinfrastruktur effizienter genutzt und dadurch Emissionen reduziert werden. In wissenschaftlichen Untersuchungen konnte beispielsweise gezeigt werden, dass durch Streckenbeeinflussungsanlagen, die bei erhöhtem Verkehrsaufkommen auf Autobahnabschnitten die Höchstgeschwindigkeit temporär begrenzen, die CO₂-Emissionen um bis zu zehn Prozent reduziert werden können (Dena, 2009). Vergleichbare Ergebnisse können durch einen optimierten Verkehrsfluss erreicht werden (BCG, 2009). Zudem kann die Technik auch genutzt werden, um die Leistungen des öffentlichen Nahverkehrs zu optimieren. Der Ausbau eines flächendeckenden Systems zu Erreichung dieses Ziels wird jedoch bezogen auf die realisierbaren Einsparpotenziale von maximal 14 Mio. T CO₂e bis zum Jahr 2012 als vergleichsweise teuer angesehen (ebd.).
- Einführung von Mautsystemen: In einer Reihe europäischer Städte (z. B. Stockholm und London) sind in den letzten Jahren innerstädtische Mautsysteme eingeführt worden. Diese basieren auf umfangreichen Informations- und kommunikationstechnischen Strukturen (z. B. Scanner, Kameras, IT-Systeme) und haben zum Ziel, den Verkehrsfluss zu optimieren und Verkehr und Emissionen zu reduzieren (BCG, 2009). Fahrzeuge werden mit Hilfe des Systems erfasst und abhängig von der Tageszeit mit einer Maut belegt. In Stockholm hat die Einführung des Systems zu einer Reduktion des innerstädtischen Verkehrs um 25 % geführt. Die Treibhausgasemissionen konnten um 40 % gesenkt werden. Gleichzeitig konnte die Nutzung des öffentlichen Personennahverkehrs um 6 % gesteigert werden (siehe ebd.). Vergleichbare Ergebnisse liegen aus London vor. Auch hier wurde durch die Einführung der Maut der innerstädtische Verkehr um 30 % reduziert und

Emissionen um 20 % gesenkt. Für deutsche Städte wurde das Emissionsminderungspotenzial welches aus der Einführung einer innerstädtischen Maut resultiert auf rund 5 Mio. T CO₂e berechnet. Dieser Berechnung liegt die Annahme zugrunde, dass in 20 größeren deutschen Städten ein vergleichbares Mautsystem eingeführt wird (ebd.)

- Optimierung des Energieverbrauchs von Fahrzeugen: Informations- und Kommunikationstechnik spielt schließlich in der Optimierung des Kraftstoffverbrauchs eine wesentliche Rolle. Da die Leistungsfähigkeit und Reichweite neuer Verbrennungs-, Hybrid- und Elektromotoren wesentlich von der Steuerung des Kraftstoff-Luft-Gemisches, der Ent- und Beladung von Akkumulatoren sowie der Rekuperation und dem Management von Energieverbrauchern im Fahrzeug abhängt, spielen Sensoren, Mikroprozessoren und Software eine zentrale Rolle für die Entwicklung neuer, energieeffizienterer Kraftfahrzeuge. Unter dem Begriff Chiptuning oder Ecotuning wird eine Vielzahl von Dienstleistungen zur Reduktion des fahrzeugbezogenen Kraftstoffverbrauchs angeboten. Dabei wird durch eine Modifikation der Software der Steuergeräte im Kraftfahrzeug eine Reduktion des Kraftstoffverbrauchs erreicht. Der Erfolg dieser Maßnahmen ist nicht unumstritten, da sich eine Optimierung des Kraftstoffverbrauchs negativ auf die Stickoxidemissionen auswirken kann. Schließlich können Verbrauchsreduktionen auch durch eine kraftstoffschonende Fahrweise erzielt werden. Hierbei spielt wiederum die Auswertung und Rückmeldung (Feedback) aus der Sensor- und Mikroprozessortechnik im Fahrzeug und die Verarbeitung in anwenderfreundliche Signale zur Anpassung des Fahrstils eine wichtige Rolle. Ansatzweise werden solche Systeme in modernen Kraftfahrzeugen heute schon genutzt. Eine Kopplung mit Navigationssystemen sowie Telematiksystemen und Verkehrsleittechnik mit dem Ziel vorausschauende Empfehlungen zur Anpassung des Fahrstils zu machen (siehe auch oben), wird derzeit im Rahmen von Forschungsprojekten erprobt. Das Potenzial letztgenannter Maßnahmen insgesamt wird mit ca. 20 % Reduktion im Kraftstoffverbrauch und einem Reduktionspotenzial von 17.65 Mio. T CO₂e als vergleichsweise hoch angesehen (BCG, 2009).

Die genannten Maßnahmen verdeutlichen das große und vielfältige im Verkehrssektor liegende Energieeinsparpotenzial. Eine Quantifizierung der absoluten Einsparpotenziale im Verkehrssektor ist jedoch schwierig und mit großen Unsicherheiten verbunden, da es sich global gesehen um einen Sektor mit starkem Wachstums- und Veränderungspotenzial handelt. So unterliegen beispielsweise Logistikströme, bedingt durch sich wandelnde Handels- und Marktstrukturen (auch induziert durch E-Commerce und Onlinehandel), einer hohen Dynamik. Hinzu kommt, dass einige der Maßnahmen (z. B. Telematiksysteme und Verkehrsleittechnik) zwar zu einer Effizienz des Verkehrssystems beitragen, diese aber oftmals effektiv nicht zur Reduktion von Umweltwirkungen und Emissionen beitragen, da beispielsweise die Steigerung der Verkehrsleistung im Vordergrund steht. Die Absicht der durchgeführten Maßnahme bzw. das Ziel der eingeführten Technik ist daher im Verkehrssektor entscheidend, um den Beitrag zu einer Umweltentlastung zuverlässig bestimmen zu können.

5.4 Dematerialisierung, Teleworking und Videokonferenzen

Unter dem Begriff der Dematerialisierung, d. h. der Substitution von ressourcen- und energieintensiven Produkten und Dienstleistungen durch solche Angebote, die einen geringeren Ressourcen- und Energieverbrauch aufweisen, werden eine Vielzahl von Anwendungen aus dem Bereich der Informations- und Kommunikationstechnik diskutiert. Die große Herausforderung in diesem Feld liegt, aufgrund der meist komplexen Anwendungs- und Nutzungskontexte solcher Angebote, darin, die resultierenden Ressourcen- und Energieeinsparungen verlässlich zu bestimmen. Chancen und mögliche Reboundeffekte (siehe Kap. 8) liegen oft dicht beieinander. Dies belegen die folgenden Beispiele:

- **Teleworking:** Unter Teleworking wird die vollständige oder teilweise Ausübung von individuellen Arbeiten außerhalb von Gebäuden des Arbeitgebers (BCG, 2009). Telearbeit ist in vielen Branchen und Tätigkeitsfeldern bereits Praxis und hat durch die Verbreitung und Leistungsfähigkeit von Informations- und Kommunikationstechnik einen deutlichen Schub erfahren. Ein weiterer Grund für die Ausbreitung dieser Arbeitsweise sind auch Veränderungen in der Arbeitswelt, wie die Zunahme von Beschäftigungsverhältnissen in Teilzeit oder Forderungen nach einer besseren Vereinbarkeit von Familie und Beruf. In der Wirtschaft hat sich eine Vielzahl von Formen des Teleworking herausgebildet. Sie reichen von Modellen mit unregelmäßigen Präsenzphasen (z. B. für Mitarbeiter im Außendienst) über regelmäßige Präsenz (z. B. bei Teilzeitverträgen), bis hin zu intermittierenden Modellen, bei denen Mitarbeiter aufgrund von projektgebundenen Abwesenheitsphasen nur gelegentlich ihren Büroarbeitsplatz nutzen. In der Wirtschaft werden zudem verschiedene Bürokonzepte (z. B. nonterritoriale Büroorganisation) genutzt, die diesen veränderten Arbeitsverhältnissen Rechnung tragen. Neben den finanziellen Einsparungen, die aus einer Verringerung der Bürofläche resultieren, werden oftmals die großen Potenziale des Teleworking zur Reduktion von Treibhausgasen betont. Durch die Vermeidung von beruflichem Pendelverkehr in verschiedenen Wirtschaftszweigen könnten demnach in Deutschland bis zu 4 Mt CO₂e bzw. 2,5 % der Verkehrsemissionen eingespart werden (BCG, 2009). In einer Studie des WWF sind sogar Vermeidungspotenziale von 1.000 Mt CO₂e für die gesamten Effekte des Teleworking bis zum Jahr 2030 berechnet worden (WWF, 2008). Die Höhe des Potenzials ist jedoch keineswegs unumstritten, denn der Vermeidung von beruflichem Pendelverkehr stehen verschiedene kompensierende Effekte, wie eine mögliche Zunahme von privatem Verkehr in der gewonnenen Zeit sowie der ressourcen- und energieintensive Aufbau einer parallelen Büro- und Kommunikationsstruktur in den Haushalten entgegen (Hilty, 2008). Es wird daher befürchtet, dass Teleworking zumindest teilweise nur zu einer Verlagerung von Umweltwirkungen und Emissionen aus dem beruflichen in das private Umfeld führt.
- **Videokonferenzen:** Videokonferenzen oder auch virtuelle Konferenzen können dazu beitragen Emissionen und Kosten sparen. Sie können z. B. im Rahmen regulärer Büroarbeit oder auch im Teleworking genutzt werden. Aktuelle Videokonferenzsysteme sind sehr leistungsfähig und erlauben, einen Breitbandanschluss vorausgesetzt, neben störungsfreier Ton- und Bildübertragung auch die Austausch und das gemeinsame Arbeiten an Dokumenten und anderen Dateien. Durch Videokonferenzen können Geschäftsreisen vermieden und Austausch- und Abstimmungsprozesse

se über große Distanzen ermöglicht werden. Hauptmotiv für die Nutzung der Systeme sind die damit verbundenen Zeit- und Kosteneinsparungen. Neben den vermiedenen Reisekosten kann die Arbeitszeit effizienter genutzt werden. Untersuchungen und Fallbeispiele belegen Kosteneinsparungen bei den Reisekosten von bis 30 % (Dena, 2009). Emissionseinsparungen in vergleichbarer Höhe können dann realisiert werden, wenn die vermiedenen Reisen nicht durch andere Aktivitäten kompensiert werden. Die Studie Smart 2020 beziffert die durch Videokonferenzen erzielbare Emissionsminderung auf 7,6 Mt CO₂e im Jahr 2020, wenn 50 % der Geschäftsreisen durch Videokonferenzen ersetzt werden (siehe BCG, 2009).

- Nutzung elektronischer Dokumente und Medien: Ein weiteres großes Ressourcen- und Energieeffizienzpotenzial wird im Ersatz papiergestützter Dokumente und Medien durch elektronische oder informationstechnische Varianten gesehen. Ansätze wie elektronische Rechnungen (E-Invoice), elektronische Tickets (E-Tickets) oder elektronisches Papier (E-Paper und E-Reader) unterstreichen diese Entwicklung. Auch in diesem Bereich ist das primäre Ziel nicht die Reduktion des Ressourcen- oder Energieverbrauchs, sondern der wirtschaftliche Gewinn, der sich aus der elektronischen und automatisierten Abwicklung ergibt. Die Reduktion von Umweltwirkungen ergibt sich aus der Einführung dieser Techniken nicht zwangsläufig, da in nachgelagerten Nutzungs- oder Verarbeitungsschritten (z. B. Dienstreiseabrechnungen oder Steuererklärung) wieder eine Rechnung oder ein Ticket als Papiausdruck notwendig ist. Der vollständige Ersatz papiergebundener Systeme erfordert daher Systemlösungen und -innovationen, die den vollständigen Lebenszyklus einer Dienstleistung oder eines Angebotes berücksichtigen. Größere Potenziale könnten sich aus Sicht der Ressourcen- und Energieeffizienz im Bereich der elektronischen Medien ergeben, wenn der Konsum von Musik, Filmen, Zeitungen und Büchern verstärkt über energie- und ressourceneffiziente Endgeräte erfolgt. Auch hier gilt jedoch, dass das Gesamtsystem aus Dienstleistungsangebot, Verarbeitung und Transaktion in der informationstechnischen Infrastruktur, Endgeräten und der Anwendung derselben durch den Nutzer über seine ökologische Wirksamkeit entscheidet. Für Teile der genannten Angebote existieren erste Untersuchungen. Umfassende Bewertungen vollständiger Nutzungssysteme für die Anwendungen stehen oftmals noch aus. In der Studie Smart 2020 werden die Einsparpotenziale der genannten Maßnahmen als relativ gering eingestuft (E-Invoice: 0,04 Mt CO₂e im Jahr 2020, Download von Musik und Filmen: 0,09 Mt CO₂e bis 2020, E-Paper für Bücher, Zeitungen und Zeitschriften: 4,5 Mt CO₂e bis 2020, siehe BCG, 2009).

Unter dem Begriff der Dematerialisierung wird eine Vielzahl weiterer wirtschaftlich relevanter Entwicklungen zusammengefasst, so beispielsweise auch Anwendungen des elektronischen Handels (E-Commerce) oder der elektronischen Beschaffung (E-Procurement). Auch für diese gilt, dass sie in erster Linie für eine effiziente Abwicklung wirtschaftlicher Prozessen geschaffen wurden. Ihr Beitrag zum Ressourcenschutz ist daher mit Vorsicht oder sogar negativ zu bewerten. So kommen aktuelle Untersuchungen zu den Umweltwirkungen von Online-Handelsplattformen beispielsweise zu dem Schluss, dass der durch das weltweite Einkaufen und Beschaffen von Gütern zu einem starken Anstieg von Transportvorgängen und Logistik führt (IPTS, 2004).

5.5 Smart Industry und Smart Motors

Weitere 28 % des deutschen Endenergieverbrauchs werden in der Industrie benötigt. Die möglichen Anwendungsfelder von Informations- und Kommunikationstechnik, z. B. in Form von Mess-, Steuer- und Regelungstechnik sowie Software, zur Senkung des Energieverbrauchs sind vielfältig und bisher nicht ausgereizt. Große Potenziale liegen beispielsweise noch im Zustandsmonitoring von Maschinen und Anlagenteilen sowie der Optimierung von industrieller Prozesssteuerung und Fertigungslogistik (Schischke et al., 2009).

Ein großer Anteil des Energieverbrauchs in der Industrie entfällt wiederum auf Antriebe (Motoren, Pumpen und Kompressoren) von Maschinen sowie in der Automatisierungstechnik. Der Energieverbrauch dieser Komponenten beträgt rund 165 TWh bzw. 25 % des Energieverbrauchs in der Industrie. Durch den Einsatz von Informations- und Kommunikationstechnik in diesem Bereich ließe sich nicht eine erhebliche Menge an Energie einsparen, sondern auch Fertigungsabläufe und Maschinennutzungen in der industriellen Produktion effizienter, ausfallssicherer und umweltfreundlicher gestalten. Die Einsparpotenziale für solche Smart Motors sind dort besonders groß, wo Maschinen, Antriebe und Aggregate kontinuierlich aber mit wechselnder Belastung laufen. Dies gilt z. B. für elektrische Antriebe in der Automatisierungstechnik oder auch Kompressoren und Pumpen (siehe Schischke et al., 2009). Folgende Beispiele belegen dieses Potenzial:

- Allein bei Elektromotoren bis 10 kW Leistung ließe sich durch eine effizientere Motorentechnik und ein lastabhängiges Powermanagement (umfasst z. B. das Abschalten von Motoren oder auch die Regelung der Drehzahl, siehe nächster Abschnitt) bis zu 30 % Energie einsparen (VDE, 2008). Diese Motoren werden in einer Größenordnung von mehreren hunderttausend in Deutschland produziert und in der in- sowie ausländischen Industrie eingesetzt (Schischke et al., 2009).
- In produzierenden Unternehmen in Deutschland sind rund 62.000 Druckluftanlagen im Einsatz, die mit elektrischen Motoren betrieben werden. Durch eine Echtzeitüberwachung und – Regelung von Druckluftanlagen (Nenndruck, Durchfluss, elektrische Leistung der Kompressoren, etc.), können die Energiekosten, die über den gesamten Lebenszyklus 70 bis 80 % der Gesamtkosten der Anlage ausmachen, um bis 45 % reduziert werden (Dena, 2009). Allein durch die Nutzung drehzahlvariabler Antriebe und einer effizienten Steuerung, kann die Effizienz der Druckluftanlagen um 6 % verbessert werden.
- Durch den Einsatz von Frequenzumrichterantrieben im Pumpen- und Lüfterbereich, die es erlauben die Motorendrehzahl an die tatsächliche Anforderung (Temperatur und Auslastung) anzupassen, können ca. 40 % des Strombedarfs eingespart werden. Würden 50 % aller entsprechenden Anlagen in Deutschland mit Frequenzumrichterantrieben ausgerüstet, so ließen sich alleine durch diese Maßnahme bis zum Jahr 2015 15,1 Mt CO₂e einsparen (BCG, 2009).

In der Studie Smart 2020 werden neben den Frequenzumrichterantrieben die weiteren Felder der industriellen Systemautomatisierung und der Betriebsoptimierung von Kraftwerken für den Einsatz intelligenter Antriebe genannt.

Während das Feld der industriellen Systemautomatisierung vor allem Optimierung und Automatisierung von industriellen Prozessen, z. B. durch Prozessleitsysteme umfasst, so wird unter der Betriebs-

optimierung von Kraftwerken die Effizienzsteigerung der Energieversorgung durch eine verbesserte Betriebsführung und den damit erzielten effizienteren Einsatz von Brennstoffen verstanden.

Das gesamte Einsparpotenzial für Smart Motors in den Feldern Frequenzumrichterantriebe, industrielle Systemautomatisierung und Betriebsoptimierung von Kraftwerken wird in Deutschland bis zum Jahr 2020 auf 42 TWh bzw. 26,4 Mt CO₂e geschätzt (BCG, 2009).

Von besonderer Bedeutung ist dieses Feld auch aufgrund der starken Stellung der deutschen Industrie, insbesondere des Maschinen- und Anlagenbaus sowie einer hochspezialisierten informations- und kommunikationstechnischen Industrie in Deutschland, die Zulieferer von Schlüsseltechnologien, z. B. Sensorik, Aktorik und Software ist.

Die im Bereich intelligenter Motoren und Antriebe realisierbaren Innovationen kommen außerdem nicht nur Deutschland, sondern aufgrund der starken Exportorientierung dieser Industrie auch ausländischen Abnehmern zugute. Viele der genannten Innovationen beginnen sich, aufgrund steigender Energiekosten, bereits am Markt durchzusetzen. Da sich die Mehrheit der Innovationen im Bereich Smart Motors auf eine Effizienzsteigerung spezifischer Aggregate in signifikanter Größenordnung bezieht, ist eine Überkompensation der erzielten Effizienzgewinne nach derzeitigem Kenntnisstand nicht zu erwarten. Sie kann jedoch dann zum Tragen kommen, wenn intelligente Antriebe in erster Linie zu einer Erhöhung des Automatisierungsgrades und der Kapazitätssteigerung im Rahmen einer industriellen Systemautomatisierung genutzt werden.

5.6 Zwischenfazit

Die Potenzialabschätzungen in den genannten Feldern und die Möglichkeiten ihrer Realisierbarkeit weisen deutliche Unterschiede auf. Während in den Feldern Smart Building und Smart Industry/ Smart Motors verhältnismäßig große Potenziale der Emissionsminderung und des Ressourcenverbrauchs mit begrenzten Maßnahmen innerhalb der nächsten Jahre erschlossen werden können, ist die Realisierung der Potenziale in den Feldern Smart Mobility/ Smart Logistics und Dematerialisierung mit größeren Unsicherheiten verbunden. Hier gilt es noch, verstärkt Abschätzungen über die zu erwartenden Nutzungs- und Anwendungssysteme einzelner Produkte und Dienstleistungen zu erstellen um das Risiko von Reboundeffekten zu verringern.

Von großer Bedeutung für Deutschland aber auch großer Komplexität ist das Feld Smart Grid. In ihm können große theoretische Potenziale zur Minderung des Ressourcenverbrauchs mobilisiert werden, allerdings sind die dafür zu schaffenden Rahmenbedingungen nicht konfliktfrei und bedürfen einer langfristigen Zielsetzung und Umsetzung.

6 Bedeutung Seltener Erden und Metalle

6.1 Überblick

Die Innovations- und Wachstumsdynamik der Informations- und Kommunikationstechniken schlägt sich im Rohstoffverbrauch nieder. Mit dem Marktwachstum der Informations- und Kommunikationstechnik steigt die Rohstoffnachfrage mengenmäßig. 2008 wurden 625 Tonnen Silber in PCs, Laptops und Mobiltelefonen weltweit verbaut. Dies entspricht einem Anteil von 3 % der Weltminenproduktion von Silber. Bei Gold betrug der Anteil 4 %, bei Palladium 16 % und bei Cobalt 23 %. Hinzu kommt, dass die Produkte immer komplexer werden. Bestanden in den 1980er Jahren die Mikrochips aus 12 Elementen, waren es in den 90er Jahren 16 Elemente. Heute sind es rund 57 Elemente, aus denen Mikrochips bestehen¹³. Mobiltelefone setzen sich aus über 60 Elementen zusammen. Edelmetalle, Seltene Erden und andere Elemente sind entscheidend für die Funktionalität.

Tabelle 8: Materialbestand eines durchschnittlichen Telefons

Material	Gewicht %	Material	Gewicht %
Silizium	24,8	Bismut	0,006
Kunststoff	22,9	Chrom	0,006
Eisen	20,5	Quecksilber	0,002
Aluminium	14,1	Germanium	0,0016
Kupfer	6,9	Gold	0,0016
Blei	6,2	Indium	0,0016
Zink	2,2	Ruthenium	0,0016
Zinn	1,0	Selen	0,0016
Nickel	0,9	Arsen	0,0013
Barium	0,03	Gallium	0,0013
Mangan	0,03	Palladium	0,0003
Silber	0,01	Europium	0,0002
Beryllium	0,01	Niob	0,0002
Tantal	0,01	Vanadium	0,0002
Titan	0,01	Yttrium	0,0002
Antimon	0,009	Platin	In Spuren
Cadmium	0,009	Rhodium	In Spuren
		Terbium	In Spuren

Quelle: Bardt 2012.

Angesichts der ungebrochenen Wachstumsdynamik wird in Zukunft der Bedarf an diesen Technologiemetallen weiter zunehmen. Eine Studie des Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung (ISI) sowie des Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung (IZT) hat den Rohstoffbedarf für IKT analysiert (Angerer et al., 2009). Dazu wurden Rohstoffe, die aus wirtschaftlichen

¹³ National Research Council, US, 2007, S. 38

Gründen sowie aufgrund ihrer Reichweite bedeutsam für die Versorgung der Industrie sind, ausgewählt.

Demzufolge entwickelt sich der Rohstoffbedarf der IKT weltweit wie folgt:

Tabelle 9: Rohstoffbedarfe der IKT-Industrie (Auswahl)

Zinn		
Anwendung in der IKT-Industrie:	Rohstoffbedarf 2006 [t]	Rohstoffbedarf 2030 [t]
Bleifreie Lote	188.300	232.900
Kondensatoren	105	444
Weitere Anwendungen: z. B. Weißblech, Chemikalien, Legierungen, Glas und ITO (Indium Tin Oxid)-Gläser		
Jahresproduktion 2006: 302.000 t	Reserven: 6,1 Mio. t	Reservebasis: 11 Mio. t
Silber		
Anwendung in der IKT-Industrie:	Rohstoffbedarf 2006 [t]	Rohstoffbedarf 2030 [t]
Bleifreie Lote	5.100	9.300
RFID	1,05	5.670
Mikroelek. Kondensatoren	210	518
Displays (OLED)	0	28
Weitere Anwendungen: z. B. Schmuck und Silberwaren, Photographie, Elektrik/Elektronik, Hartlegierungen, Photovoltaik		
Jahresproduktion 2006: 20.200 t	Reserven: 270.000 t	Reservebasis: 570.000 t
Indium		
Anwendung in der IKT-Industrie:	Rohstoffbedarf 2006 [t]	Rohstoffbedarf 2030 [t]
Display (LCD, u.a.)	230	1.580
Weiß LED	3	46
Weitere Anwendungen: z. B. Dünnschicht-Photovoltaik		
Jahresproduktion 2006: 510 t	Reserven: 2.800 Mio. t	Reservebasis: k.A., stark abhängig von Zinkförderung
Gallium		
Anwendung in der IKT-Industrie:	Rohstoffbedarf 2006 [t]	Rohstoffbedarf 2030 [t]
Weiß LED	9	143
Hochleistungs-Mikrochip	18	209
Weitere Anwendungen: z. B. Dünnschicht-Photovoltaik		
Jahresproduktion 2006: 99 t	Reserven: k.A., stark abhängig von Zink- und Bauxitförderung	Reservebasis: 1 Mio. t
Germanium		
Anwendung in der IKT-Industrie:	Rohstoffbedarf 2006 [t]	Rohstoffbedarf 2030 [t]

Glasfaserkabel	28	220
Weitere Anwendungen: z. B. Infrarot-Detektoren, Photovoltaik, Kondensatoren, Katalysatoren		
Jahresproduktion 2006: 90 t	Reserven: 450.000 t	Reservebasis: k.A., stark abhängig von Zinkförderung
Tantal		
Anwendung in der IKT-Industrie:	Rohstoffbedarf 2006 [t]	Rohstoffbedarf 2030 [t]
Mikroelek. Kondensatoren	551	1.410
Weitere Anwendungen: z. B. hochfeste und korrosionsfreie Stähle, Hochtemperaturanwendungen, Optiken		
Jahresproduktion 2006: 1.390 t	Reserven: > 43.000 t	Reservebasis: k.A.,
Niob		
Anwendung in der IKT-Industrie:	Rohstoffbedarf 2006 [t]	Rohstoffbedarf 2030 [t]
Mikroelek. Kondensatoren	288	1.410
Weitere Anwendungen: z. B. hochfeste und leichte Stähle, Hochtemperaturanwendungen, Optiken, Medizintechnik		
Jahresproduktion 2006: 44.500 t	Reserven: 4.400.000 t	Reservebasis: k.A.,

Quelle: Umweltbundesamt 2009, aktualisiert.

Die Entwicklung der Rohstoffnachfrage verläuft so dynamisch, dass bei einigen Rohstoffen bis 2030 das Niveau der heutigen Weltproduktion erreicht wird. In der folgenden Tabelle sind solche Rohstoffe aufgeführt, deren weltweite Nachfrage durch IKT bis 2030 voraussichtlich mindestens 50 % bzw. 100 % der heutigen Nachfrage ausmachen wird. Besonders sensitiv sind Gallium (Ga), Hafnium (Hf), Germanium (Ge), Erbium (Er), Promethium (Pm) und Rubidium (Rb). Bei diesen Elementen wird gemäß der Projektionen von IZT/adelphi der Rohstoffbedarf im Jahr 2030 die heutige Weltproduktion erreichen.

Tabelle 10: Rohstoffbedarfe der IKT bis 2030 im Verhältnis zur heutigen Weltproduktion

Bereiche	Schlüsseltechnologien	Rohstoffbedarfe 2030/Produktion 2008	
		intensiv > 50 %	sensitiv > 100 %
Embedded Systems	Sensorik, Mikroelektronik	Ag, Be, Bi, Cu, Diamant, Ge, Glimmer, Graphit, Sn, Ta, Te	Ga, Hf
Kommunikations- infrastrukturen	Glasfaser Satellitenkommunikation		Ge, Er Pm, Rb

Quelle: Angerer et al. 2009; Erdmann, Behrendt, Feil 2011.

Für eine Bewertung der langfristigen Verfügbarkeit der Rohstoffe in der IKT-Industrie sind zusätzliche Faktoren wie Länder-, Markt- und Strukturrisiken entscheidend. Länderrisiken resultieren aus der

Abhängigkeit von wenigen Ländern, wenn die Rohstoffversorgung durch schlechte Governance oder durch strategische Rohstoffpolitik erschwert wird. Marktrisiken der Rohstoffversorgung (Preis- und Lieferrisiken) können ihren Ursprung beispielsweise in großer Marktmacht weniger Unternehmen oder in beschränkten ökonomisch gewinnbaren Vorräten haben. Zu den Strukturrisiken gehören physikalisch-technische Restriktionen der Rohstoffgewinnung. Sie werden gemessen als Anteil der globalen Gewinnung eines Rohstoffs als Haupt- bzw. Nebenprodukt und als Recyclingfähigkeit. Eine vom Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung und adelphi im Auftrag der Kreditanstalt für Wiederaufbau erstellte Studie mit dem Titel „Kritische Rohstoffe für Deutschland“ untersuchte umfassend die Risiken der Versorgung Deutschlands mit mineralischen Rohstoffen (Metalle, Industriemineralien, Steine und Erden) unter Berücksichtigung der weltweit steigenden Nachfrage durch Zukunftstechnologien (Erdmann, Behrendt, Feil, 2011). Die identifizierten kritischen Rohstoffe, die überwiegend den seltenen Metallen zuzuordnen sind, sind für viele Zukunftstechnologien von herausragender Bedeutung. Zu den „sehr kritischen“ Rohstoffen zählen Germanium, Rhenium und Antimon, zu den „kritischen“ Indium, Wolfram, Seltene Erden, Gallium, Palladium, Silber, Zinn, Niob, Chrom und Bismut. Vor diesem Hintergrund sind die Rohstoffe Gallium, Germanium, Antimon, Zinn sowie Indium für die IKT besonders kritisch zu bewerten. Ihre Anwendung ist für die IKT-Industrie und viele neue Schlüsseltechnologien essentiell, da sie schwer oder gar nicht zu substituieren sind.

Germanium

Germanium hat seine Hauptanwendungsgebiete in den Bereichen der Glasfasertechnik, und Infraroptik. Der Germanium-Bedarf ist aufgrund des Ausbaus des Glasfasernetzes sowie der verstärkten Nachfrage von Infrarotdetektoren stark angestiegen. Insbesondere durch den weiteren geplanten Ausbau von Breitbandnetzen für Internet, Telekommunikation etc. sind weitere Verbrauchssteigerungen zu erwarten. Es ist wahrscheinlich, dass die Germaniumpreise mittelfristig ansteigen – auch wenn kurzfristige Senkungen möglich sind. Hohe Preise begünstigen auch das Recycling von Germanium, das aber aufgrund geringer Germanium-Gehalte und teilweise auch Materialvielfalt erschwert ist.

Antimon

Antimon wird vorwiegend als Synergist halogenhaltiger Flammschutzmittel in Kunststoffen und zur Härtung von Bleikomponenten in Starterbatterien eingesetzt. In Deutschland ist insbesondere die kunststoffverarbeitende Industrie abhängig von einer gesicherten Antimonversorgung aus dem Ausland und hier insbesondere von China, während es für Starterbatterien und das darin enthaltene Antimon eine funktionierende Kreislaufwirtschaft gibt. Es gibt vor allem einen kurz- bis mittelfristigen Bedarf zur Sicherung der Antimonversorgung.

Indium

Indium, ebenfalls ein extrem knapper Rohstoff, wird als Koppelprodukt von Zink gewonnen. Die Verwendung von Indium wird durch Dünnschichtanwendungen, insbesondere transparente Elektroden für Displays, dominiert. Indium ist sowohl hinsichtlich der bekannten Reserven als auch in Bezug auf

die Produktionsmengen, die stark von der Zinkförderung in wenigen Abbaugebieten (China 48 %, Südkorea 17 %, Japan 10 %, Kanada 10 %) abhängt, ein limitierter Rohstoff. Seine Anwendung in Displays stellt bisher eine schwer substituierbare Anwendung dar. Insgesamt scheint sich das Angebot von primärem Indium bis zu einer gewissen Grenze relativ gut an die Nachfrage anpassen zu lassen. Kurzfristig ist mit erhöhter Preisvolatilität zu rechnen, mittel- und langfristig sind Angebotslücken zu erwarten.

Gallium

Gallium wird großteils für die Herstellung von Halbleitermaterialien in der elektrischen und elektronischen Industrie verwendet (für integrierte Schaltkreise, Beleuchtung und Photovoltaik). Daneben wird es als Flüssigmetall-Wärmeleitpaste in PCs eingesetzt. Galliumantimonid ist Grundstoff für die Produktion optoelektronischer Komponenten. Kurzfristig ist mit erhöhter Preisvolatilität zu rechnen, mittel- und langfristig sind Angebotslücken möglich.

Silber

Silber wird in elektrischen Kontakten eingesetzt. Der Anteil beträgt rund 20 % am weltweiten Gesamtverbrauch. 1,1 % des Silbers wird in Plasmabildschirmen verbaut. In mobilen Informations- und Kommunikationsgeräten sind Silber-Zink-Akkumulatoren bedeutsam. Silberbasierte Leitpasten in RFID-Tags machen 0,3 % aus. Dem Markt für RFID wird eine dynamische Entwicklung prognostiziert, so dass im Jahr 2030 der jährliche Verbrauch von 1,05 Tonnen im Jahr 2006 auf 5670 Tonnen im Jahr 2030 ansteigen könnte. Angesichts einer Weltproduktion von 20.200 Tonnen Silber im Jahr 2006 könnte ein wichtiges zusätzliches Nachfragesegment entstehen (Angerer et al. 2009).

Zinn

Der globale Zinnbedarf wird durch das Weltwirtschaftswachstum und durch den Bedarf nach bleifreien Loten getrieben. Allein durch die Umstellung auf bleifreie Lote wächst der Zinnbedarf um 20 %. Für zukünftige Nutzungen von Zinn ist Indium-Zinn-Oxid (ITO) bedeutsam für die Displaytechnik. Der Effekt auf die Nachfrage von Zinn ist allerdings mengenmäßig vernachlässigbar (Angerer et al. 2009). Die Substituierbarkeit von Zinn ist begrenzt. Der Reserven-zu-Produktionsindex ist mit 19 Jahren sehr gering.

Seltene Erden

Seltene Erden werden in der IKT in Flüssigkristallen und Plasma-Bildschirmen eingesetzt. Ein weiteres Anwendungsgebiet sind Positionierungssysteme für Schreib- und Leseköpfe in Festplatten und Lautsprecher in Mobiltelefonen. Der Neodym-Gehalt eines Computers liegt zwischen 4 und 8 g (Kuchta, 2012). Bei Mobiltelefonen schwankt der Neodym-Gehalt zwischen 15 und 115 mg. Das Hauptrisiko bei Seltenen Erden ist derzeit die hohe Abhängigkeit von China. 95 % der Seltenen Erden stammen von dort. Seit 2010 limitiert China den Export von Seltenen Erden. Die Angebotssituation ist deshalb prekär, sie wird sich aber zumindest bei der Cer-Gruppe mittelfristig voraussichtlich deutlich ent-

spannen. Die Reserven von Seltenen Erden liegen bei 88.000.000 Tonnen, die Reservebasis bei 150.000.000 Tonnen. Damit sind die Reserven und Ressourcen bei einer weltweiten Förderung von 124.000 Tonnen (im Jahr 2009) insgesamt relativ hoch (Angerer et al., 2009). Aufgrund der hohen Nachfrage sind weltweit Minenprojekte zur Förderung Seltener Erden geplant. Trotzdem sind Engpässe bei der Rohstoffversorgung bei Elementen der Yttrium-Gruppe langfristig wahrscheinlich. Dauerhaft anhaltende Angebotslücken sind u. a. bei Terbium und Dysprosium nicht ausgeschlossen.

Für den Anstieg des Verbrauchs seltener Metalle sowie die Vielfalt der genutzten Elemente sind mehrere Effekte verantwortlich. Zum einen werden durch Technologiewechsel, wie z. B. die Substitution von Röhrenbildschirmen (CRT-(Cathode Ray Tube) Displays) durch Flachbildschirme (LCD-Liquid Crystal Displays) innerhalb kurzer Zeiträume große Mengen neuer Rohstoffe wie z. B. Indium benötigt. Das stärkste Wachstum haben mobile Geräte zu verzeichnen. Nach Bitkom steigt die Nachfrage nach Tablet-Computern 2012 gegenüber dem Vorjahr um 29 % und damit auf 2,7 Mio. Geräte. Somit wächst auch der Stoffstrom seltener Metalle. Zum anderen erfordert die kontinuierliche Leistungssteigerung und Miniaturisierung in der Mikroelektronik den Einsatz seltener Metalle (Umweltbundesamt, 2009). Beispielsweise ist der Bedarf an den Metallen Tantal und Niob in den vergangenen Jahren deutlich angestiegen, da sie ein wichtiges Element für die Herstellung von mikroelektronischen Kondensatoren sind, die in Mobiltelefonen zum Einsatz kommen. Galliumarsenid stellt ein bevorzugtes Material für die Herstellung von Hochleistungsmikrochips dar. Der Verbrauch seltener Metalle wird auch aus diesen Gründen weiter steigen. Angesichts der Wachstumsdynamik des IKT-Marktes ist deshalb allenfalls mit einer relativen Entkopplung des Ressourcenverbrauchs vom Marktwachstum zu rechnen.

6.2 Umweltrelevanz

Seltene Metalle sind Metalle mit vergleichsweise geringvolumigen anthropogenen Stoffflüssen. Trotz geringer Produktionsmengen haben sie teilweise eine hohe Umweltrelevanz, insbesondere die Edelmetalle. So ist die globale Primärproduktion von Gold mit einem Treibhausgaspotenzial in der Größenordnung der Kupferproduktion und einem Versauerungspotenzial in der Größenordnung der Zinkproduktion verbunden. Die globale Primärproduktion von Silber verursacht Emissionen mit einem Humantoxizitätspotenzial, das größer als das der Nickelproduktion und nur etwas geringer als das der Zinkproduktion ist. Die Platingruppenmetalle weisen global ein Versauerungspotenzial nahezu in Höhe der Roheisenproduktion auf, obwohl die Jahresproduktion mit rund 500 t nur einen Bruchteil der 940.000.000 t Roheisen beträgt. Auch die Abfallentstehung erreicht fast ein Viertel der Roheisenproduktion. Der Abbau der Seltenen Erden ist mit erheblichen Umweltbelastungen verbunden. Mit Fluoriden und Schwermetallen belastete Säuren werden in Schlammbecken abgelagert. Viele Lagerstätten enthalten radioaktive Mineralien, die mit den Produktionsrückständen deponiert werden. Die ökologischen Effekte anderer seltener Metalle sind am Ort der Rohstoffgewinnung von vergleichsweise geringer Bedeutung, nicht zuletzt auch deshalb, weil viele in Kuppelproduktion gewonnen werden und ihre ökologischen Auswirkungen i.d.R. den jeweiligen Massenmetallen zugeordnet werden.

Tabelle 11: Übersicht zu Umweltwirkungen der Primärproduktion von ausgewählten Metallen (global, 2008)

Metallgruppe	Metall	Weltproduk- tion	AP	GWP 100a	HTP100a	Deponie & Versatz
		t	t SO ₂ -eq.	t CO ₂ -eq.	t 1,4-DCB- eq.	t Abfall
Basismetalle	Aluminium	38000000	2,1E+06	4,4E+08	2,0E+09	7,2E+07
	Blei	3550000	1,7E+05	7,6E+06	1,1E+06	4,8E+05
	Eisen	940000000	5,4E+06	1,5E+09	3,9E+08	4,3E+07
	Kupfer	15600000	7,5E+06	5,5E+07	6,9E+09	3,2E+07
	Nickel	1660000	1,0E+07	1,1E+07	1,1E+07	1,5E+07
	Zink	10500000	4,6E+05	3,6E+07	6,1E+07	2,8E+06
	Zinn	300000	1,3E+05	5,1E+06	1,4E+06	1,5E+05
Legierungsmetalle	Arsen	59000	3,9E+03	4,2E+05	1,9E+05	1,0E+05
	Chrom	20000000	2,0E+06	5,3E+08	1,9E+09	7,1E+07
	Kobalt	62300	6,0E+03	5,5E+05	2,5E+05	7,6E+04
	Niob	45000	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
Edelmetalle	Silber	20500	6,0E+04	4,6E+05	5,5E+07	2,6E+05
	Gold	2500	4,8E+05	4,7E+07	4,0E+07	2,3E+06
	PGM	478	5,3E+06	6,2E+06	6,0E+06	7,9E+06
Seltene Erden	Cer	19500	8,4E+02	1,5E+05	7,9E+04	2,1E+04
	Lanthan	10200	4,9E+02	8,7E+04	4,7E+04	1,3E+04
	Neodym	6000	1,2E+03	2,1E+05	1,2E+05	3,2E+04
	Praseodym	2500	5,3E+02	9,2E+04	5,4E+04	1,4E+04
Sonstige seltene Metalle	Cadmium	19900	8,9E+01	1,7E+04	9,7E+03	2,7E+03
	Gallium	80	3,9E+01	1,5E+04	2,8E+03	1,2E+03
	Germanium	100	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
	Indium	510	9,8E+02	7,9E+04	1,3E+05	5,9E+03
	Lithium	25000	2,3E+03	4,7E+05	8,1E+04	5,3E+04
	Selen	1540	1,3E+02	4,3E+03	2,3E+03	9,3E+02
	Tantal	1400	2,8E+03	4,0E+05	2,3E+05	6,9E+04
	Tellur	135	3,6E+01	1,0E+03	2,9E+04	1,6E+02

Anmerkungen: AP – Versauerungspotenzial als SO₂-Äquivalente, GWP – Treibhausgaspotenzial als CO₂-Äquivalente bezogen auf 100 Jahre, HTP - Humantoxizitätspotenzial als 1,4-Dichlorbenzol-Äquivalente, Deponie

und Versatz als nicht besonders überwachungsbedürftiger Abfall („bulk waste“)
Quellen: ecoinvent v 2.1, Scharp 2008, USGS 2008

6.3 Recycling seltener Metalle

Aufgrund der steigenden Nachfrage nach Funktionsmaterialien bei gleichzeitiger Verknappung der Ressourcen und Zunahme des Umweltaufwands wächst der Bedarf an hocheffizienten und wirtschaftlichen Nutzungs-, Rückführungs- und Recyclinglösungen. Auch wenn in jedem einzelnen Produkt nur kleinste Mengen an Rohstoffen verbaut sind, ist der gesamte Rohstoffeinsatz beträchtlich. So steckt in 41 Mobiltelefonen ein Gramm Gold. Dafür müsste bei der Primärgewinnung 1 Tonne Erz bewegt werden. Viele Rohstoffe gehen aber bisher vor allem nach der Nutzung der Produkte verloren. Der monetäre Anreiz für die Erfassung, Vorbehandlung und Raffination ist die Wiedergewinnung der Edelmetalle (Kupfer, Silber, Gold, Platingruppenmetalle), wobei dann auch noch weitere Inhaltsstoffe wie Gallium, Indium, Antimon oder Tellur wiedergewonnen werden können. Solche Wertschöpfungskonstellationen gelingen jedoch nur vereinzelt für einige Abfallfraktionen. Der Schwerpunkt der staatlichen Ressourcen- und Umweltpolitik lag in den letzten beiden Jahrzehnten vorwiegend auf der Vermeidung bzw. Minimierung des Einsatzes umweltgefährdender Stoffe und der Erhöhung der Ressourcenproduktivität von Massenwerkstoffen wie z. B. Kupfer oder Kunststoffen. Auch die untergesetzlichen Regelwerke zum Kreislaufwirtschaftsgesetz, wie z. B. das Altautogesetz und das Elektroaltgerätegesetz, begünstigen mit ihren Mengenquoten für die Sammlung und Verwertung indirekt die Kreislaufführung von Massenwerkstoffen. Ein Defizit liegt bei der Erfassung und Rückführung von Kleingeräten. 2009 fielen weltweit ca. 80 000 t Alt-Mobiltelefone an, davon wurden weniger als 2 000 t recycelt¹⁴. Zwar konnte seit Einführung der WEEE und des ElektroG in Deutschland die erfasste Menge des IKT-Schrotts gesteigert werden. Kleingeräte werden aber auch hierzulande kaum erfasst. Laut einer Umfrage von BITKOM 2011 lagern derzeit 82 Mio. Altmobiltelefone in Schubladen. Immer noch wird ein nicht unerheblicher Teil der Kleingeräte über die Mülltonne entsorgt. Außerdem gehen elektrische und elektronische Geräte der deutschen Sekundärrohstoffwirtschaft in hohem Maße durch Exporte verloren, darunter 50.000 Tonnen PCs und TV-Geräte (Umweltbundesamt, 2010). Hinzu kommt, dass die Rückgewinnung in den Importländern oft mit erheblichen Umweltbeeinträchtigungen verbunden ist (Hagelücken, 2012). China und Südafrika müssen im Vergleich zu 2007 bis zum Jahr 2020 mit einer Vervierfachung des Elektronikschrotts aus den Industrieländern rechnen. Bislang werden diese Schrottmengen nur selten fachgerecht behandelt. Andererseits kommt es zu einem stetigen Verlust von Wertstoffen. Zum Beispiel liegt die Goldausbeute in Entwicklungsländern nur bei rund 25 %, für Palladium noch deutlich darunter, Sondermetalle gehen komplett verloren. Es sind deshalb flächendeckende globale Rücknahme- und Sammlungsstrukturen erforderlich, die eine Rückführung der sekundären Rohstoffe ermöglichen (Buchert, 2009). Schlüsselement einer Intensivierung der Rückführung seltener Metalle ist das Zusammenspiel von demontagegerechter Konstruktion, Erfassung und Aufbereitungsverfahren.

¹⁴ <http://dipbt.bundestag.de/dip21/btd/17/088/1708899.pdf>

6.4 Zwischenfazit

Die Ausführungen zeigen, dass die Innovations- und Wachstumsdynamik der Informations- und Kommunikationstechniken sich nicht nur im Energieverbrauch, sondern auch im Materialeinsatz und dem damit verbundenen Rohstoffverbrauch niederschlägt. Der IKT-bedingte Material- und Rohstoffverbrauch ist erheblich und wird ebenso wie Fragen des „End-of-life-Managements“ (Rücknahme, Recycling etc.) weiter an Bedeutung gewinnen, dies gilt insbesondere mit Blick auf seltene Erden und Metalle, deren Gewinnung mit erheblichen Umweltbelastungen verbunden sind. Handlungsbedarf besteht insbesondere im Bereich des IKT-Recycling von Kleingeräten wie Mobiltelefonen. Es sind deshalb flächendeckende globale Rücknahme- und Sammlungsstrukturen erforderlich, die eine Rückführung der sekundären Rohstoffe ermöglichen. Schlüsselement einer Intensivierung der Rückführung seltener Metalle ist das Zusammenspiel von demontagegerechter Konstruktion, Erfassung und Aufbereitungsverfahren.

7 Künftige Entwicklung: Szenarien und Prognosen

7.1 Green in der IT

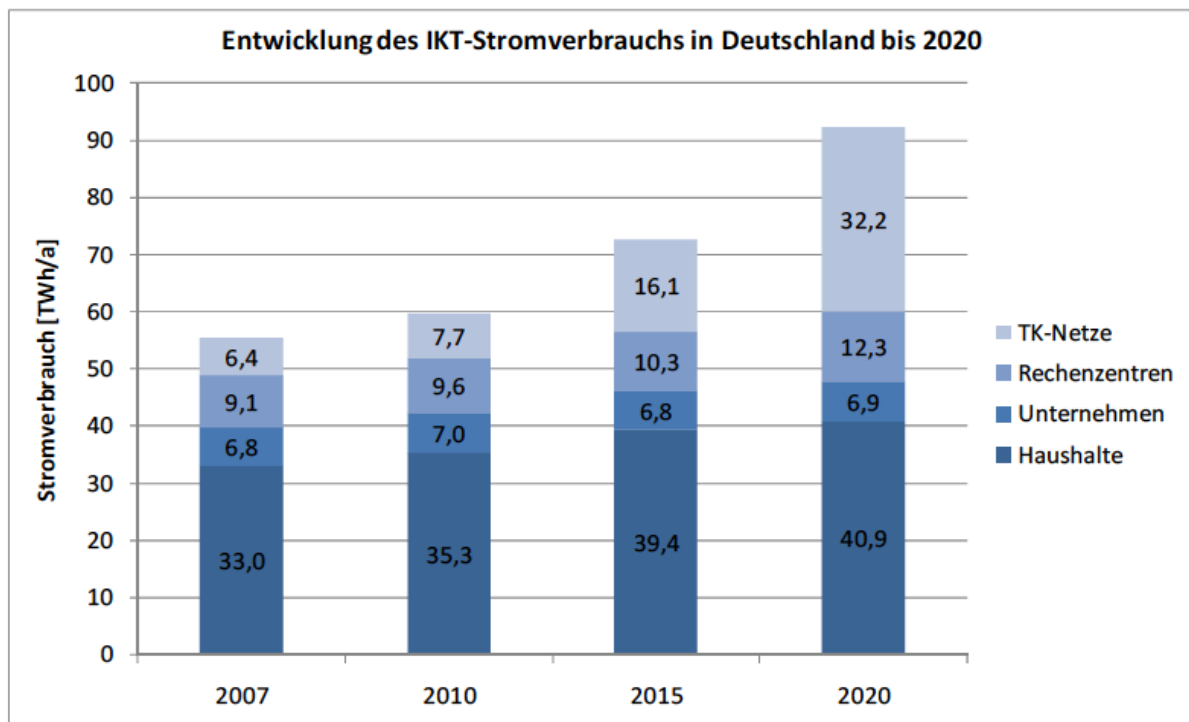
7.1.1 Stromverbrauch durch IKT in Deutschland

Mit Blick auf den Stromverbrauch der IKT ist in Deutschland in den kommenden Jahren mit einem weiteren deutlichen Wachstum zu rechnen. Nach einer Prognose von Fraunhofer IZM /ISI aus dem Jahr 2009 wird der Stromverbrauch, der durch Endgeräte, Server und Rechenzentren sowie die Netze verursacht wird, von 55,4 TWh in 2007 bzw. 59,6 TWh in 2010 auf 67 TWh in 2020 ansteigen. Das entspricht einem Anstieg von rund 20 %. Dabei verläuft die Entwicklung in den einzelnen Sektoren unterschiedlich. Während für die Endgeräte in den privaten Haushalten und die Rechenzentren ein weiterer Anstieg des Strombedarfs erwartet wird, bleibt der Verbrauch für Endgeräte in Unternehmen und für den Bereich Netzzugang und Kernnetz demnach etwa konstant (Fraunhofer IZM/ISI, 2009, 86). Nach einer aktualisierten Berechnung des Fraunhofer IZM aus dem Jahr 2010, wird der Stromverbrauch voraussichtlich sogar noch schneller wachsen. Hier wird von einem Gesamtstromverbrauch der IKT in 2020 von über 90 TWh ausgegangen (Stobbe et. al., 2010, 2).

Im Gegensatz zu der Prognose aus dem Jahr 2009 wird bei der aktualisierten Berechnung von einem deutlichen Anstieg des Stromverbrauchs der Telekommunikationsnetze ausgegangen. Während ursprünglich von einem ungefähr gleichbleibenden Stromverbrauch der Netze in Höhe von rund 6,5 TWh ausgegangen worden war (Fraunhofer IZM/ISI, 2009, 86), wird in der aktuelleren Berechnung von einem Anstieg auf 16,1 TWh im Jahr 2015 und auf 32,2 TWh im Jahr 2020 ausgegangen (Stobbe et al., 2010, 2). Angesichts der in Kapitel 3 beschriebenen Trends bei den IKT-Netzen (Zunahme Breitbandzugänge, Ausbau funkbasierter Netzinfrastruktur, Cloud Computing etc.) und der Nutzung von IKT (Zunahme Audio- und Video-Daten, Interaktivität und Personalisierung von digitalen Dienstleistungen usw.) erscheint die aktualisierte Berechnung des voraussichtlichen Strombedarfs der IKT-Netze bis 2020 plausibel.

Vor diesem Hintergrund erscheint es wahrscheinlich, dass es ohne zusätzliche erhebliche Anstrengungen zur Steigerung der Energieeffizienz der IKT zu einem weiteren rasanten Anstieg des IKT-bedingten Stromverbrauchs in Deutschland bis zum Jahr 2020 kommen wird. Mit Blick auf die aktuellen IKT-Trends erscheint ein Zuwachs des Stromverbrauchs von 59,6 TWh in 2010 auf über 90 TWh in 2020 möglich. Damit würde der Stromverbrauch der IKT bis 2020 um weitere 50 % ansteigen und der Anteil des durch IKT verursachten Stromverbrauchs am Gesamtstromverbrauch in Deutschland könnte bis 2020 auf fast 20 % zunehmen.

Abbildung 12: Prognose der Entwicklung des Energieverbrauchs der IKT in Deutschland von 2007 bis 2020



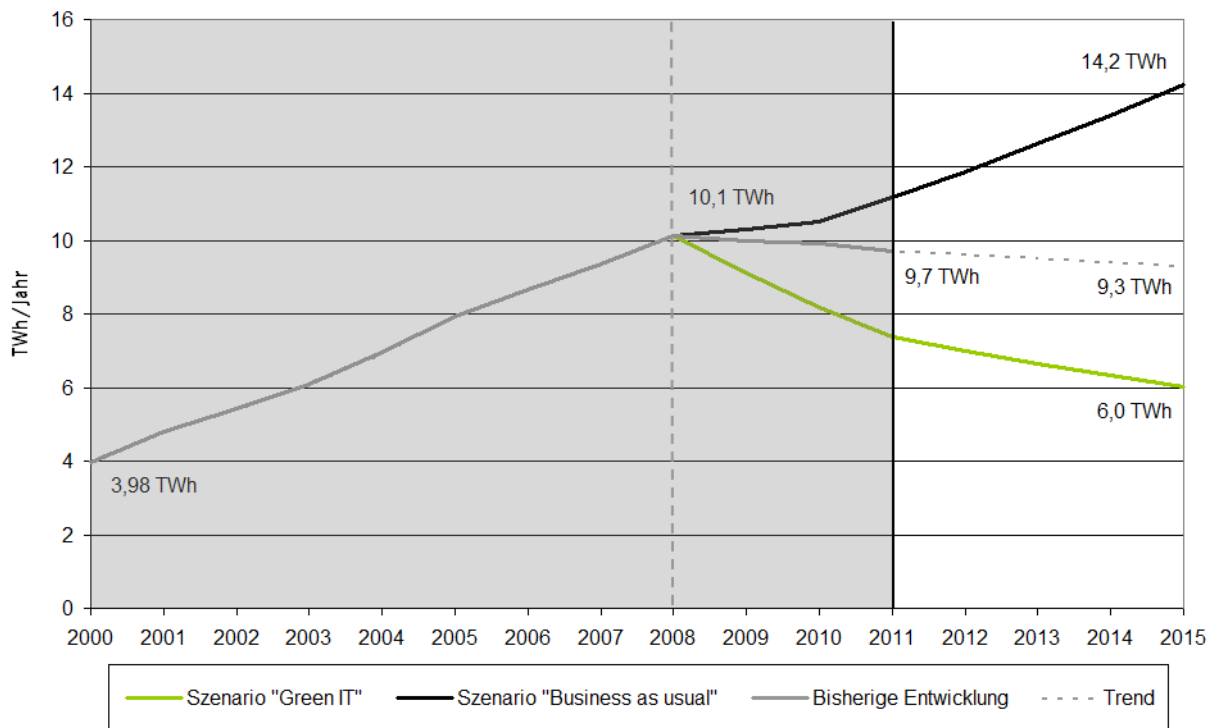
Quelle: Stobbe et al., 2010, 2.

7.1.2 Rechenzentren

Nach einer Berechnung des Borderstep Instituts lag der Stromverbrauch von Servern und Rechenzentren in Deutschland im Jahr 2011 bei 9,7 Terawattstunden (TWh). Damit liegt er um ca. 4 % unter dem Strombedarf des Jahres 2008 – und dies trotz steigender Zahl der installierten Server. Die Gründe hierfür wurden in Kapitel 4.2 diskutiert. Der Stromverbrauch entsprach im Jahr 2008 einem Anteil von 1,8 % am Gesamtstromverbrauch in Deutschland. Es sind ca. vier mittelgroße Kohlekraftwerke notwendig, um diese Strommenge zu erzeugen. Die Daten zeigen, dass es in den vergangenen Jahren gelungen ist, den Trend des ansteigenden Stromverbrauchs der Server und Rechenzentren in Deutschland zu stoppen.

Abbildung 13 stellt die aktuelle Entwicklung sowie den Trend bis zum Jahr 2015 dar. Zum Vergleich sind die Ergebnisse einer Studie aus dem Jahr 2010 eingetragen, die das Borderstep Institut für das Umweltbundesamt erstellt hat. In dieser Studie wurde der Stromverbrauch der Server und Rechenzentren im Jahr 2008 ermittelt und in zwei Szenarien bis zum Jahr 2015 prognostiziert. Die Szenarien zeigen, dass je nach Konjunktur- und Strompreis-Entwicklung sowie insbesondere in Abhängigkeit davon, ob von den Rechenzentrumsbetreibern zusätzliche Energieeffizienzmaßnahmen ergriffen werden, der Gesamtstromverbrauch der Rechenzentren in Deutschland weiter steigen, aber auch gesenkt werden kann. Ohne weitere gezielte Informations- und Fördermaßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz ist allerdings von einem weiteren Anstieg des Energieverbrauchs von Rechenzentren bis 2020 auszugehen.

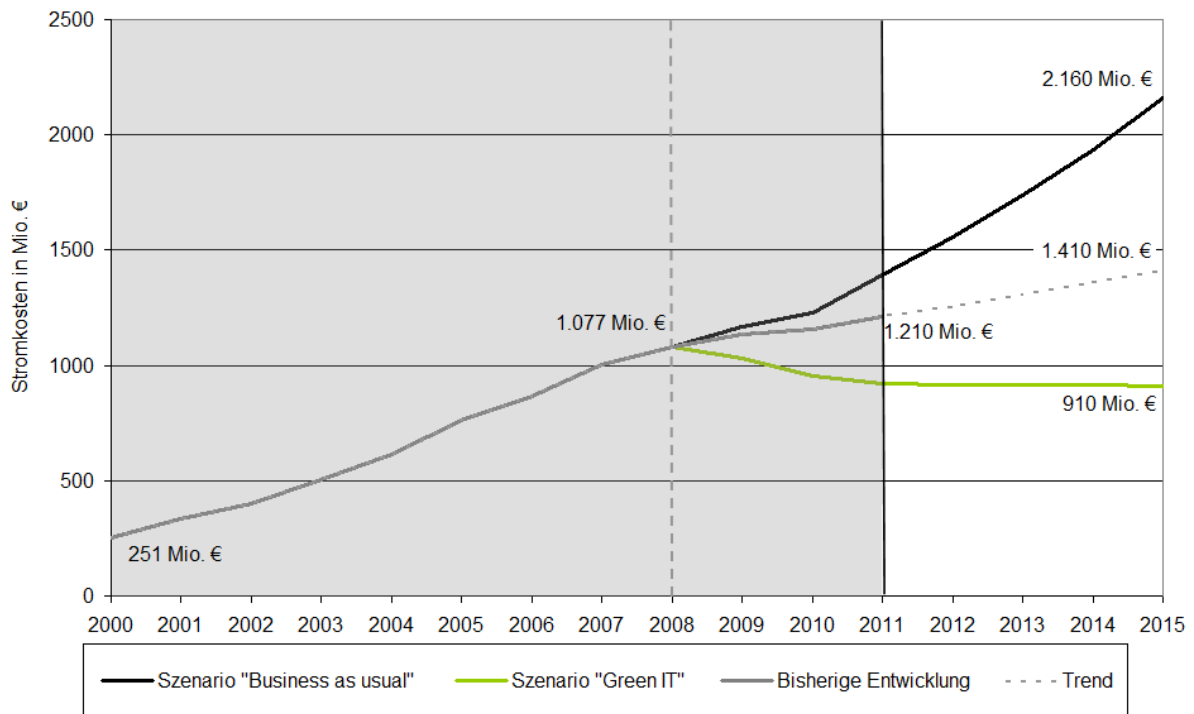
Abbildung 13: „Business-as-usual“-Szenario und „Green-IT“-Szenario des Stromverbrauchs von Rechenzentren in Deutschland



Quelle: Hintemann und Fichter 2012, 2.

Im Vergleich zur Entwicklung des Strombedarfs ergibt sich mit Blick auf die Stromkosten (Abbildung 14) ein etwas anderes Bild. Während bei konsequentem Einsatz verfügbarer Effizienztechnologien („Green IT“-Szenario) eine Verringerung der Stromkosten der Server und Rechenzentren in Deutschland um ca. 160 Mio. € möglich gewesen wäre, ist seit 2008 ein Anstieg um etwa 130 Mio. € erfolgt. Auch für die kommenden Jahre ist ein weiterer Anstieg der Stromkosten zu erwarten – um noch einmal ca. 200 Mio. € bis zum Jahr 2015. Damit lägen die Stromkosten um ca. eine halbe Milliarde Euro oberhalb der Kosten im Szenario „Green IT“. Die Szenarien zeigen, dass je nach Konjunktur- und Strompreis-Entwicklung sowie insbesondere in Abhängigkeit davon, ob von den Rechenzentrumsbetreibern gezielte zusätzliche Energieeffizienzmaßnahmen ergriffen werden, die Stromkosten von Rechenzentren sich sehr unterschiedlich entwickeln können. In den kommenden Jahren ist mit hoher Wahrscheinlichkeit von einem weiteren Anstieg der Stromkosten von Rechenzentren auszugehen.

Abbildung 14: „Business-as-usual“-Szenario und „Green-IT“-Szenario der Stromkosten von Rechenzentren in Deutschland



Quelle: Hintemann und Fichter, 2012, 3.

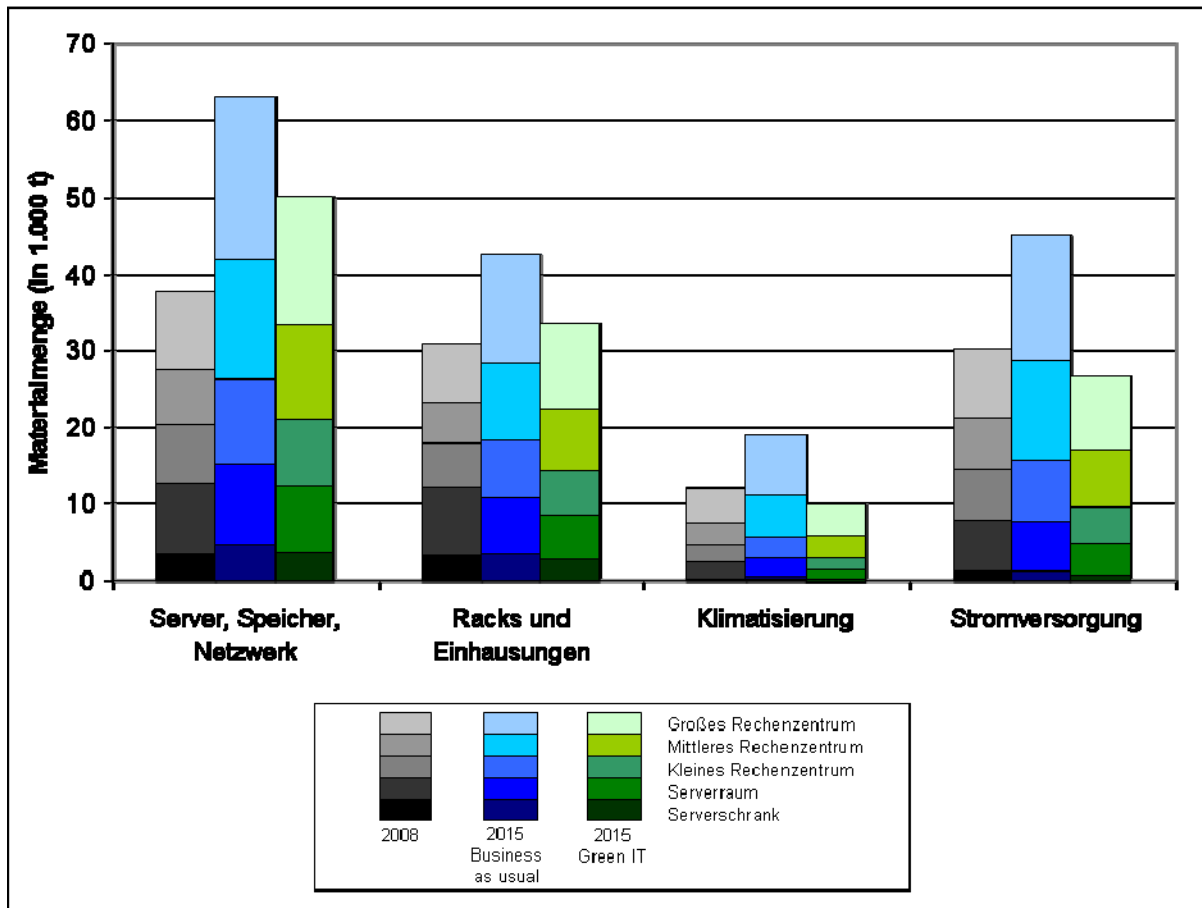
Prognose Materialeinsatz in Rechenzentren

In einer Untersuchung von Hintemann und Fichter (2010) wird die Entwicklung der in Rechenzentren gebundenen Materialien bis zum Jahr 2015 in den Szenarien „Business as usual“ und „Green IT“ analysiert (vgl. Abbildung 15). Dabei ist zu erkennen, dass auch im Szenario „Green IT“ die Gesamtmaterialmengen in den Bereichen „Server, Speicher, Netzwerk“ und „Racks und Einhausungen“ wachsen. Dieses Wachstum verursacht auch die ansteigenden Mengen an Elektronik und Eisen. Die Gesamtmaterialmengen für Klimatisierung und Stromversorgung sinken im Szenario „Green IT“. Diese Art der Darstellung zeigt ebenfalls, dass in beiden Szenarien der Anteil der mittleren und großen Rechenzentren am Materialbedarf zunimmt. Im Bereich der Klimatisierungsinfrastruktur sind im Jahr 2015 allein in den 90 („Business as usual“) bzw. 75 („Green IT“) großen Rechenzentren über 40 % der Materialien gebunden.

Auch wenn die stark vereinfachende Aufsummierung aller Materialien nur einen groben Überblick liefert, so lässt sich doch folgender Zusammenhang feststellen. Die Erfolge, die hinsichtlich der Absenkung des Energieverbrauchs der deutschen Rechenzentren möglich sind, führen insgesamt nicht zu einer Verringerung des Materialbedarfs. Zwar können bestimmte Materialien wie Kupfer insbesondere im Bereich der Stromversorgungs- und Klimatisierungsinfrastruktur eingespart werden, dafür wird aber z. B. der Elektronikanteil weiter ansteigen – selbst wenn es gelingt, den Energieverbrauch sehr deutlich um 40 % abzusenken. Die Entwicklung des Materialbedarfs in deutschen

Rechenzentren ist jedoch nicht unabhängig von der Entwicklung des Energieverbrauchs. Steigt der Energieverbrauch weiter an, so ist sogar mit einem überproportionalen Anstieg des Materialbestandes zu rechnen.

Abbildung 15: Entwicklung der Summe der Massenmaterialien in den verschiedenen Bereichen von Rechenzentren in Deutschland von 2008 bis 2015



Quelle: Hintemann und Fichter, 2010, 105.

7.1.3 Endgeräte

Bei den IKT-Endgeräten kann zwischen Endgeräten in Privathaushalten einerseits und Endgeräten in Unternehmen und öffentlichen Einrichtungen (Behörden, Schulen, Hochschulen) andererseits unterschieden werden. Auf diese soll im Folgenden getrennt eingegangen werden.

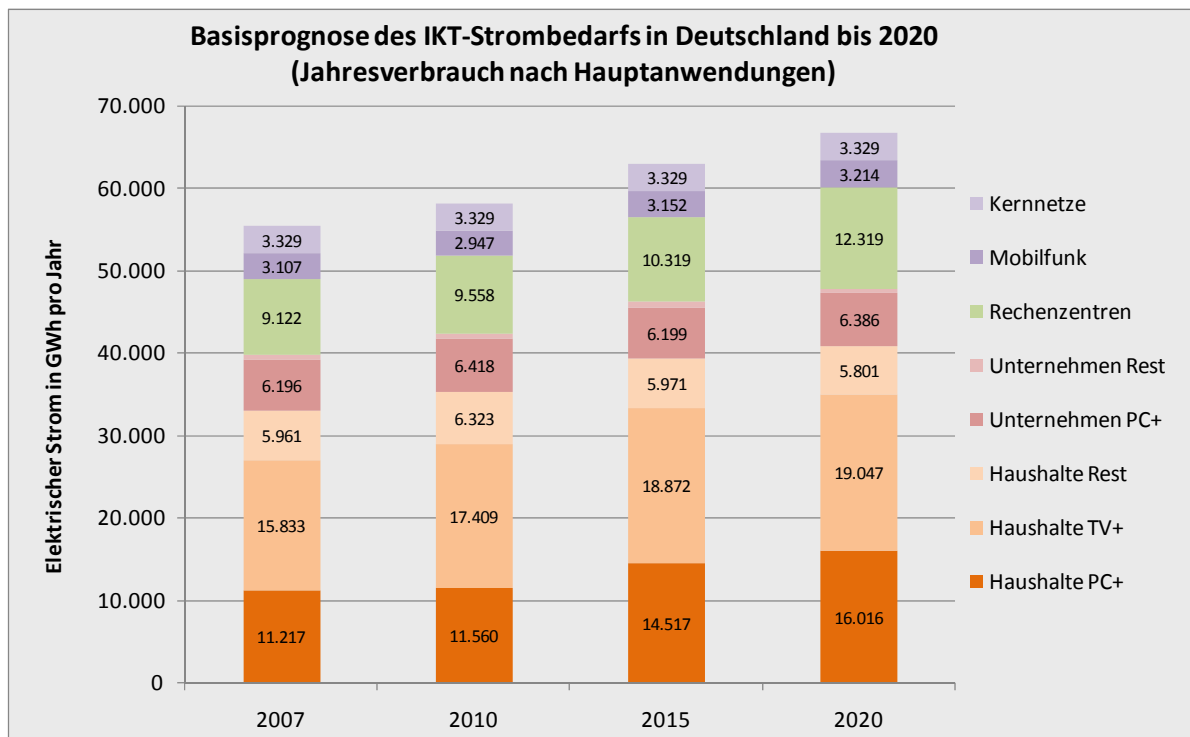
IKT-Endgeräte in Privathaushalten

Nach der Basisprognose in der Studie von Fraunhofer IZM/ISI (2009) wird der IKT-bedingte Stromverbrauch der privaten Haushalte auch in den kommenden Jahren weiter zunehmen. Bis 2020 wird ein Anstieg um fast 25 % von 33 TWh in 2007 auf knapp 40 TWh erwartet. Der Zuwachs erfolgt dabei

in erster Linie in den Produktgruppen Television und Computer (TV+ bzw. PC+, jeweils inkl. Peripheriegeräte), während der Verbrauch in den übrigen Bereichen stagniert.

In der Prognose von Fraunhofer IZM/ISI (2009) werden die Ausstattungsraten der Haushalte für die einzelnen Gerätegruppen bis 2020 fortgeschrieben. Dabei wird insbesondere für Computer (inkl. Peripheriegeräten), Set-Top-Boxen, Router sowie die für die meisten mobilen Geräte mit weiter steigenden Ausstattungsraten gerechnet, während für die übrigen Geräte von einer weitgehenden Sättigung im Haushaltsbereich ausgegangen wird. Der gesamte Gerätebestand ergibt sich dann durch Verknüpfung der geschätzten Ausstattungsraten mit der Zahl der Haushalte. Diese wurde in Anlehnung an die 11. koordinierte Bevölkerungsvorausberechnung des Statistischen Bundesamtes (Destatis, 2006), Variante V1-W2 (Trend), abgeschätzt, wonach bis 2020 mit einem leichten Anstieg der Zahl der Haushalte in Deutschland von 39,7 Mio. in 2007 auf 41,2 Millionen in 2020 (2010: 40,1 Mio.; 2015: 40,6 Mio.) gerechnet wird.

Abbildung 16: Basisprognose des IKT-bedingten Stromverbrauchs in Deutschland bis 2020 nach Hauptanwendungen



Quelle: Fraunhofer IZM/ISI 2009, 69.

Neben der oben beschriebenen Basisprognose, die im Hinblick auf die Leistungsaufnahme der Geräte und Anlagen von einer unter den gegenwärtigen energiepolitischen Rahmenbedingungen auf nationaler und EU-Ebene sowie unter Berücksichtigung des autonomen energietechnischen Fortschritts wahrscheinlichen Entwicklung ausgeht, wird in der Studie von Fraunhofer IZM/ISI zusätzlich ein Green IT-Szenario berechnet. Dieses soll zusätzliche Einsparpotenziale aufzeigen, die aus technischer

Sicht bestehen, jedoch unter den gegenwärtigen Rahmenbedingungen nicht zwingend ausgeschöpft werden. Die Differenz zwischen dem zukünftig erwarteten Stromverbrauch im Basis- und Green IT-Szenario stellt auch einen wichtigen quantitativen Anhaltspunkt für Handlungsempfehlungen dar. Die Durchschnittswerte für die Leistungsaufnahme im Green IT-Szenario orientieren sich an Best Practice-Beispielen für Endgeräte und Anlagentechnik. Effizienzverbesserungen betreffen dabei die folgenden drei Bereiche:

- Technische Optimierung
- Neue Nutzungsformen und -muster
- Netzoptimierung (breitbandiger Netzzugang).

Tabelle 12: Basisprognose und „Green IT“-Szenario für das Jahr 2020 für Privathaushalte in Deutschland

	Stromverbrauch (GWh)					
	2007 Bestandsaufnahme		2020 Basisprognose		2020 Green IT-Szenario	
	Strom alle Modi	darunter Standby ¹⁾	Strom alle Modi	darunter Standby ¹⁾	Strom alle Modi	darunter Standby ¹⁾
Private Haushalte	33.010	9.462	40.864	6.235	33.599	4.878
Computer ²⁾	11.217	2.552	16.016	1.349	13.299	1.344
Mobile Geräte	479	146	731	221	584	74
Television ²⁾	15.833	3.714	19.047	2.866	15.442	2.051
Audio-Geräte	3.212	1.925	2.114	779	1.724	390
Telefone/Router	2.270	1.125	2.956	1.020	2.550	1.020

1) Netzwerk-Standby, passives Standby, Schein-Aus, 2) Inkl. Peripheriegeräte, 3) In der Abgrenzung der WZ2003-Systematik der Wirtschaftszweige: WZ D-O; darunter " Öffentliche Verwaltung, Verteidigung, Sozialversicherung" (WZ L)

Quelle: Fraunhofer IZM/ISI, 2009, 91.

Arbeitsplatzcomputer in Unternehmen und öffentlichen Einrichtungen

Aufgrund der wachsenden Bedeutung des Dienstleistungssektors, der zunehmenden Computerisierung von Branchen mit bisher geringer Computerausstattung (Handel, Handwerk etc.) und der politischen Zielsetzung, Schulen und Hochschulen zukünftig besser mit Computern auszustatten, gehen aktuelle Schätzungen davon aus, dass der Bestand an Arbeitsplatzcomputern in Deutschland von 26,5 Mio. in 2010 auf rund 37,5 Mio. Geräte in 2020 anwachsen wird (BMU/UBA/BITKOM, 2011, 4). Trotz der kontinuierlichen Steigerung bei der Energieeffizienz der Geräte würde ein weiterhin hoher Einsatz von PCs dazu führen, dass der Energieverbrauch durch Arbeitsplatzcomputer in Deutschland in den nächsten Jahren weiter anwächst.

Der Desktop-PC wird als „Computer-Allround-Talent“ auch zukünftig bei einzelnen Anwendungen eine sinnvolle Lösung darstellen, für den ganz überwiegenden Teil von Büro- und Arbeitsplatzanwendungen stellen Mini-PCs, Notebooks und insbesondere das Thin Client & Server Based Computing (TC&SBC) unter ökologischen Gesichtspunkten aber eindeutig die besseren Alternativen dar. Für das

TC&SBC können aber auch andere Vorteile wie ein geringerer Administrationsaufwand, höhere Sicherheit und geringere Total Cost of Ownership sprechen. Vor diesem Hintergrund und aufbauend auf einer umfangreichen Analyse, warum sich Ansätze des Thin Client & Server Based Computing trotz bestehender Best Practice-Anwendungen in der Praxis bislang nur sehr schleppend verbreiten, wurde in einem vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) und dem Umweltbundesamt geförderten Vorhaben in der Zusammenarbeit von Politik, Behörden, IT-Unternehmen, Verbänden und Wissenschaft die Roadmap „Ressourceneffiziente Arbeitsplatz-Computerlösungen 2020“ erarbeitet (BMU/UBA/BITKOM, 2011).

Ziel der Roadmap ist ein nachhaltiger Strukturwandel bei arbeitsplatzbezogenen Computerlösungen in Deutschland bis 2020. Mit der Roadmap soll ein Leitmarkt für „Green Office Computing“ entwickelt werden, der zu folgenden wirtschaftlichen und ökologischen Zielen beiträgt:

- (1) Erhöhung des Anteils energie- und materialeffizienter Arbeitsplatzcomputerlösungen von heute 50 % auf über 60 % in 2013 und 85 % in 2020.
- (2) Reduzierung des durchschnittlichen Primärenergieaufwands (KEA) von Arbeitsplatzcomputern in Deutschland von heute 500 kWh pro Jahr (inkl. Herstellung und Terminalserveranteil, ohne Monitor) auf 400 kWh in 2013 und 200 kWh pro Jahr in 2020.
- (3) Reduzierung des durchschnittlichen Produktgewichts pro Arbeitsplatzcomputer (inkl. Serveranteil) von heute 5,2 kg (ohne Monitor) um 20 % bis 2013 und um mindestens 50 % bis 2020.

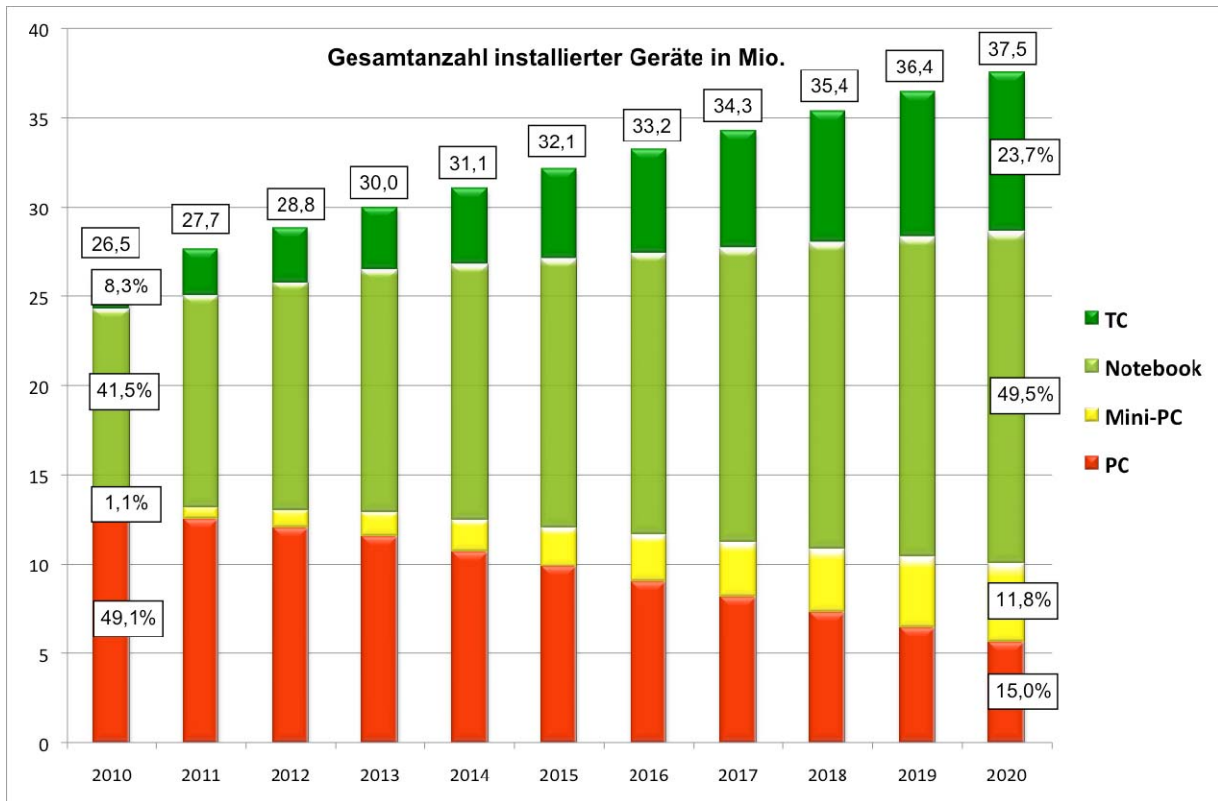
Die 39 Maßnahmen der Roadmap „Ressourceneffiziente Arbeitsplatz-Computerlösungen 2020“ dienen dazu, die genannten Zielsetzungen zu erreichen. Die Realisierung der Roadmap-Maßnahmen würden bis 2020 zu einer Einsparung von 29,4 TWh an Primärenergie, zu einer Stromkosteneinsparung von 2,75 Mrd. Euro sowie zu einer Reduzierung von CO₂-Emissionen von 5,5 Mio. t und von 245.000 t an Computermaterial führen. Mit der Umsetzung der Roadmap kann außerdem ein rasant wachsender Markt für „grüne“ Zukunftstechnologien erfolgreich erschlossen und Deutschland als Green IT-Pionier im internationalen Wettbewerb positioniert werden.

Das im Rahmen des Roadmapping-Projektes erarbeitete „Green IT“-Szenario beschreibt die Entwicklung von arbeitsplatzbezogenen Computerlösungen in Deutschland bis zum Jahr 2020. Der Unterschied zwischen dem Business-as-usual (BAU)-Szenario und dem folgenden „Green IT-Szenario“ besteht darin, dass letzteres davon ausgeht, dass die im vorangegangenen Kapitel vorgestellte Roadmap „Ressourceneffiziente Arbeitsplatz-Computerlösungen 2020“ umgesetzt wird und dass die dort angenommenen Wirkungen der Maßnahmen auf die Art und Anzahl genutzter (installierter) Computerendgeräte und die Steigerung der Energie- und Materialeffizienz so eingetreten sind.

Im „Green IT“-Szenario wird von der Erkenntnis ausgegangen, dass Mini-PCs, Notebooks und Thin Clients für die meisten Büroanwendungen deutlich energie- und materialeffizientere Computerlösungen darstellen als der klassische PC. Dies führt im „Green IT“-Szenario zu einem grundlegenden Strukturwandel in der Geräteausrüstung von Unternehmen, Behörden und (Hoch-) Schulen in Deutschland. Lag der Anteil von PCs an allen Computerendgeräten an Arbeitsplätzen im Jahr 2010 noch bei knapp 50 %, so fällt dieser im „Green IT-Szenario“ auf rund 15 % in 2020. Demnach war der

PC in 2010 noch eindeutig die größte Geräteklasse bei den Arbeitsplatzcomputern, in 2020 rangiert er gerade mal noch auf Platz 3.

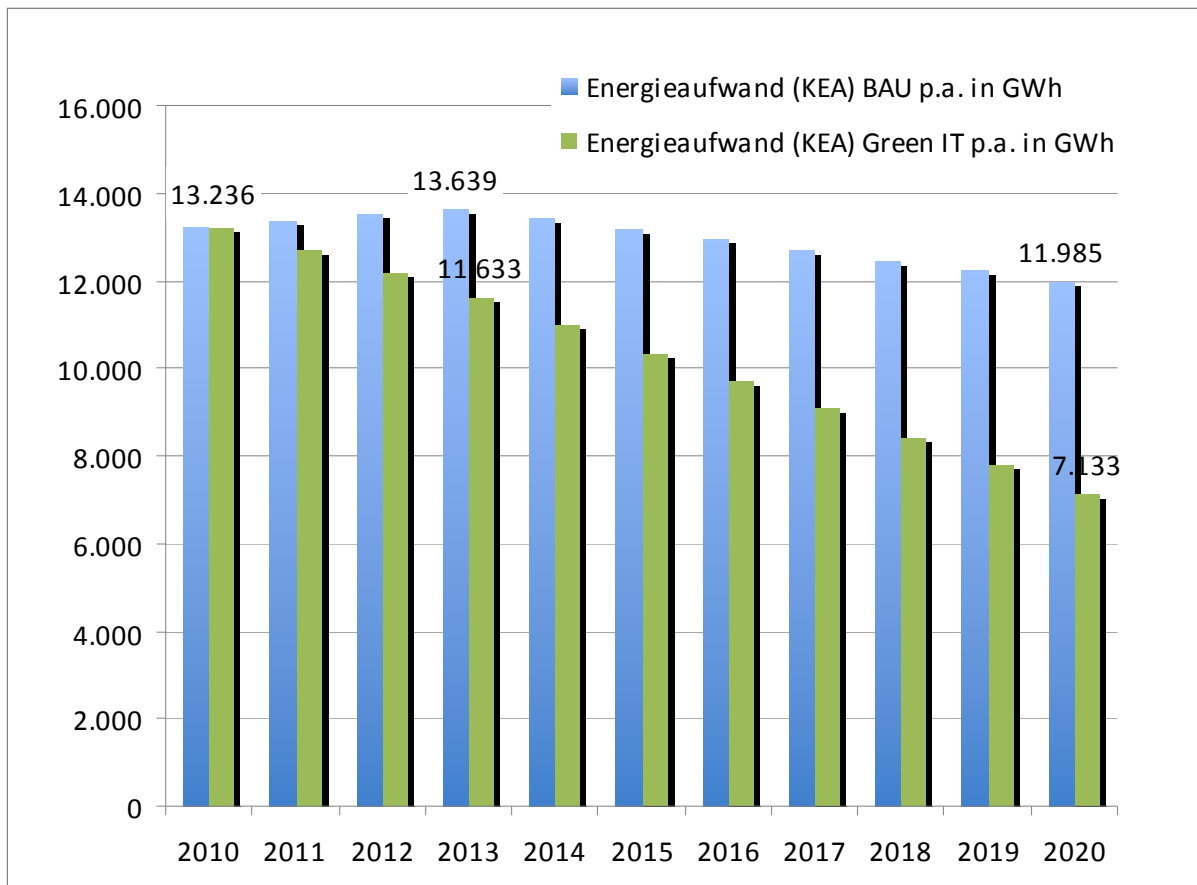
Abbildung 17: Anzahl Computerendgeräte an Arbeitsplätzen (Unternehmen, Behörden, Bildung) in Deutschland bis 2020 im Szenario Green IT



Quelle: BMU/UBA/BITKOM, 2011, 43.

Während im Business as usual (BAU)-Szenario der jährliche Energiebedarf (KEA) aller in Deutschland im Einsatz befindlichen Arbeitsplatzcomputer (inkl. Herstellung und Terminalservernutzung, ohne Monitor) von 13.236 GWh in 2010 auf 11.985 GWh nur leicht sinken würde, ermöglicht die Umsetzung der Roadmap „Ressourceneffiziente Arbeitsplatz-Computerlösungen 2020“ eine erhebliche Energieeinsparung. Im Green IT-Szenario sinkt der jährliche Energieverbrauch zwischen 2010 und 2020 um rund 45 % (vgl. Abbildung 18).

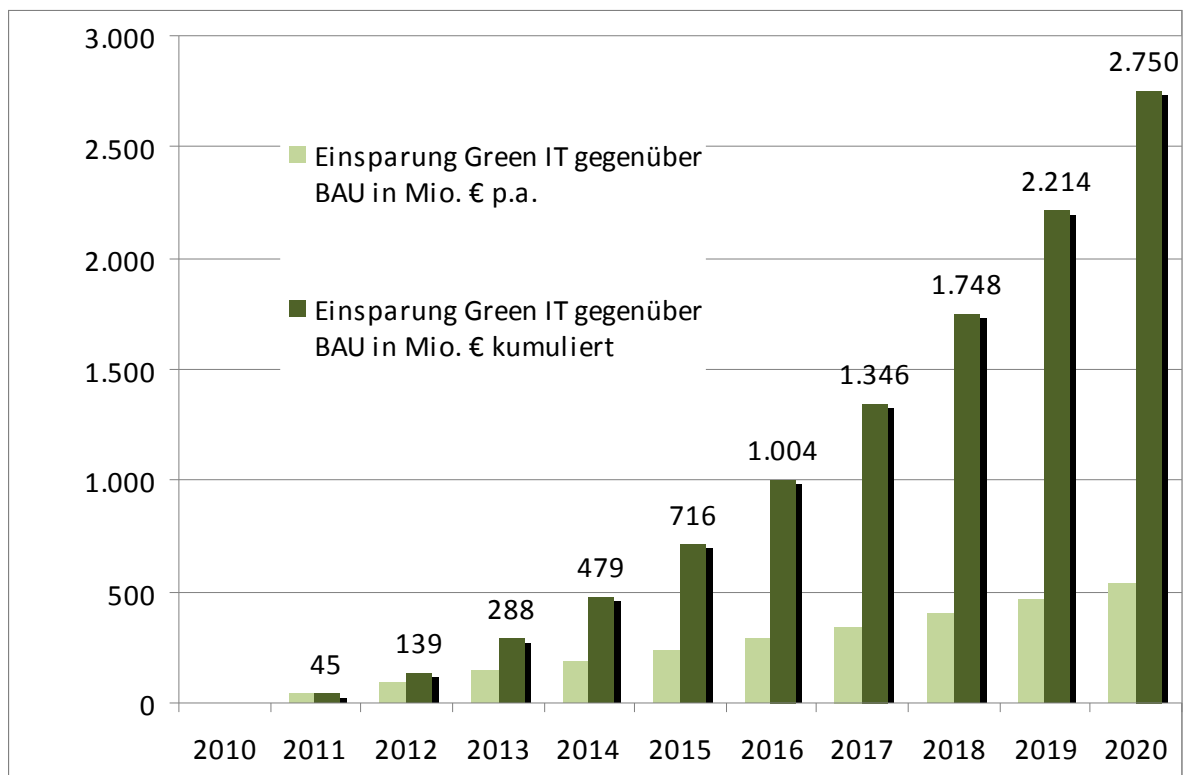
Abbildung 18: BAU- und Green IT-Szenario im Vergleich – Energiebedarf (KEA) von Arbeitsplatzcomputern in Deutschland (inkl. Herstellung und Terminalservernutzung, ohne Monitor)



Quelle: BMU/UBA/BIKTOM, 2011, 48.

Summiert man die jährlichen Primärenergieeinsparungen (KEA) des Green IT-Szenarios auf, so zeigt sich, dass sich bis 2013 eine Gesamtenergiemenge (KEA) von 4 TWh und bis 2020 eine Energiemenge von rund 30 TWh einsparen lassen. Mit der durch die Umsetzung der Roadmapmaßnahmen bewirkten Stromeinsparung sinken auch die Stromkosten für Arbeitsplatzcomputer und zentrale IT (Terminalserver) erheblich. Unternehmen, Behörden und Bildungseinrichtungen in Deutschland würden durch den verstärkten Einsatz energieeffizientere Computerlösungen (Mini-PCs, Notebooks, Thin Clients) bis 2020 Stromkosten von rund 2,75 Mrd. € einsparen (vgl. Abbildung 18).

Abbildung 19: Einsparung von Stromkosten¹⁵ durch Umsetzung der Roadmap (Green IT-Szenario)



Quelle: BMU/UBA/BIKTOM, 2011, 49.

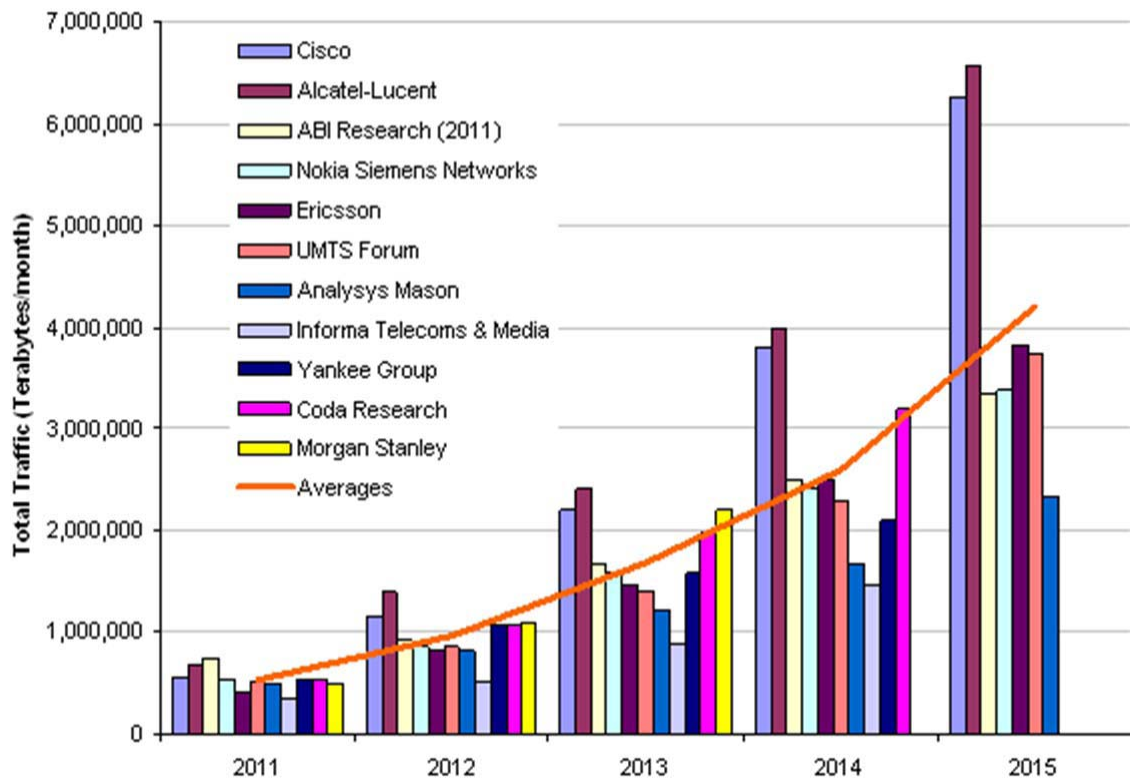
Die Umsetzung der Roadmap bringt auch erhebliche Vorteile für den Klimaschutz. So zeigen die Berechnungen zu den Effekten der Roadmap-Maßnahmen, dass sich durch deren Umsetzung bis zum Jahr 2020 in Deutschland insgesamt rund 5,5 Mio. t CO₂ einsparen lassen.

7.1.4 Netze

In den kommenden Jahren wird mit einem erheblich ansteigenden Datenverkehr in den weltweiten IKT-Netzen gerechnet. Abbildung 20 zeigt beispielhaft für den mobilen Datenverkehr Prognosen unterschiedlicher Anbieter und Studien.

¹⁵ Bei der Berechnung der Stromkosten wurden von einem durchschnittlichen Strompreis bei gewerblichen Kunden von 0,18 €/kWh in 2010 und einem Preisanstieg von 5 % p.a. in den Folgejahren ausgegangen.

Abbildung 20: Prognosen des weltweiten mobilen Datenverkehrs von 2011 bis 2015 nach unterschiedlichen Quellen



Quelle: ITU Forecast Mobile Traffic, 2011, 16.

In einer Prognose von Fraunhofer IZM/ISI aus dem Jahr 2009 gehen diese davon aus, dass sich der Stromverbrauch der IKT-Netze (Festnetz und Mobilfunk) bis 2020 wenig verändern wird. In der Basisprognose wird von einem leichten Anstieg von 6,4 TWh in 2007 auf etwas über 6,5 TWh in 2020 ausgegangen. Im Gegensatz zu der Prognose aus dem Jahr 2009 wird bei der aktualisierten Berechnung von einem deutlichen Anstieg des Stromverbrauchs der Telekommunikationsnetze ausgegangen. Während ursprünglich von einem ungefähr gleichbleibenden Stromverbrauch der Netze in Höhe von rund 6,5 TWh ausgegangen worden war (Fraunhofer IZM/ISI, 2009, 86), wird in der aktuelleren Berechnung von einem Anstieg auf 16,1 TWh im Jahr 2015 und auf 32,2 TWh im Jahr 2020 ausgegangen (Stobbe et al., 2010, 2). Angesichts der in Kapitel 3 beschriebenen Trends bei den IKT-Netzen (Zunahme Breitbandzugänge, Ausbau funkbasierter Netzinfrastruktur, Cloud Computing etc.) und der Nutzung von IKT (Zunahme Audio- und Video-Daten, Interaktivität und Personalisierung von digitalen Dienstleistungen usw.) erscheint die aktualisierte Berechnung des voraussichtlichen Strombedarfs der IKT-Netze bis 2020 plausibel.

7.2 Green durch IT

Die in Kapitel 5 beschriebenen theoretischen Potenziale der Ressourcen- und Energieeffizienz, die aus dem Einsatz von Informations- und Kommunikationstechnik erwachsen können sind erheblich und mit insgesamt geschätzten 194 Mt CO₂e (siehe BCG, 2009) deutlich höher, als die veranschlagten 13 Mt CO₂e, die durch Maßnahmen eines effizienteren Ressourcen- und Energieeinsatz innerhalb der Branche (Green in der IT) erreicht werden können.

So eindrucksvoll diese Zahl auch ist, so sollte zum einen die Höhe der Werte und zum andern die Bedingungen für deren Realisierung kritisch hinterfragt werden. Da es sich bei den genannten Potenzialen um eine Abschätzung möglicher Beiträge zum Klima- und Umweltschutz handelt, die aus Sicht der Informations- und Telekommunikationsbranche und vor dem Hintergrund spezifischer Erwartungen an die Entwicklung von Branchen und Märkten entstanden ist, soll im Folgenden auf die möglichen Lücken einer solchen Abschätzung eingegangen werden:

- **Bewertung von Kontext und Reboundeffekten:** Insbesondere die in den Kapiteln 5.3 und 5.4 genannten Abschätzungen zu Smart Mobility/Smart Logistics und zur Dematerialisierung sind mit großen Unsicherheiten hinsichtlich ihres absoluten Beitrags zu CO₂-Minderungspotenzialen behaftet. Die Frage wie System der Logistik- und Routenoptimierung in der Praxis genutzt werden ist schwer abzuschätzen. Die diskutierten Beispiele zum Teleworking und Virtual Conferencing zeigen darüber hinaus z. B., dass die jeweiligen Maßnahmen immer im Kontext ihres jeweiligen Anwendungs- und Nutzungssystems betrachtet werden müssen. Ansonsten besteht die Gefahr, dass Umweltwirkungen verlagert werden (z. B. durch den Aufbau zusätzlicher, energieintensiver Bürostrukturen im privaten Umfeld für das Teleworking) oder durch Reboundeffekte (siehe Kap. 8) ausgeglichen oder überkompensiert werden (z. B. durch das Ausdrucken elektronischer Dokumente). Die systemische Betrachtung und Bilanzierung ist entscheidend, um die Wirksamkeit der Maßnahmen einordnen zu können und stellen eine große Herausforderung dar.
- **Klärung von Potenzialen und Reduktionszielen:** Für viele der Maßnahmen aus dem Bereich Green durch IT liegen bislang ausschließlich Potenzialabschätzungen vor. D. h., dass für diese Felder keine oder nur wenig belastbare Daten über tatsächliche, aus der Anwendungserfahrung ableitbare Einsparungen vorliegen. Dies gilt insbesondere für den Bereiche Smart Grid, Smart Mobility/Smart Logistics und Dematerialisierung. Die getroffenen Abschätzungen sind daher stark spekulativ und von spezifischen, teilweise auch interessen geleiteten, Szenarien und deren Rahmenbedingungen abhängig. Eine entscheidende Maßnahme, um zu realistischen und belastbaren Daten zu den Einsparungen dieser Technologien und Anwendungsfelder zu gelangen liegt daher darin, im Rahmen von kooperativen Prozessen zwischen Politik, Forschung und Wirtschaft den Beitrag von Technologien, Branchen und Anwendungen zu Ressourceneffizienz- und Emissionsminderungszielen zu quantifizieren und damit verfolgbar zu machen. Teilweise ist hierfür auch noch erhebliche Forschungsarbeit notwendig. Solange solche Ziele und ein Einverständnis über die zu betrachtenden Anwendungs- und Nutzungssysteme (siehe vorangegangener Abschnitt) nicht bestehen, wird es schwierig sein, den tatsächlichen Beitrag einer Technik, eines Produktes oder ei-

ner Anwendung zu Klima- und Umweltschutzzielen zu bewerten. Die Formulierung von Potenzialen allein ist hierfür jedoch nicht ausreichend.

- Ableitung von mittel- und langfristig wirksamen Maßnahmen: Aufbauend auf den abgeschätzten Beiträgen und definierten Zielen ist für einige der genannten Felder (z. B. Smart Buildings und Smart Grids) die Setzung langfristig wirksamer Rahmenbedingungen notwendig. Dies ist zum einen erforderlich, da Maßnahmen die langfristigen Investitionsentscheidungen unterliegen, z. B. die Sanierung von Gebäuden oder der Umbau der Energieversorgung, durch die Setzung stabiler Rahmenbedingungen gefördert werden. Beispielsweise kann die steuerliche Absetzbarkeit von Maßnahmen der energetischen Gebäudesanierung oder eine Gleichstellung in der Kreditfinanzierung von Hausautomatisierungstechniken mit denen klassischer Wärmedämmung, helfen die Technik verstärkt in die Anwendung zu bringen und damit den Beitrag des Feldes Smart Building erhöhen. Zum anderen erfordern Bereiche wie die Entwicklung des Smart Grid, die Schaffung eines Rechtsrahmens, der die technische und marktliche Umsetzung der angestrebten Zielsetzungen ermöglicht (z. B. eine Flexibilisierung des Strompreises und seiner Bestandteile oder eine Anpassung des Eichrechts für die Einführung verschiedener Smart-Meter-Ansätze). Hierbei müssen sich widersprechende Zielsetzungen und Interessen zwischen Staat, Bürgern und Wirtschaft abgestimmt werden. Dies können z. B. Einnahmeverluste aus der Stromsteuer zugunsten einer verstärkten Netzintegration von fluktuierenden, erneuerbaren Energien oder auch gestärkte Datenschutzinteressen von Endkunden gegenüber den Bedürfnissen einer Prognosesicherheit von Energieversorgern sein.

Sollen die Potenziale für eine Verringerung des Ressourcenverbrauchs aus dem Einsatz von IKT realisiert werden, so ist neben den genannten Punkten auch eine realistische Abschätzung und Bewertung des Zeitrahmens wichtig. Die Klärung von Potenzialen und Reduktionszielen in den einzelnen Bereichen und die Ableitung von mittel- und langfristig wirksamen Maßnahmen und Aufgaben sind von großer Komplexität und nehmen Zeit in Anspruch. Es sollte daher unmittelbar mit diesem Prozess begonnen werden, wenn nennenswerte Beiträge zum Ressourcen- und Klimaschutz bis zum Jahr 2020 erreicht werden sollen.

7.3 Zwischenfazit

Trotz erheblicher Effizienzfortschritte auf der Ebene einzelner IKT-Geräte (Miniaturisierung, Steigerung der Energieeffizienz etc.), bei Netzen und Rechenzentren, ist bis zum Jahr 2020 mit einem weiteren deutlichen Anstieg des IKT-bedingten Ressourcenverbrauchs in Deutschland zu rechnen. Ohne zusätzliche erhebliche Anstrengungen zur Steigerung der Energieeffizienz der IKT ist davon auszugehen, dass der Gesamtstromverbrauch der IKT von rund 59,6 TWh in 2010 auf über 90 TWh im Jahr 2020 ansteigen wird. Damit würde der Stromverbrauch der IKT bis 2020 um weitere 50 % ansteigen und der Anteil des durch IKT verursachten Stromverbrauchs am Gesamtstromverbrauch in Deutschland könnte bis 2020 auf fast 20 % zunehmen. Mit Blick auf die Ziele der Energiewende ist diese zusätzliche Belastung der deutschen Stromnetze eine erhebliche Herausforderung. Dies gilt sowohl für die Versorgungssicherheit und die mit dem Stromverbrauch verbundenen Umweltbelastungen (Treibhausgasemissionen etc.) als auch mit Blick auf die volkswirtschaftlichen Kosten eines steigen-

den Stromverbrauchs. Das Segment Rechenzentren zeigt, dass selbst bei umfangreichen zusätzlichen Effizienzmaßnahmen und einem stagnierenden Stromverbrauch die jährlichen Stromkosten der rund 53.000 Rechenzentren in Deutschland von 1,2 Mrd. € in 2010 auf 1,4 Mrd. € in 2015 ansteigen werden. In einem „Business-as-usual“-Szenario“ steigen die Stromkosten bis 2015 sogar auf über 2,1 Mrd. € an. Die Potenziale, die hinsichtlich der Absenkung des Energieverbrauchs in deutschen Rechenzentren möglich sind, werden insgesamt allerdings nicht zu einer Verringerung des Materialbedarfs führen. Zwar können bestimmte Materialien wie Kupfer insbesondere im Bereich der Stromversorgungs- und Klimatisierungsinfrastruktur eingespart werden, dafür wird aber z. B. der Elektronikanteil weiter ansteigen – selbst wenn es gelingen sollte, den Energieverbrauch sehr deutlich abzusenkten. Dies verdeutlicht, dass die materialbezogenen Herausforderungen zur Realisierung einer „Green IT“ erheblich sind und in Zukunft gegenüber Energiefragen noch stärker in den Fokus politischer wie technischer Handlungsstrategien rücken müssen.

Besonders rasant wird der Stromverbrauch im Bereich der Netzinfrastruktur (Festnetz, Mobilfunk etc.) ansteigen. Aktuelle Prognosen gehen von einer Vervierfachung des Stromverbrauchs von knapp 8 TWh in 2010 auf über 32 TWh im Jahr 2020 aus. Aus ressourcenpolitischer Sicht bedarf der Bereich der Netze daher besonderer Aufmerksamkeit.

Auch ist davon auszugehen, dass der IKT-bedingte Stromverbrauch der privaten Haushalte in den kommenden Jahren weiter zunehmen wird. Bis 2020 wird ein Anstieg um fast 25 % von 33 TWh in 2007 auf knapp 40 TWh erwartet. Der Zuwachs erfolgt dabei in erster Linie in den Produktgruppen Television und Computer (TV+ bzw. PC+, jeweils inkl. Peripheriegeräte), während der Verbrauch in den übrigen Bereichen stagniert.

Der Bereich Unternehmen und öffentliche Einrichtungen zeigt, dass trotz der Zunahme des Bestandes an Arbeitsplatzcomputern in Deutschland von 26,5 Mio. in 2010 auf rund 37,5 Mio. Geräte in 2020, eine Reduzierung des Ressourcenverbrauchs möglich ist. Eine für diesen Bereich von Bundesumweltministerium, dem Umweltbundesamt, dem Branchenverband BITKOM und der Wissenschaft erarbeiteten Roadmap „Ressourceneffiziente Arbeitsplatz-Computerlösungen 2020“ mit insgesamt 39 Maßnahmen zeigt, dass eine Reduzierung des Energieverbrauchs aller im Einsatz befindlichen Arbeitsplatzcomputer um 45 % möglich wäre. Unternehmen, Behörden und Bildungseinrichtungen in Deutschland würden durch den verstärkten Einsatz energieeffizientere Computerlösungen (Mini-PCs, Notebooks, Thin Clients) bis 2020 Stromkosten von rund 2,75 Mrd. € einsparen. Dies setzt allerdings eine öffentlich-private Partnerschaft z.B. in Form einer „Green Office Computing“-Initiative von Staat; IKT-Hersteller und -Anwendern voraus.

Die in Kapitel 5 beschriebenen theoretischen Potenziale, die durch die Nutzung von IKT in anderen Branchen und Anwendungsfeldern erwachsen können („Green durch IT“) sind erheblich und liegen deutlich über dem Ressourcenverbrauch der IKT selbst. So eindrucksvoll die ermittelten Potenziale auch sind, so sollte zum einen die Höhe der Werte und zum andern die Bedingungen für deren Realisierung kritisch hinterfragt werden. Die in den 1990er Jahren im Zuge der Einführung von PCs in die Arbeitswelt oft verbreitete Vision eines papierlosen Büros mag die Zwiespältigkeit solcher Abschätzungen verdeutlichen. Der Papierverbrauch in Deutschland ist nicht etwa gesunken, sondern von 15,4 Mio. t in 1990 auf rund 20 Mio. t. in 2010 angestiegen.

Für viele der Maßnahmen aus dem Bereich Green durch IT liegen bislang ausschließlich Potenzialabschätzungen vor. D. h., dass für diese Felder keine oder nur wenig belastbare Daten über tatsächliche, aus der Anwendungserfahrung ableitbare Einsparungen vorliegen. Dies gilt insbesondere für den Bereiche Smart Grid, Smart Mobilty/ Smart Logistics und Dematerialisierung. Die Abschätzungen sind daher stark von den getroffenen Annahmen sowie teilweise auch von den Interessen der Auftraggeber abhängig. Gerade bei Auftraggebern aus dem Kreis der Hersteller oder Anbieter bestimmter IKT-Lösungen besteht ein erhebliches Interesse an der Ausweisung eines möglichst hohen ökologischen Zusatznutzens ihrer Produkte und Dienstleistungen, um diese besser verkaufen zu können.

Mit Blick auf die Erschließung von Ressourceneinsparpotenzialen im Bereich „Green durch IT“ können drei zentrale Handlungsempfehlungen abgeleitet werden:

- Festlegung konkreter Reduktionsziele für Deutschland für die einzelnen „Green durch IT“-Felder
- Ausweitung der Forschung zu Reboundeffekten insbesondere in den Feldern Smart Mobilty/Smart Logistics und Dematerialisierung.
- Kooperatives Roadmapping von Staat, IKT-Anbietern und –Anwendern zur Entwicklung langfristiger Masterpläne zur Erschließung von Ressourceneinsparpotenzialen v. a. in den Bereichen Smart Building und Smart Grid.

8 Rebound-Effekte

Informationstechniken wirken nicht nur direkt und indirekt auf die Umwelt ein, sie verändern auch Produktion, Konsummuster und Lebensstile. Die damit verbundenen ökologischen Effekte werden erst langfristig sichtbar und sind keineswegs eindeutig. Inwieweit die dargestellten beachtlichen Potenziale zur Ressourcenschonung und zum Klimaschutz in der IKT und durch IKT realisiert werden, hängt von verschiedenen Voraussetzungen ab und muss sich erst noch zeigen. Rebound-Effekte haben dabei besondere Aufmerksamkeit verdient, da sie die Gefahr besitzen, positive Effekte zu verringern oder gar ins Gegenteil zu verkehren (Hertin und Berkhout, 2003). Was wir bisher darüber wissen, wird im Folgenden dargestellt. Dazu werden der aktuelle Stand der Forschung ausgewertet, eigene Abschätzungen möglicher Rebound-Effekte von IKT-Anwendungen vorgenommen und Schlussfolgerungen für Ansätze im Umgang mit Rebound-Effekten gezogen.

8.1 Definition und Systematisierung

Rebound-Effekt ist ein Feedback-Mechanismus, der dazu führt, dass Einsparpotenziale von Effizienzsteigerungen nicht oder nur teilweise verwirklicht werden. Wenn aufgrund einer Effizienzerhöhung zum Beispiel die Preise eines Produktes oder einer Dienstleistung verringert werden können und dies zu einer Mengenausweitung der Nachfrage führt, nennen wir dies Rebound-Effekt. Die Bezeichnung „Rebound“ rührt daher, dass die Erwartung, einen Energie- oder Stofffluss durch Effizienzerhöhung in einem bestimmten Umfang zu verringern nicht oder nicht in vollem Umfang eintritt.

Dieser Mechanismus wurde erstmals von Wilhelm Stanley Jevons beschrieben. Kahzzoom (1980) und Brookes (1990) haben ihn die aktuelle wissenschaftliche Diskussion eingeführt. Seither haben sich Begriff und Konzept des Rebound-Effekts ausdifferenziert. Nach Greening et al. (2000) können direkte, indirekte und wirtschaftsweite Rebound-Effekte unterschieden werden.

Direkter Rebound-Effekt

Der direkte Rebound-Effekt äußert sich in einer erhöhten Nachfrage nach demselben Gut. Eine Leistung, die effizienter angeboten wird, wird billiger. Was billiger wird, wird stärker nachgefragt. Direkte Rebound-Effekte in Bezug auf Produktpreise entstehen, wenn verbesserte Ressourceneffizienz für ein bestimmtes Produkt den effektiven Preis für dieses Produkt senkt, was eine vergrößerte Nachfrage nach diesem Produkt erwarten lässt. Beispielsweise waren die ersten Mobiltelefone mehrere Kilogramm schwer, heute wiegen sie nur noch ein Zwanzigstel. Aber gerade das geringe Gewicht und damit die Handlichkeit und die sinkenden Kosten machten sie zur Massenware. Häufig führen in der IKT Effizienzsteigerungen auch zu höheren Leistungsanforderungen, „so dass sich nicht der Ressourcen-Input pro Gerät reduziert, sondern der Leistungs-Output erhöht“ (Hilty, 2003).

Indirekter Rebound-Effekt

Der indirekte Rebound-Effekt zeigt sich in einer erhöhten Nachfrage nach alternativen Gütern. Wer aufgrund einer Effizienzsteigerung Ressourcen und damit Geld spart, gibt das Geld gegebenenfalls für andere Konsumgüter aus, die ebenfalls Ressourcen verbrauchen und die Umwelt belasten. Ein Beispiel ist die Einsparung von Strom. Verbraucher können die Stromrechnung durch eine bewusste Kaufentscheidung für energiesparende IKT-Geräte und deren intelligente Nutzung erheblich senken. Wird das eingesparte Geld für andere Güter ausgegeben, wird die Umwelt wahrscheinlich wieder belastet. Wie hoch hängt von Art und Nutzung der Güter ab. Wird das eingesparte Geld für eine Flugreise ausgegeben, dürfte dies die Umweltentlastung nicht nur zunichte machen, sondern zu höherer Umweltbelastung führen.

Makroökonomischer Rebound-Effekt

Während direkte und indirekte Rebound-Effekte in der Regel bereits auf der Mikroebene wirksam werden, gibt es vermittelte Effekte, die erst makroökonomisch sichtbar werden. Wirtschaftsweite Reboundeffekte entstehen, wenn eine Verringerung der realen Preise beispielsweise von Energieservices in der ganzen Wirtschaft zu einer Reihe von Preis- und Qualitätsanpassungen führt. Dabei profitieren energieintensive Güter und Sektoren auf Kosten der weniger energieintensiven Güter und Sektoren. So können Energieeinsparungen vieler Verbraucher dazu führen, dass der Energiepreis sinkt, was wiederum einen Anreiz setzt, dass andere Verbraucher vermehrt Energie nachfragen. Im Allgemeinen reagieren Volkswirtschaften auf Effizienzerhöhungen mit einer Nachfrageausweitung. Die Erschließung neuer Anwendungs- und Absatzmöglichkeiten trägt damit zu Kompensation von Effizienzgewinnen bei.

Ermittlung von Rebound Effekten

Die Bestimmung des Rebound-Effekts setzt zwei Aspekte voraus:

- (1) Der Rebound-Effekt ist das Ergebnis der Wirkung einer Effizienzsteigerung.

Quantitativ wird der Rebound-Effekt definiert als jener Prozentsatz des Einsparpotenzials der dadurch verloren geht, dass der Verbrauch einer Ressource aufgrund der Effizienzerhöhung ansteigt. Um dies zu ermitteln, bedarf es der Unterscheidung zwischen einerseits dem theoretisch und technisch machbaren Effizienzpotenzial und andererseits dem tatsächlich realisierten Ressourcenverbrauch (Santarius, 2012). In Fällen, wo der Rebound-Effekt so stark zunimmt, dass der gesamte Einspareffekt überkompensiert wird, spricht man von Backfire-Effekten (Rebound größer als 100 %). Nicht als Rebound-Effekte sind solche Phänomene zu bezeichnen, die zwar der Effizienzmaßnahme entgegenwirken, aber nicht von ihr verursacht werden. So liegt kein Rebound-Effekt vor, wenn Computer immer sparsamer werden, aber wegen des zunehmenden Einkommens mehr Computer gekauft werden.

- (2) Der Rebound-Effekt ist im Kontext mit einer Absicht oder Erwartung zu sehen.

Von einem Rebound-Effekt kann gesprochen werden, wenn eine Effizienzverbesserung mit der Absicht vorgenommen wird, den Input zu senken, und diese Wirkung dann nicht eintritt. Stattdessen wächst der Output. Wird eine Effizienzverbesserung dagegen mit der Absicht vorgenommen, den Output zu steigern und gelingt dies, ist dies ein beabsichtigtes Wachstum und demzufolge auch kein Rebound-Effekt (Hilty, 2003). Aus Perspektive eines Unternehmens kann deshalb nur von einem Rebound-Effekt gesprochen werden, wenn die Absicht bestand, den Input zu verringern, und dies infolge von Effizienzsteigerungen nicht gelingt. Der Staat verfolgt dagegen zahlreiche Ziele mit der Absicht den Input oder Output auf der volkswirtschaftlichen Ebene zu begrenzen. Dies gilt zum Beispiel für den Energieverbrauch oder Treibhausgasemissionen. Betrachtungen zum Rebound-Effekt sind daher aus dieser Akteursperspektive besonders relevant.

Abbildung 21: Rebound-Effekte im Zusammenhang von Absicht und Wirkung

		Absicht bestimmter Akteure Unternehmen, Privathaushalte, Staat	
		Input senken	Output steigern
Wirkung	Input sinkt nicht oder geringer	Rebound-Effekt	Beabsichtigtes Wachstum
	Output steigt nicht oder geringer	Einsparung von Input	Unbeabsichtigte Stagnation

Quelle: nach Hilty, 2003

Rebound-Effekte sind schwierig zu kategorisieren. Zu diesem Effekt tragen mehrere Mechanismen bei. Sorrell und Dimitropoulos (2008) haben für Energie acht verschiedene Definitionen des direkten Rebound-Effektes abgeleitet Effizienz- und Preiselastizität der Nutzenergie (1), auch in Komponenten zerlegt (2), als Preiselastizität der Nutzenergie (3) bzw. der Endenergie (4), unter Berücksichtigung der Kapitalkosten (5), der Endenergiekosten-Elastizität der Nachfrage nach Nutzenergie (6), der Zeiteffizienz (7) und der kombinierten Zeit- und Kapitalkosten (8). Ein Großteil der Studien zum direkten Rebound-Effekt in Bezug auf den Preis stammt aus dem Energiesektor. Ein Review der bestehenden Studien

zum direkten langfristigen Rebound-Effekt der Energieeffizienz in Haushalten ergab beste Schätzungen von jeweils 10-30 % für privaten Automobilverkehr und Heizung, 1-26 % für Kühlung und generell weniger als 20 % für andere Services wie Warmwasserbereitung (Sorrell et al., 2009). Aussagen zum direkten Rebound-Effekt in Bezug auf die Zeit sind selten. Im Zusammenhang mit Online-Handel von Lebensmitteln konnte trotz Zeiteinsparung empirisch keine signifikante Reduzierung des individuellen Verkehrs nachgewiesen werden (Vogt et al., 2002). Indirekte Rebound-Effekte können mit Hilfe von Input-Output-Modellen abgebildet werden. Thiesen et al. (2008) haben konkret den Rebound-Effekt von Preisdifferenzen in Ökobilanzen mit dieser Methode untersucht. Auch Tukker et al. (2006) bieten eine Basis zur Abschätzung der Umwelteffekte des indirekten Preis-Rebound-Effekts. Girod und de Haan (2010) haben Elastizitätswerte der Treibhausgasemissionen von Haushalten in Bezug zu vermehrten Haushalteinnahmen für die Schweiz veröffentlicht. Die wirtschaftsweiten Rebound-Effekte wurden mit Hilfe von makroökonomischen Modellen, oft ökonomischen Gleichgewichtsmodellen, untersucht (z. B. Barker et al., 2007).

Jenkins (2011), Paech (2011), van den Berg (2011) Madlener und Acott (2001) haben neuere Systematisierungen vorgenommen. Nach Santarius (2012) können Rebound-Effekte in finanzielle, materielle, psychologische und Cross Factor-Rebound-Effekte eingeteilt werden.

Tabelle 13: Kategorisierung möglicher Reboundeffekte

Finanziell	Materiell	Psychologisch	Cross-Factor
Einkommens-Effekt	Embodied-Energy-Effekt	Moral-Hazard-Effekt	Cross-Factor-Effekt
Re-Investitions-Effekt	Neue-Märkte-Effekt	Moral-Leaking-Effekt	Materieller Cross-Factor-Effekt
Marktpreis-Effekt	Konsum-Akkumulations-Effekt	Moral-Licensing-Effekt	Multiple Cross-Factor-Effekt
	Re-Materialisierungs-Effekt		Konsum-Rationalisierungs-Effekt

Quelle: Santarius, 2012, eigene Ergänzung

Finanzielle Rebound-Effekte

Finanzielle Rebound-Effekte werden durch Kosteneinsparungen infolge von Effizienzmaßnahmen verursacht. Drei finanzielle Rebound-Effekte können unterschieden werden (Santarius, 2012): Einkommens-Effekte, Re-Investitions-Effekte und Marktpreiseffekte. Einkommens-Effekte können zu Rebound-Effekten führen, wenn aufgrund von Effizienzmaßnahmen erzielte Einkommensgewinne zu einem zusätzlichen Konsum führen. Wenn Kosteneinsparungen im Produktionsprozess durch Effizienzsteigerungen erzielt werden, kann es entsprechend zu einem Re-Investitionseffekt kommen. Ein durch Effizienzmaßnahmen hervorgerufener Preisrückgang bei Ressourcen kann wiederum eine erhöhte Nachfrage aus anderen Sektoren stimulieren. In diesem Fall kann von einem Marktpreis-Effekt gesprochen werden (Santarius, 2012).

Materielle Rebound-Effekte

Materielle Rebound-Effekte sind darauf zurückzuführen, dass Investitionen in Effizienzmaßnahmen eine höhere Nachfrage nach Energie, Rohstoffen und Material zur Herstellung dieser Güter bewirken. Die damit ausgelöste Mehrnachfrage kann als Embodied-Energy-Effekt bezeichnet werden. Beruht die Realisierung auf neuen Produkten und Infrastrukturen, kann (Paech, 2011) von einem Neue-Märkte-Effekt gesprochen werden. Der Konsum-Akkumulations-Effekt hebt darauf ab, dass der „Konsum von effizienteren, umweltfreundlicheren Produkten nicht immer die herkömmlichen Produkte ersetzt, sondern oft zusätzlich zu ihnen erfolgt“ (Santarius, 2012). Werden digitale Medien (z. B. Webzeitungen), die physische Produkte substituieren, ausgedruckt oder auf Speichermedien wie CDs gebrannt, kommt es zusätzlichen Umweltbelastungen. In diesem Fall spricht man von Re-Materialisierungs-Effekten.

Psychologische Rebound-Effekte

Rebound-Effekte können psychologische Gründe haben. Ökologischere Produkte unterscheiden sich von herkömmlichen Produkten nicht nur in ihren technischen Eigenschaften, sondern auch in ihrem symbolischen Gehalt. So kann Konsum durch Effizienzsteigerungen ökologisch akzeptabler werden und dadurch eine Mehrnachfrage auslösen. In der Umweltpsychologie wird dies als Moral-Hazard-Effekt beschrieben. Wirkt der Kauf eines effizienteren Produktes „gewissensberuhigend“ kann von einem Moral-Leaking-Effekt gesprochen werden. „Weil es ökologisch, ökonomisch und ggf. auch gesellschaftlich nicht mehr so darauf ankommt, werden energiesparende Handlungen in der Priorisierung der zielgerichteten Motive zurückgestuft oder gar aufgegeben“ (Santarius, 2012). Führt der Erwerb eines umweltfreundlicheren Produktes zu der Haltung, dass an anderer Stelle ein weniger umweltfreundlicher Konsum legitim erscheint, spricht Santarius (2012) von einem Moral-Licensing-Effekt. Dies ist beispielsweise der Fall, wenn Personen die energieeffiziente Produkte nutzen, es für gerechtfertigt halten, nun mehr Fernreisen zu unternehmen.

Cross-Factor-Rebound-Effekte

Hier handelt es sich um Rebound-Effekte, die aufgrund von Produktivitätssteigerungen anderer Faktoren ausgelöst werden. So hat eine Steigerung der Arbeitsproduktivität eine steigende Energienachfrage zur Folge, was aufgrund mittelbarer Wirkungen als Cross-Factor-Effekt bezeichnet werden kann. Wird menschliche Arbeitskraft durch Mechanisierung und Motorisierung ersetzt, lässt sich von einem materiellen Cross-Factor-Rebound-Effekt sprechen. Ein Beispiel ist die transport- und IT-intensive Just-in-Time-Lieferung. Geht die Steigerung der Arbeitsproduktivität mit einer Erhöhung der Ressourceneffizienz einher können multiple Cross Factor-Rebound-Effekte entstehen. Auf Konsumentenseite sind Cross-Factor-Rebound-Effekte durch Zeitgewinne möglich, die sich in einer intensiveren Nutzung von Produkten oder Dienstleistungen niederschlagen. Ein Beispiel für einen solchen Konsum-Rationalisierungseffekt ist das Surfen im Internet. Zeiteffizienzgewinne erlauben eine häufigere Nutzung des Internets, gepaart mit größerem Datenvolumen führt dies zu einer Erhöhung des Energieverbrauchs.

8.2 Umwelteffekte der IKT – ein Review

Solche Systemreaktionen gibt es auch bei Effizienzmaßnahmen in der IKT. So entwickeln sich IKT-Technologien rasant und werden immer effizienter¹⁶. Gleichzeitig steigt ihre Nutzung jedoch auch immer mehr an. Die Zahl der Internetnutzer in Deutschland hat sich von unter 20 Mio. im Jahr 2000 auf heute über 50 Mio. gesteigert, zusätzlich ist die durchschnittliche tägliche Verweildauer im Internet im gleichen Zeitraum um ca. 50 % auf mehr als 2 Stunden pro Tag gestiegen (Schenk et. al., 2011). Das weltweit benötigte Datenvolumen verdoppelt sich im Durchschnitt alle zwei Jahre und hat im Jahr 2011 die 1,8 Zettabyte-Marke erreicht (IDC, 2011). Die Folge ist, dass trotz Anstrengungen in der Vergangenheit den Ressourcenbedarf der IKT zu senken (Green in IT), dieser kontinuierlich gestiegen ist. Dass dieser Anstieg in der IKT-Nutzung überhaupt möglich ist, ist zumindest teilweise auch auf die erreichten Effizienzsteigerungen zurückzuführen. Auch im Bereich „Green durch IT“ sind ähnliche Effekte festzustellen bzw. zu vermuten.

Ob Rebound-Effekte der IKT vorliegen, kann nur dann richtungssicher abgebildet werden, wenn alle relevanten Umwelteffekte berücksichtigt werden (Primäre Effekte, Sekundäre Effekte, Tertiäre Effekte – siehe Abschnitt 4.1).

Nach einem verbreiteten Schema sind drei verschiedene Effekte zu unterscheiden (Fichter, 2003; Köhler und Erdmann, 2004; Hilty, 2008):

Primäre Effekte

Die Existenz von IKT ist unmittelbar an physische Prozesse über ihren Lebensweg gekoppelt. Direkte Umweltfolgen entstehen bei der Bereitstellung der Informations- und Kommunikationstechnik-Infrastruktur. Durch Herstellung, Nutzung und Entsorgung von IKT-Hardware und Netzinfrastrukturen werden Ressourcen verbraucht und die Umwelt, beispielsweise durch Stromverbrauch für den Betrieb der Geräte, belastet. Primäre Effekte der IKT sind definitionsgemäß negativ für die Umwelt.

Sekundäre Effekte

Die Nutzung und Anwendung von IKT verursacht Änderungen im Lebensweg anderer Produkte (z. B. Online-Gebrauchtwarenhandel substituiert etablierte Transaktionswege für Gebrauchtwagen oder den Handel mit Neuprodukten). Indirekte Folgen für die Umwelt treten durch die Transformation wirtschaftlicher Prozesse, Märkte und des Konsums auf. Sie werden in der Literatur überwiegend positiv eingeschätzt. Die Effekte sind in der Regel allerdings ambivalent, da sowohl umweltentlastende wie auch umweltbelastende Folgen auftreten können.

¹⁶ Hilty verweist in diesem Zusammenhang auf die (in der Presse schon in den 80er Jahren diskutierte) Analogie zwischen der Innovationsdynamik von IKT und Automobilindustrie: „Wenn die die Automobilindustrie die gleichen Fortschritte gemacht hätte wie die Computerindustrie, hätte ein Roll-Royce damals 2.50 Dollar gekostet und mit einer Tankfüllung zwei Millionen Meilen zurückgelegt. Heute (...) würde der Rolls-Royce nur noch wenige Cents kosten und könnte wahrscheinlich mit der Körperwärme des Fahrers betrieben werden“ (Hilty 2006, 198).

Tertiäre Effekte

Neben den primären (direkten) und sekundären (indirekten) Folgen der IKT treten vermittelte Rückkopplungswirkungen auf, die nicht von einer Anwendung, sondern in einem soziökonomischen System bestimmt werden. Die Nutzung und Anwendung von IKT verursacht komplexe Verhaltens- und Gesellschaftsveränderungen, die auf die direkten und indirekten Effekte zurückwirken (z. B. additiver Konsum durch bequeme Online-Verfügbarkeit preiswerter Gebrauchsgüter). Tertiäre Umwelteffekte können im Zusammenhang mit IKT signifikant sein; ihr Ausmaß ist wegen methodischer Unzulänglichkeiten und fehlender empirischer Validierung jedoch meist unsicher.

Illustrativ für das Zusammenwirken der verschiedenen Ebenen mit Blick auf Rebound-Effekte sind die Ausführungen von Hilty am Beispiel der Substitution herkömmlicher Korrespondenz durch E-Mail: „E-Mail ist zweifellos eine wesentlich effizientere Kommunikationsmethode, weil das Ausdrucken eines Bogens, das Kopieren von Beilagen, das Hantieren mit Briefumschlägen usw. entfällt. Betrachtet man nur die Sekundäreffekte, scheint eine Einsparung zu resultieren. Jedoch zeigt die Alltagserfahrung, dass wir heute mehr Zeit für E-Mails aufwenden als früher mit dem Lesen und Schreiben von Briefen, weil die Frequenz schneller zugenommen hat als die Effizienz (Tertiärer Effekt). Dies liegt zum einen an der Möglichkeit, mit gleichem Zeitaufwand mehr Kontakte zu unterhalten. Zum anderen spielt aber auch die Übertragungsgeschwindigkeit eine Rolle: Allein die Tatsache, dass man innerhalb von Minuten reagieren bzw. eine Antwort erhalten kann, während Briefe frühestens am nächsten Tag ankommen, sorgt für eine höhere Austauschfrequenz. Das insgesamt höhere Aktivitätsniveau ist ressourcenwirksam bei den Primäreffekten (Bereitstellungseffekten der notwendigen IKT-Infrastrukturkapazitäten) und es zieht Induktionseffekte nach sich, etwa wenn die weltweiten Kontakte zum Reisen motivieren“ (Hilty, 2007, 198)

Das Ausbleiben des papierlosen Büros, Verkehrswachstum trotz Telekommunikation oder der Anstieg der Hardwaremassenströme trotz Leistungssteigerung und Miniaturisierung der IKT-Hardware sind weitere Befunde der Forschung für Rebound-Effekte der IKT. Ein gut dokumentiertes Beispiel für den Rebound-Effekt der Miniaturisierung liefert die Entwicklung von Masse und Anzahl der Mobiltelefone. So ging die Masse pro Stück um den Faktor 4 zurück, gleichzeitig stieg aber die Zahl der Handybesitzer an. Obwohl leichte Handys schwere Handys ersetzt haben, stieg die Gesamtmasse, beispielsweise in der Schweiz von 50 Tonnen auf 450 Tonnen (Hilty, 2006). Für die Zukunft ist angesichts sich sättigender Märkte und abnehmender Miniaturisierungspotenziale keine große Veränderung mehr zu erwarten, d. h. der Gesamtmassenstrom wird sich auf sehr hohem Niveau einpendeln. Ein Beispiel, wo die Miniaturisierung nicht nur relativ zu einer deutlichen Verbesserung der Ressourcenproduktivität geführt hat, sondern auch absolut trotz Wachstum des Marktes die Umwelt entlastet wurde, ist die Ablösung von herkömmlichen Bildröhren (Cathode Ray Tube, CRT) durch LCD-Flachbildschirme an Arbeitsplätzen. Der Vorteil von LCD-Flachbildschirmen gegenüber CRT-Bildschirmen hinsichtlich des Stromverbrauchs und des Abfallaufkommens sind so ausgeprägt, dass in diesem Fall kein Rebound-Effekt zu erwarten ist (Erdmann, 2002). Das bedeutet: Die Effizienzsteigerung bei Bildschirmen hinsichtlich Masse und Energie wird voraussichtlich nicht dazu führen, dass die Nachfrage nach Bildschirmen so stark ansteigt, dass die Umweltentlastung kompensiert wird.

Dies liegt zum einen an der Preisrelation zwischen LCD- und CRT-Bildschirmen und daran, dass der Markt für Computerbildschirme an Arbeitsplätzen schon einigermaßen gesättigt ist, so dass eine Substitution stattfindet. Diese Überlegung gilt wiederum nur für die eingeschränkte Perspektive, die diesem Beispiel zugrunde liegt. Es ist bekannt, dass die Hersteller von LCD-Displays in großem Tempo in andere Märkte eindringen, z. B. die Kleindisplays in Navigationsgeräten, PDAs, Haushaltgeräte usw., was hier wiederum einen Zuwachs schafft (Hilty, 2003; Behrendt, 2004). Der nächste Entwicklungsschritt dürfte ähnlich verlaufen. Stehen eines Tages die energieeffizienten OLED-Displays für große Bildschirmdiagonalen zur Verfügung, so sind weitere Effizienzfortschritte, auch im Vergleich zu LCDs, möglich. Die hohen Fixkosten bei kapitalintensiver Produktion zwingen die Hersteller zu einem hohen Produktausstoß. Es werden dann also erneut neue Märkte erschlossen werden, die die abgesetzten Mengen insgesamt ausweiten.

Diese Beispiele zeigen, dass Miniaturisierung und Systemintegration bei isolierter Betrachtung einzelner Produktgruppen in einigen Fällen zu einer Material- oder Energieeinsparung führen können. Die Miniaturisierungsfortschritte und die Produktionsmengen von Zwischen- und Endprodukten unterliegen einem komplexen Wirkungsgeflecht, weshalb eine Angabe von Rebound-Effekten nur für einen bestimmten Zeitraum und ein geografisches Gebiet Sinn macht. Auf Makroebene zeigen die Beispiele jedoch, dass die durch IKT-Produktion, -Nutzung und -Entsorgung verursachten Massen- und Energieströme trotz Miniaturisierung insgesamt nicht abnehmen. Wie am Beispiel der LCD-Displays zu ersehen, kann eine produktspezifische absolute Materialeinsparung bei Desktop-Bildschirmen durch andere Anwendungen kompensiert werden. Am Ende des Lebensweges, beim Elektronikabfall, ist heute in den Industriestaaten sogar ein steiler Anstieg zu verzeichnen. Die Gründe sind vielschichtig. Nach Hilty (2003) spielen insbesondere drei Aspekte eine Rolle, warum sich Effizienzgewinne nur partiell in Umweltentlastungen niederschlagen:

- "Die Umweltbelastung durch die Produktion nimmt mit den Abmessungen der Produkte nicht proportional ab.
- Es werden für neue, „dematerialisierte“ Produkte neue Anwendungsbereiche erschlossen, um immer höhere Stückzahlen zu erreichen; anderenfalls würden sich die hohen Fixkosten der Produktion nicht amortisieren.
- Wie sich in 20 Jahren PC-Entwicklung gezeigt hat, führen Effizienzsteigerungen zu höheren Leistungsanforderungen, sodass sich nicht der Ressourcen-Input pro PC reduziert, sondern der Leistungs-Output erhöht. Dies ist ein typischer Rebound-Effekt" (Hilty, 2003, 179).

Obwohl es inzwischen eine umfangreiche Literatur zu Umwelteffekten der IKT gibt, sind solche Systemreaktionen bisher von wenigen Ausnahmen abgesehen, nur punktuell behandelt worden. Dies zeigt das Review von Yi und Thomas (2007) zum Stand der Forschung. Auch die Gesamtübersicht von Erdmann und Hilty (2010), die den Stand der Forschung über den makroökonomischen Einfluss von IKT auf Treibhausgasemissionen analysiert, macht dies deutlich.

Herkömmliche Ökobilanzen zu IKT-Anwendungen umfassen in der Regel nur die Analyse der primären und sekundären Effekte, weil durch die Normierung auf eine funktionelle Einheit die Befriedigung einer statisch vorgegebenen Nachfrage untersucht wird (Norris, 2003). Die in der Realität dynami-

schen Effekte von IKT haben ihren Ursprung in der Rückwirkung von tertiären Effekten auf primäre und sekundäre Effekte. Wenn ein Effizienzgewinn aufgrund von sekundären Effekten zu erwarten ist, aber zusätzliche Nachfrage die Minderung kompensiert (tertiäre Effekte), nennt man dies im Sinne der oben getroffenen Definition Rebound-Effekt. IKT hat das Potenzial, die Effizienz von Produktions- und Konsumtionsprozessen im Hinblick auf Kosten, Zeit, Energie, Material und andere Faktoren im ökonomischen System signifikant zu erhöhen. Um das zu untersuchende System in seiner Ganzheitlichkeit und vollen Komplexität abzubilden, ist eine Berücksichtigung von tertiären Effekten– insbesondere von Rebound-Effekten – in makroökonomischen Betrachtungen der Umwelteffekte von IKT unabdingbar.

Folgende Tabelle zeigt eine Auswahl neuerer makroökonomischer Studien und vergleicht diese.

Tabelle 14: Makroökonomische Studien zu IKT und Umwelt im Vergleich

	IPTS Studie	Telstra Studie	Ecofys Studie	WWF Canada Studie	Biointelligence Studie	GeSI Studie
Referenz	Erdmann et al. (2004)	Mallon et al. (2007)	Buttazoni (2008)	Gibson et al. (2008)	Labouze et al. (2008)	Climate Group und GeSI (2008)
Typ der Studie						
Basic approach	Bottom-up	Bottom-up	Bottom-up	Bottom-up	Bottom-up	Bottom-up
Granularität	IKT Anwendung	IKT Anwendung	IKT Anwendung	IKT Anwendung	IKT Anwendung	IKT Anwendung
Berechnungsmethode	System Dynamics Modell	Grundrechenarten	Grundrechenarten	Grundrechenarten	Grundrechenarten	Grundrechenarten
Untersuchungsrahmen						
Geographischer Bezug	Europa	Australien	Global	Kanada	Europa	Global
Geographische Auflösung	EU 15 und die 10 Beitrittsländer	Australien	verschiedene Ländergruppen	Kanada	EU 27	China, Europa, Indien, Nordamerika
Basisjahr	2000	2005	2005	2006	2005	2002
Zeithorizont	2020	2015	2030	2020	2020	2020
Quantitative Abdeckung der Effekte	Primäre, sekundäre, tertiäre Effekte	Sekundäre Effekte (nicht mit primären Effekten aggregiert)	Sekundäre Effekte	Sekundäre Effekte (nicht mit primären Effekten aggregiert)	Primäre, sekundäre Effekte	Primäre, sekundäre Effekte

Daten und Methode						
Schlüsseldaten und –annahmen	Offizielle EU Daten. Experten- und eigene Einschätzungen.	Offizielle Australien Daten und eigene Einschätzungen.	WEO, WBCSD und eigene Einschätzungen.	“realistic assumptions”	Offizielle EU Daten und eigene Einschätzungen.	McKinsey und eigene Einschätzungen.
Behandlung der Datenunsicherheit	Best case/worst case Simulation	Unsystematisch, qualitativ.	Systematisch, qualitativ. Unsystematisch, quantitativ.	Unsystematisch, qualitativ.	Unsystematisch, quantitativ.	Unsystematisch, qualitativ.
Behandlung der Zukunftsunsicherheit	Integrierte Szenarien	“One opportunity per application”	Potentiale (“low, medium, high”)	Ziele (“short term, stretch”)	Szenarien (Baseline, BaU, Eco)	Szenarien (BaU, SMART 2020)
Baseline	2020 GHG Emissionen mit IKT Entwicklung “frozen” in 2000	2005 GHG Emissionen	Unklare 2030 baseline für GHG Emissionen	Kanadas Kyoto-Verpflichtungen (- 6 % der 1990 GHG Emissionen (2008-2012))	EU 27 Stromverbrauchsprojektion 2020 mit 2005 GHG Emissionsfaktor	2020 GHG Emissionen in BaU Szenario
Maß für den IKT Einfluss gegen die baseline	2020 GHG Emissions für Szenarien	2015 GHG Mitigation Potentiale	2030 GHG Mitigation Potentiale	GHG Mitigation Ziele	2020 GHG Emissionen für Szenarien	2020 GHG Emissionen für Szenarien
Ergebnisse						

Gesamter IKT Einfluss	+2 % bis –19 % [in 2020 GHG Emissionen]	-27.3 Mt CO2e	-1168 bis -8711 Mt CO2e	-19.1 bis -36 Mt CO2e [7 % – 13.3 % of Canada's Kyoto obligations]	+0.1 % bis –5.5 % ohne CE +1.5 % to -4.6 % mit CE [in 1990 GHG Emissionen]	Bis zu –15 %
Einfluss nach IKT Anwendung	Einige positiv, einige negativ, einige ambivalent	Alle positiv	Alle positiv	Alle positiv	Alle positiv	Alle positiv

Quelle: eigene Darstellung, Erdmann und Hilty, 2010

Die Studien unterscheiden sich in ihren grundlegenden Ansätzen. Einige Studien basieren auf einem bottom-up Ansatz. Sie analysieren IKT-Anwendungen auf der Mikroebene (z. B. Effizienzgewinne durch einzelne Prozesse) und aggregieren die Effekte auf die Meso- und Makroebene. Andere Studien folgen einem top-down Ansatz, indem sie makroökonomische Indikatoren analysieren und einen IKT-Einfluss isolieren. Zwei Studien nehmen einen hybriden Ansatz als Ausgangspunkt. Sie sind in makroökonomischen Studien verankert, aber sie weisen den sektoralen IKT-Einflüssen einzelne IKT-Anwendungen zu (Laitner et al., 2001; Matsumoto et al., 2005). Mehrere der Studien enthalten zukünftige Anwendungen von IKT, wohingegen einige Studien nicht auf das Niveau einzelner IKT-Anwendungen desaggregieren. In keiner der Studien wird eine Diskussion über die Implikationen der Wahl einer bestimmten Messgröße für den IKT-Einfluss auf die Umwelt geführt. Sowohl Labouze et al. (2008) als auch Buttazoni (2008) nehmen punktuell quantitative Datenunsicherheitsanalysen vor, aber nicht für alle IKT-Anwendungen und Effekte systematisch. Erdmann et al. (2004) konzeptionalisieren Datenunsicherheiten als Differenzen zwischen Expertenschätzungen, die durch Diskussionen nicht aufgelöst werden konnten, und pflanzen die Fehlerbandbreite quantitativ bis zur Ergebnisdarstellung fort. Insgesamt differieren die methodischen Ansätze der ausgewerteten Studien sehr stark. Dies bedeutet, dass der Einfluss von IKT-Anwendungen auf die Umwelt nur innerhalb einer Studie sinnvoll miteinander verglichen werden kann, aber nur unter sehr großen Einschränkungen zwischen verschiedenen Studien.

Alle Studien, die die IKT-Effekte auf einzelne Anwendungen herunterbrechen, postulieren für jede einzelne untersuchte IKT-Anwendung netto einen reduzierenden Einfluss der IKT auf die Treibhausgasemissionen. Ausnahme ist die Studie von Erdmann et al. (2004). Sechs der im Detail analysierten Studien postulieren eindeutige Reduzierungen der gesamten Treibhausgasmissionen durch IKT. Vier Studien zeigen ein ambivalentes Bild. In der Studie von Erdmann et al. (2004) reicht der Einfluss von IKT von einem leichten Anstieg bis hin zu einer starken Reduzierung der Treibhausgasmissionen – abhängig von Daten- und Zukunftsunsicherheiten. Sowohl bei Matsumoto (2005), als auch in der

Studie von Labouze et al. (2008) können die negativen Primäreffekte unter bestimmten Bedingungen die positiven Sekundäreffekte übersteigen. Kuhndt et al. (2003) zeigen, dass der Einfluss von IKT auf die Treibhausgasemissionen für verschiedene Länder positiv oder negativ sein kann; je nach relativer Größe der drei berücksichtigten Effekte (Wachstums-, Strukturwandel- und Technologieeffekte) und dem Beitrag der privaten Haushalte.

Die Studien gehen methodisch auf die unterschiedlichen Effektebenen der IKT ein, belassen es aber bei der Abschätzung der Umweltentlastungspotenziale auf dem Niveau der Sekundäreffekte und ignorieren somit die in der Regel negativen Primär- und/oder Tertiäreffekte. Durch diese Einengung der Systemgrenzen kann der Eindruck entstehen, dass IKT per se umweltentlastend wirkt. Diese einseitige Perspektive verstellt aber den Blick auf die Bedingungen, unter denen einzelne IKT-Anwendungen umweltentlastend wirken oder nicht. Tertiäre Umwelteffekte (u. a. veränderte Lebensstile, raumstrukturelle Änderungen) werden kaum quantifiziert. Teilweise werden tertiäre Effekte gänzlich ignoriert (Gibson et al., 2008; McVeigh et al., 2009; Mallon et al., 2007), teilweise werden sie zwar erwähnt, aber mit dem Verweis auf die unsichere Datenlage ignoriert (vgl. Buttazoni, 2008; Labouze et al., 2008; Webb, 2008). Nur die Studie von Erdmann et al. (2004) berücksichtigt Primär-, Sekundär- und Tertiäreffekte, alle anderen Studien fokussieren auf Sekundäreffekte, wobei auch Primäreffekte angesprochen werden.

Im Folgenden soll daher auf die Kernergebnisse der Studie von Erdmann et al. (2004) detaillierter eingegangen werden.

Szenarioanalyse von Reboundeffekten der IKT nach IPTS 2004

In der Studie von Erdmann et al. (2004) wurde für 15 Kernländer der EU analysiert, welchen Einfluss die IKT auf verschiedene ökologische Indikatoren der EU bis zum Jahr 2020 nehmen kann. Untersucht wurde der Energieverbrauch, der Personen- und Güterverkehr, der Modal Split, der Anteil Erneuerbarer Energien im Strommix und die nicht rezyklierte Siedlungsabfallmenge. Mit Blick auf diese Indikatoren wurden die empirischen Befunde über die direkten und indirekten Effekten ausgewertet. Zudem ist systematisch für alle betrachteten Anwendungen die Intensität möglicher Rebound-Effekte von Experten geschätzt worden. Durch die Entwicklung verschiedener Zukunftsszenarien, die in Computersimulationen auf der Basis einer Modellierung durchgespielt wurden, konnten in der Studie die verschiedenen Umwelteffekte (primär, sekundär, tertiär), ihre Wechselwirkungen und damit auch Rebound-Effekte von IKT für die EU abgebildet werden¹⁷.

Die folgende Tabelle und Abbildung fasst die die Ergebnisse der Studie zusammen.

¹⁷ Das Datenmaterial wurde nachträglich nochmals nach Daten- und Zukunftsunsicherheiten bewertet (vgl. Erdmann und Hilty, 2010). Dabei zeigt sich, dass der Einfluss einiger IKT-Anwendungen auf die Umwelt vom gewählten Zukunftsszenario und den zugrunde gelegten Daten abhängt. Bei einigen anderen IKT-Anwendungen sind die Umweltentlastungen über die verschiedenen Datenunsicherheits- und Zukunftsszenarien hinweg robust, auch wenn das Ausmaß unsicher bleibt (IKT im Gebäudemanagement, virtuelle Güter). Im Bereich des Gebäudemanagements sind beide Typen von Unsicherheiten groß, was sowohl Forschungs- als auch Handlungsbedarf signalisiert

Tabelle 15: IKT Einfluss nach Anwendungsfeldern (EU, 2000-2020)

	Güterverkehr (tkm)	Persönverkehr (pkm)	Anteil privater PKW (%)	Energieverbrauch gesamt (TWh)	Anteil Erneuerbare im Strommix (%)	Treibhausgase (Mt CO ₂ -eq.)	Siedlungsabfälle, nicht recycelt (Mt)
IKT im SCM	-5,8 % bis -0,2 %			-1,1 % bis 0 %		-1,0 % bis 0 %	-5,8 % bis 0,2 %
Teleshopping	0 % bis +2 %	-3,2 % bis -2,9 %	+0,3 % bis +0,5 %	-0,9 % bis -0,3 %		-1,1 % bis -0,3 %	+0,6 % bis +0,7 %
Telearbeit und virtuelle Treffen		-4,3 % bis -3,3 %	-1,0 % bis +0,2 %	-1,4 % bis -0,8 %		-1,5 % bis -0,8 %	
Virtuelle Güter	-22,6 % bis -0,3 %			-10,9 % bis -0,1 %		-10,3 % bis -0,1 %	-22,6 % bis -0,3 %
IKT im Abfallmanagement							-4,3 % bis 0 %
Intelligente Verkehrssysteme	+12,4 % bis +28,3 %	+5,2 % bis +6,1 %	-8,9 % bis -3,1 %	+1,9 % bis +2,8 %		+1,9 % bis +2,7 %	
Smart grids				0 % bis +0,2 %	-1,9 % bis 6,7 %	-3,1 % bis -1,5 %	
IKT im Gebäudemanagement				-6,3 % bis -3,5 %		-7,1 % bis -3,5 %	
IKT in der Produktion	-4,1 % bis -0,1 %			-2,5 % bis -0,1 %		-2,6 % bis -0,1 %	-4,1 % bis -0,2 %
Mobiles Arbeiten		0 % bis +5,9 %	-7,7 % bis 0 %	-0,2 % bis +0,7 %		-0,1 % bis +0,9 %	

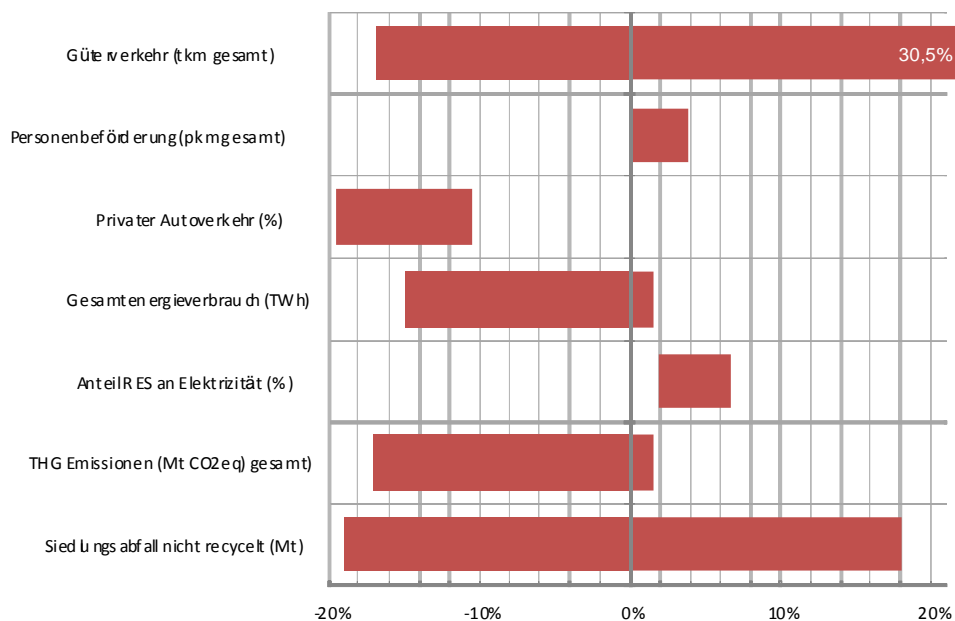
Die Ergebnisse beziehen sich auf eine „ICT freeze in 2000“ simulation bis 2020.

Quelle: Erdmann, Hilty, Goodman, Arnfalk 2004.

Die Ergebnisse der Modellberechnungen zeigen, dass der Einfluss der IKT stark von den Rahmenbedingungen abhängen wird. IKT alleine wird zu keiner Trendwende der Material- und Energiedurchsätze der Volkswirtschaften führen. Ressourceneffizienzpotenziale werden nur dann realisiert werden, wenn die politischen und ökonomischen Rahmenbedingungen einen effizienten Umgang mit natürlichen Ressourcen befördern. So könnte bei optimaler und gezielter Nutzung von IKT diese zu einer Reduzierung von Treibhausgasemissionen in der Größenordnung von rund 15 % der Gesamtemission

in der EU im Jahr 2020 beitragen. Besonders große Reduktionspotenziale werden dabei bei der Substitution physischer durch digitale Güter (E-Mails, Fotos, Musik usw.), bei IKT-gestützten Dienstleistungen (Online-Buchungen, Online-Banking etc.), der intelligenten Steuerung von Stromnetzen und Stromversorgung sowie im Bereich der Gebäudeautomatisierung gesehen. Die IKT kann nur als Schlüssel für ökologische Nachhaltigkeit verstanden werden, wenn die positiven Umwelteffekte von IKT maximiert und gleichzeitig die negativen minimiert werden. Andernfalls besteht sogar die Gefahr, dass Wachstumseffekte die Einsparungen kompensieren und die Gesamtbelastung steigt.

Abbildung 22: IKT Einfluss Gesamt (EU, 2000-2020)



Die Ergebnisse beziehen sich auf eine „ICT freeze in 2000“ Simulation bis 2020 und spiegeln primäre, sekundäre und tertiäre Umwelteffekte wider.

Quelle: Erdmann, Hilty, Goodman, Arnfalk, 2004.

Neben der Studie von Erdmann et al. (2004), die Umwelteffekte makroökonomisch modelliert, soll mit der Studie „Wiederverkaufskultur auf eBay“ (Behrendt, Blättel-Mink und Clausen, 2011) eine weitere Untersuchung herausgehoben werden. Dies geschieht deshalb, weil die Studie erstmals die Abschätzung möglicher Rebound-Effekte von Konsumprozessen im Bereich der IKT auf Basis einer breit angelegten Befragung von Nutzern und Nutzinnen fundiert.

Untersuchung der Konsumprozesse auf eBay (2011)

Hintergrund der Analyse ist die Beobachtung, dass Auktions- und Handelsportale im Internet das Konsumverhalten in den letzten Jahren tief greifend verändert haben. Sie haben unter anderem be-

wirkt, dass Konsumenten erworbene Produkte nach einer gewissen Zeit wieder verkaufen. Hier eröffnen sich Chancen für einen nachhaltigen Konsum, weil durch die Vermarktung gebrauchter Güter die Lebens- und Nutzungszeit von Produkten verlängert und Umweltbelastungen durch häufigeren Neuerwerb vermieden werden. Für die Analyse der Umwelteffekte des privaten Handels mit Gebrauchtgütern auf der eBay-Plattform wurde in der Logik von Ajzen und Fishbein (1980) ein Systemansatz entwickelt, der empirischen Ergebnisse mit Hilfe vereinfachter Ökobilanzierungsverfahren in Umwelteffekte übersetzt. Zur Erhebung realer Konsumprozesse und zur Abschätzung der realen Verhältnisse wurden empirische Befragungen über Alternativen zum Handel auf eBay unter den Verkäufern und Käufern und zur Nutzung der Produkte durchgeführt.

Allgemein ist festzustellen, dass auf Sekundärebene der Handel mit Gebrauchtprodukten auf eBay zu Umweltentlastungen führt. Mögliche Einspareffekte sind größer als die Umweltbelastung auf Ebene der Primäreffekte durch die IT- und Netzinfrastrukturen. Umweltentlastungseffekte sind aber nicht voraussetzungslos. Umweltentlastungseffekte treten nur ein, wenn sich der Konsum nicht zusätzlich beschleunigt. Positive Umweltwirkungen sind bei langlebigen und hochwertigen Produkten zu verzeichnen, deren Nutzungszeit durch den Wiederverkauf verlängert wird. Transportbedingte Umweltbelastungen müssen möglichst gering sein: Dies ist dann zu erwarten, wenn regional gehandelt wird und der Versand mit professionellen Versandunternehmen erfolgt. Der Gebrauchtwarenhandel entlastet die Umwelt in der Regel dann, wenn mit Produkten gehandelt wird, die vom Gebrauchtkauf für eine relevante Zeitspanne genutzt werden und die während der Nutzung keine Energie und/oder kein Wasser verbrauchen. Das sind 80 % der gehandelten Produkte auf eBay. Für strom- und wasserverbrauchende Produkte spielt das Alter der Geräte und damit die Effizienz der Geräte eine große Rolle, ob sich ein Gebrauchtkauf ökologisch lohnt. Effizienzgewinne von Neugeräten können die ressourcenschonenden Wirkungen durch die längere Nutzung der alten Geräte überwiegen. Hier gibt es einen Break-even-point. Antworten auf die Frage nach den Umwelteffekten können daher nur produktspezifisch gefunden werden. Hier zeigen die untersuchten Produktbeispiele deutliche Umweltentlastungspotenziale, was aber keine Gewähr für tatsächliche Umweltentlastungen ist, da die Umwelteffekte stark von Nutzungsbedingungen abhängen.

Die Befunde für die untersuchten Produktgruppen (Laptop, Möbel, Bücher etc.) zeigen zudem, dass tertiäre Umwelteffekte infolge und damit auch Rebound-Effekte von Konsumverschiebungen keine vernachlässigbare Größe darstellen, wie die folgende Tabelle zeigt. Wird konservativ geschätzt, dass ein eBay-User im Jahr rund 100 Euro einspart und für andere Ausgaben zur Verfügung hat, dann errechnet sich mit dem CO₂-Fussabdruck pro Euro bei 14,5 Millionen aktiven eBay-Nutzern ein Preis-Rebound-Effekt von gut 1,4 Mio. Tonnen CO₂. Unter Einbeziehung der Unsicherheiten wird der makroökonomische Preis-Rebound-Effekt durch den privaten Online-Handel mit Gebrauchtgütern auf 500.000 bis 2,5 Millionen Tonnen CO₂ geschätzt¹⁸. Diese Größenordnung kann das Ausmaß der

¹⁸ Die Bandbreiten resultieren aus dem unsicheren eingesparten Nettobudget (100-500 Euro), der zusätzlichen Berücksichtigung von Einkommenseffekten auf Verkäuferseite und der Spannweite der Elastizität der CO₂-Emissionen gegenüber dem verfügbaren Haushaltsbudget (0,53-1,06). Eine Studie für die Europäische Union (Tukker et al., 2006) legt einen CO₂-Fussabdruck pro Euro nahe, der in etwa doppelt so hoch liegt wie der aus der Dänischen Studie. Allerdings ist nur ein durchschnittlicher Wert für den CO₂-Fussabdruck pro Euro angegeben und es werden keine Grenzbetrachtungen angestellt, so dass dieser Wert schwer einzuordnen ist.

hochgerechneten CO₂-Emissionsminderung durch den Handel mit allen Produkten auf eBay übersteigen.

Tabelle 16: CO₂-Emissionen auf eBay im Überblick (CO₂-eq./a)

	Makroebene
Primäreffekte	Energieverbrauch der IT-Infrastruktur: +22.500 bis +67.500 t
Sekundäreffekte	Einsparung durch Gebrauchtwarenhandel: -300.000 bis -1.500.000 t
Tertiäreffekte	Kompensation durch Preis-Rebound-Effekte: +500.000 bis +2.500.000 t

Bandbreiten der CO₂-Emissionen auf der Mikroebene gemäß der analysierten Produkte; Bandbreite der CO₂-Emissionen auf der Makroebene unter Berücksichtigung weiterer Unsicherheitsfaktoren.

Quelle: Erdmann, 2011, eigene Darstellung

Die Dominanz des Preis-Rebound-Effektes in diesen Berechnungen erfordert eine vertiefende Betrachtung.

Zugrunde gelegt wurde der CO₂-Fussabdruck, der mit einer zusätzlichen Konsumeinheit in Euro verbunden ist. Die Größe von 0,98 kg CO₂-Äquivalent pro Euro wurde aus einer Dänischen Studie errechnet (Thiesen et al., 2008), in der eine Ausgabeneinsparung als der Aufstieg in eine höhere Einkommensklasse mit veränderten Ausgabemustern interpretiert wurde¹⁹. Die Studie greift auf Primärdaten zurück, die bis in das Jahr 1999 zurückreichen. Dieses Vorgehen kann zu einer Über- oder Unterschätzung des Einflusses des Rebound-Effektes von Preisdifferenzen führen:

Die Produktions-, Import- und Ausgabencharakteristik in Deutschland ist von der in Dänemark verschieden. Zudem hat es in Deutschland und in Dänemark seit 1999 womöglich Tendenzen gegeben, dass sich Haushaltsausgaben und CO₂-Fussabdruck entkoppeln. Der CO₂-Fussabdruck pro Euro ist keine Konstante, sondern kann durch Dematerialisierung und Dekarbonisierung der Volkswirtschaften verringert werden. Es ist unklar, ob der Deutsche CO₂-Fussabdruck pro Euro über dem Dänischen liegt und ob er sich im Zeitverlauf nennenswert verringert hat.

Der in Ökobilanzen verfolgte bottom-up Ansatz aggregiert verschiedene Einzelprozesse zu einem komplexen Gesamtbild. Makroökonomische Studien zu CO₂ versuchen dagegen, alle volkswirtschaftlichen CO₂-Emissionen den Aktivitäten einer Gesellschaft zuzuordnen. Zwischen beiden Ansätzen klafft eine CO₂-Lücke. Am Beispiel von Notebooks wurde untersucht, in welchem Maße der bottom-up Ansatz der Ökobilanzierung zu einer Unterschätzung der produktionsbedingten Umwelteffekte führt (Deng et al., 2008). Der verwendete hybride Ansatz identifizierte einen rund doppelt so hohen Energieaufwand in der Produktionsphase als bisher vermutet. Die Hybridisierung von Datensätzen in der Umweltforschung, auch wie sie von Erdmann 2011 vorgenommen wurde, ist methodisches Neuland. Sie überschätzt den Preis-Reboundeffekt tendenziell.

¹⁹ Schwerpunktausgabe des Journal of Industrial Ecology 14(1) aus dem Jahr 2010.

Die Dänische Studie hat die Ausgabenstruktur von fünf Einkommensgruppen zur Grundlage genommen und innerhalb der einzelnen Einkommensgruppen die Ausgaben und CO₂-Fussabdrücke interpoliert. Die an vergrößerte Budgets gekoppelten CO₂-Emissionen hängen von den real getätigten Ausgaben ab. Neben dem Zusatzkonsum gemäß eines durchschnittlichen Ausgabenmusters gibt es weitere CO₂-ärmere Optionen: Das Geld kann z. B. für teureren Konsum ausgegeben werden und geringwertigen Konsum gleicher Art ersetzen (z. B. Obst aus biologischem Landbau anstelle von konventionell angebautem Obst). Anders herum wird Geld – nach Befriedigung der Grundbedürfnisse – für so unterschiedliche Dinge wie Flugreisen und Opern-Besuche ausgegeben, deren CO₂-Fussabdruck pro Euro sich um Größenordnungen unterscheidet. Dieser Faktor kann zu einer Unter- oder Überschätzung der Preis-Reboundeffekte führen²⁰.

Die Preis-Rebound-Effekte sind aus Käuferperspektive formuliert worden. Auch aus Verkäuferperspektive lassen sich Preis-Rebound-Effekte ansetzen, da der Verkäufer durch seine Einnahmen sein verfügbares Budget erhöht. Diese Verkäuferperspektive ist nicht alternativ, sondern zusätzlich zur Verkaufersperspektive zu verstehen. Die systematische Erfassung der Verkäuferperspektive und ihre Relation zur Käuferperspektive ist ein eigenes Unterfangen, das im Rahmen dieses Projektes nicht geleistet werden konnte. Die Vernachlässigung dieses Faktors trägt zur Unterschätzung des Preis-Rebound-Effekts bei.

Trotz dieser Einschränkungen sind die Ergebnisse für die Umwelteffekte des Online-Handels mit Gebrauchsgütern so zu interpretieren, dass eine seriöse Einschätzung der Umwelteffekte auf Basis der primären und sekundären Effekte allein nicht möglich ist, sondern zwingend eine empirische Fundierung und Berücksichtigung von Preis-Rebound-Effekten erfordert.

8.3 Abschätzung möglicher Rebound-Effekte bis 2020

Da bis dato keine Gesamtübersicht über mögliche Rebound-Effekte der IKT vorliegt, wird im Folgenden eine systematische Abschätzung vorgenommen. Dabei wird qualitativ geprüft, welche Rebound-Effekte bei Effizienzsteigerungen auftreten können. Wie in den vorangegangenen Kapiteln wird zwischen Green in der IT und Green durch IT unterschieden.

Mögliche Rebound-Effekte „Green in der IT“

IKT zeichnet sich durch eine hohe Innovationsgeschwindigkeit und einen schnellen Wandel der Produkt- und Gerätevielfalt aus. Bei kaum einer anderen Produktgruppe ist deshalb in den letzten Jahrzehnten der Ressourceneinsatz pro Funktion gesunken wie bei der Informationstechnik. Auch in Zukunft rechnet die IKT Branche mit erheblichen Fortschritten bei der Material- und Energieeffizienz.

²⁰ Inzwischen gibt es eine Reihe weitere Untersuchungen zum CO₂-Fussabdruck pro Euro, für Deutschland ist allerdings keine bekannt. Eine neuere Studie aus der Schweiz (Girod und de Haan, 2010) gibt Elastizitätswerte der CO₂-Emissionen in Abhängigkeit von den Konsumausgaben mit 0,53 bis 1,06 an. Die Unterschiede liegen in der Berücksichtigung der Haushaltsgröße und der Bezugsgröße funktionelle Äquivalenz versus Haushaltsausgaben begründet. Wir haben in unserer Studie die Haushaltsausgaben mit der funktionellen Äquivalenz, nämlich der Restnutzungsdauer, gewichtet. Auch wenn die Elastizität von 0,53 angesetzt wird, überkompensiert der Preis-Rebound-Effekt von 54,8 kg CO₂-Äquivalenten die Einsparung durch eBay anstelle der alternativen Präferenz in Höhe von 43,7 kg CO₂-Äquivalenten.

Smart 2020 geht davon aus, dass bis zum Jahr 2020 mehr als die Hälfte (-53 %) der 2007 von IT in Deutschland direkt ausgestoßenen CO₂-Menge verringert werden kann. Dem stehen das weitere Wachstum und die Dynamik der IKT gegenüber. Innerhalb weniger Jahre kommen völlig neue Produkte auf den Markt bzw. vorhandene Produkte werden durch neue digitale Produkte ersetzt. Hinzu kommen sehr kurze Produktlebenszyklen. Dies bedeutet eine Ausweitung des IT-Gebrauchs, so dass mit einer generellen Zunahme der produzierten, genutzten und zu entsorgenden IT zu rechnen ist.

Auf **Komponentenebene** setzt sich der Trend hin zu immer kleineren, höher integrierten Systemen fort. Neben der Weiterentwicklung der Produktionsprozesse und der Strukturgrößen wird die Miniaturisierung durch die Erweiterung der Funktionalitäten durch die Integration von Funktionalitäten in integrierte Schaltungen gefördert. Die Hardware-Hersteller forcieren die Entwicklung von sparsamen Prozessoren und Speichern, und setzen dabei auf eine noch stärkere Systemintegration mit immer niedrigeren Übertragungsleistungen durch Miniaturisierung, neue Materialien und Wirkprinzipien sowie abgestuften Power-Management. Weitere Optionen liegen in einer Verringerung des Energiebedarfs der anderen stromverbrauchenden Einheiten in Geräten (z. B. Beleuchtung, Kühlung, Sensormodule, rotierende Teile wie Festplatten). Displays auf Basis von OLED benötigen weniger Strom, da die Bildelemente im Gegensatz zu den heutigen TFT-Bildschirmen, die eine Hintergrundbeleuchtung benötigen, selbst Licht emittieren. Generell ließe sich vermuten, dass Miniaturisierung, Integration und Energieeffizienz der IKT zu einer Verringerung der IKT-bedingten primären Umweltentlastungen führt. Auf der anderen Seite führt genau dieses Effizienzwachstum dazu, dass die Produkte immer kleiner und preiswerter werden. Effizienzsteigerung und Verbilligung elektronischer Schaltkreise ermöglichen, dass Mikroprozessoren zunehmend „unsichtbar“ in andere Maschinen integriert werden. Auch einfache Hausgeräte werden dadurch "smart" und durch Vernetzung mit anderen Geräten kommunikationsfähig. Gleichzeitig erlauben neue Speichertechnologien immer größere Datenmengen mit immer geringerem Aufwand (an Geld, Raum und Technik) zu nutzen. Rebound-Effekte sind deshalb wahrscheinlich. Allein wegen der hohen Kapitalintensität vieler Produktionsprozesse, insbesondere der Halbleiterindustrie, wird die Industrie zur Re-Amortisation immer neue Absatzmärkte zu erschließen versuchen müssen und damit den Output der Produktion ausweiten. Während die Komponenten alle 3 Jahre um 20 % kompakter werden, verdoppeln sich die Kosten für eine Produktionsstätte im gleichen Zeitraum (PwC, 2009). Die hohen Fixkosten bei kapitalintensiver Produktion zwingen die Hersteller zu einem hohen Produktausstoß. Es werden dann also erneut neue Märkte erschlossen werden, die die abgesetzten Mengen insgesamt ausweiten (Re-Investitions-Effekte, Neue-Märkte-Effekte).

Auf **Endgeräteebene** übersetzt sich die Technologiedynamik bei Komponenten in höhere Energieeffizienz und bei einigen Produkten auch in höhere Materialeffizienz. Gesetzliche Regelungen haben diese Entwicklung begleitet und beschleunigt. So konnte der spezifische Energieverbrauch von informations- und kommunikationstechnischen Geräten bezogen auf die einzelne Produkteinheit deutlich gesenkt werden. Der Energieverbrauch von Desktop PCs ging zwischen 2007 und 2012 um rund 10 % zurück, der von Spielekonsolen um über 40 % und der von TV-Flachbildschirmen um über 65 % und

damit um den Faktor 3 zurück²¹. Ähnliches gilt für neuere mobile Endgerätegenerationen, die sparsamer als bisherige arbeiten. Diese Effizienzfortschritte werden durch Rebound-Effekte geschmälert. So begünstigen Effizienzfortschritte bei TV-Flachbildschirmen einen Trend zu größeren Formaten. Am Markt fallen deshalb die Effizienzgewinne geringer aus. Möglich wäre eine Leistungsaufnahme von 45 Watt für ein 32“-Gerät gegenüber 150 Watt fünf Jahre früher. 40“ große Geräte benötigen 80 Watt, vor fünf Jahren waren es noch 240 Watt. Aufgrund von Rebound-Effekten, die größere Diagonalen aufgrund höherer Effizienz immer preiswerter werden lassen, sinkt der Stromverbrauch nicht um Faktor 3, sondern er halbiert sich, weil er um 35 Watt über den möglichen Energieverbrauchswert der kleineren Bildschirmdiagonale liegt. Auch bei anderen Endgeräten sind ähnliche Rebound-Effekte möglich, allein schon deshalb weil der Gerätebestand wächst. Fraunhofer ISI/IZM (2009) geht für Deutschland von einem Anstieg des Gerätebestands bei Computern und Peripherie in Haushalten von ca. 40 % bis zum Jahr 2020 aus, bei mobilen Geräten sogar um 50 % (Basisjahr 2007). In Unternehmen und Behörden wird mit einem Anstieg von PC, Laptop und deren Peripherie um ca. 20 % gerechnet.

Hinzu kommen die zunehmende Nutzung des Internets und die damit verbundene Inanspruchnahme von **Servern und Rechenzentren** (Fichter, Beucker und Clausen, 2009). Das weltweite Verkehrsaufkommen im Internet verdoppelt sich alle 18 Monate. Ein Ende dieser Entwicklung ist nicht abzusehen. Auf Modellrechnungen (z. B. „Cisco Systems Inc. Global IP Traffic Forecast and Methodology, 2007) basierende Prognosen lassen erwarten, dass sich dieser Trend aufgrund verschiedener Effekte noch verstärkt. Einer Prognose von Cisco zufolge soll der monatliche IP-Verkehr in Deutschland binnen fünf Jahren von 1,0 Exabytes (2010) auf 4,1 Exabytes (2015) steigen und sich damit mehr als vervierfachen²². Treiber sind insbesondere Fortschritte im Bereich des hoch auflösenden Fernsehens (HDTV) und die Zunahme von Audio- und Video-Daten sowie der Interaktivität und Personalisierung von digitalen Dienstleistungen. Allein die Datenmenge für Videos wird sich voraussichtlich von 0,2 Exabytes im Jahr 2010 auf 2,2 Exabytes pro Monat im Jahr 2015 in Deutschland erhöhen. Das Wachstum dabei wird auch durch die Zunahme der Material- und Energieeffizienz stimuliert, die sich in steigenden Anschlussbitraten und weiter sinkenden Kommunikationskosten äußert. Angesichts der Größe der Zuwachsrate dürften im Trend liegende Effizienzmaßnahmen deutlich überkompensiert werden. Die Smart 2020 Studie rechnet im Business-as-usual-Szenario damit, dass Rechenzentren und Server 2020 absolut 25 % höhere Emissionen an CO₂ verursachen als 2007 (BCG, 2009).

Ebenfalls steigen wird der Energieverbrauch der **Telekommunikationsinfrastruktur**. An der jährlichen Zunahme des Verkehrsaufkommens von 50 % bis 100 % in den IKT-Netzen hat auch die starke Zunahme der Mobilfunkanwendungen einen erheblichen Anteil. Wie sich dies konkret auswirkt, ist schwer abschätzbar, da sich verschiedene, gegenläufige Entwicklungen überlagern und aktuelle Daten nicht verfügbar sind. Während sich durch den Ersatz von Kupferanschlüssen durch Glasfaser Ein-

²¹ Lutz Stobbe, Alexander Schlösser, IZM 2011, Zahlen basieren auf den jährlichen Energieverbrauch (in kWh/a) von Energy Star Produkten in 2012

²² www.ciscovni.com_forecast/advanced.html

sparungen von rund 20 % ergeben können, steigt der Energieverbrauch der mobilen Netze²³, der aus der flächendeckenden Verbreitung der 3. und 4. Generation und WLAN-Hotspots resultiert (BCG, 2010). Voraussichtlich dürften die Effizienzgewinne teilweise kompensiert werden.

Tabelle 17: Mögliche Rebound-Effekte „Green in der IT“

IKT	Effizienz	Rebound-risiko	Mechanismen	Typ
Bauelemente	Energieeffizienz nimmt zu; spezifische Umweltbelastung nimmt ab	mittel	Leistungssteigerung, z.B Entwicklung schneller Speicher erlaubt neue Anwendungen; wesentlich höhere Datenraten gegenüber heutigen Systemen erforderlich	Re-Investitions-Effekt
Endgeräte	Geräte werden kleiner, multifunktionaler, energieeffizienter; Systemlösungen (Thin clients & web based Computing, Cloud-Computing)	gering-hoch	Miniaturisierung, Systemintegration, Leistungssteigerung; Einsatzfelder nehmen zu Geringer Rebound-Effekt in gesättigten Teilmärkten (z. B. Mobiltelefone); Aufbau neuer IT-Infrastrukturen (z. B. für Thin client und Web based Computing) schmälert Effizienzgewinne bei Endgeräten	Neue Märkte-Effekt; Embodied-Energy-Effekt
Rechenzentren	Energieeffizienz des Internets verdoppelt sich alle 2 a ²⁴	Mittel bis hoch	Weltweites Datenvolumen verdoppelt sich im Durchschnitt alle 18 Monate. Die durch Energieeffizienzmaßnahmen reduzierten Stromverbräuche werden in den kommenden Jahren durch steigende Strompreise ausgeglichen oder sogar überkompensiert, so dass es aktuell nicht zu einer Reduzierung der Stromkosten von RZ-Betreibern und damit nicht zu frei werdenden Mittel für Re-investitionen kommt.	Re-Investitions-Effekt

²³ Der Energieverbrauch in UMTS-Netzen des Mobilfunks beträgt zurzeit ca. 80 kWh/GB. Der Wert ist ermittelt auf der Basis realer UMTS-Standorte unter realer Kapazitätsauslastung. Dies bedeutet, er beinhaltet die Energieverbräuche von Netzwerkequipment, Klimatisierung, Stromversorgungsanlagen und sonstigen Verbrauchern am Funkstandort. Nicht enthalten sind Stromverbräuche aus dem Bereich des Core networks sowie anteilige Stromverbräuche aus Verwaltungsstandorten etc.

²⁴ Der Energieverbrauch des Internets wurde in einer Arbeit von Tayler and Koomey, 2006 auf 9 16 kWh/GB geschätzt. Weber et al., 2009 rechnete diese Werte hoch auf das Jahr 2008 mit der Annahme, dass sich die Energieeffizienz alle 2 Jahre verdoppelt und erhalten einen Wert von 7 kWh/GB. Teehan et al., 2010 präsentieren in ihrem Vortrag einen Wert von 3,6 kWh/GB auf dem International Symposium for Sustainable Systems and Technology, 2010. Dieser Wert ist konsistent mit anderen veröffentlichten Werten (Chandaria et al., 2011). Daher wird er als Grundlage für die Abschätzung genommen.

Netze	Netze werden effizienter und breitbandiger.	hoch	Der Verkehr in den Netzen steigt seit über 15 Jahren um 50% bis 100% pro Jahr. Der Trend setzt sich fort. Steigender Energiebedarf entsteht u.a. durch den steigenden Bandbreitebedarf der Local Area Networks (LAN) und den Betrieb von Hochgeschwindigkeits-LANs.	Re-Investitions-Effekt
-------	---	------	---	------------------------

Quelle: Eigene.

Tabelle 17 zeigt einen Überblick über mögliche Rebound-Effekte. Die Effizienzfortschritte und die Marktdynamik der IKT unterliegen einem komplexen Wirkungsgeflecht, weshalb eine Angabe von Rebound-Effekten nur für eine bestimmte Betrachtungsebene (Komponenten, Rechenzentren oder Endfunktionen) Sinn macht. Die Folgen dieser technologischen Entwicklung für den Ressourcenbedarf der IKT sind keineswegs klar und zum Teil gegenläufig. Miniaturisierung und Leistungssteigerung bedeuten zunächst eine Verringerung des Ressourcenbedarfs (Fichter et al., 2009). Gleichzeitig steigen damit aber auch die möglichen Einsatzfelder der Informations- und Kommunikationstechnik.

Es wird ersichtlich, dass Effizienzsteigerungen auf allen Ebenen zu Rebound-Effekten führen können. Dies wird maßgeblich aus der weiterhin wachsenden Anzahl von Computern (PCs, Notebooks, Home-server), Fernsehgeräten und mobilen Geräten (Smartphones, TabletPCs etc.), dem Trend zu größeren TV-Bildschirmen und High Definition Video-TV sowie der stark zunehmenden Nutzung des Internets und neuer Anwendungen bestimmt. Dadurch kommt – wie der Verband Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik VDE in einem Positionspapier (2009) feststellt – „ein sich selbst beschleunigender, technologiegetriebener Wachstumsprozess in Gang, der einerseits neue Anwendungen ermöglicht und andererseits durch die Anforderungen neuer Anwendungen getrieben wird“ (VDE, 2009). Sollten in den kommenden Jahren über die am Markt zu beobachtenden Energieeffizienzsteigerungen bei Geräten und Infrastrukturen nicht erhebliche zusätzliche Anstrengungen unternommen werden, dann ist mit einem weiteren Anstieg des IKT-bedingten Stromverbrauchs auf 70 bis 90 TWh in Deutschland bis zum Jahr 2020 zu rechnen²⁵. Re-Investitions-Effekte, Embodied-Energy-Effekte und Neue-Märkte-Effekte sind mit dafür verantwortlich.

Mögliche Rebound-Effekte „Green durch IT“

Noch komplexer sind mögliche Rebound-Effekte auf Anwendungsebene, da sich umweltentlastende und –belastende Effekte überlagern. Im Folgenden greifen wir die im vorangegangenen Kapitel beschriebenen IT Anwendungen auf, da sie ein signifikantes Potenzial zur Umweltentlastung haben (Green durch IT): Smart buildings, Smart logistics, Smart grid, Smart motors und Dematerialisierung.

Mit Blick auf **Smart Building** sind Rebound-Effekte dort zu erwarten, wo Regelungen und Steuerungen von gebäudetechnischen Funktionen nicht nur zur Steigerung der Energieeffizienz dienen, son-

²⁵ Alexander Schlösser, Fraunhofer IZM, Wissenschaftsforum Green IT, Jahreskonferenz 2010

dern dazu beitragen, dass mit der Vernetzung andere Applikationen verwirklicht werden, die einen zusätzlichen Strombedarf mit sich bringen können. Dies ist der Fall, wenn Sicherheits-, Unterhaltungs- und Vernetzungssysteme verwirklicht werden, welche den Bewohnern mehr Komfort und Sicherheit bringen sollen. Zu den technischen Einrichtungen zählen u. a. Sicherheitssysteme mit Einbruchsmeldung, Raumüberwachung, drahtlose Notrufsysteme, sprachgeführte Bedienung, Fernalarmerung, Brandmeldung und Zutrittskontrolle, Touch Screens in der Küche sowie Haushaltsgeräte, die untereinander vernetzt und an das Internet angeschlossen sind. Wesentliche Komponenten sind Bedienoberflächen und Monitoringgeräte. Dabei werden Leit-, Steuerungs- und Feld-Layer so aufeinander abgestimmt, dass der Betrieb von Anlagen automatisch überwacht und geregelt wird. Diese Sachverhalte haben erheblichen Einfluss auf die Ressourceneffizienz und den Materialverbrauch „smarter“ Gebäude. Im Extremfall kann der Stromverbrauch infolge Vernetzung sogar höher ausfallen als bei konventionellen Häusern, wie aus dem Schweizer Pilotprojekt „Futurlife“ hervorgeht²⁶. Allerdings besteht noch erhebliches Optimierungspotenzial, so dass die Höhe solcher Effekte geringer ausfällt. Statt der Vernetzung des gesamten Hauses könnte auch die Optimierung und Vernetzung einzelner Komponenten bereits eine geeignete Strategie darstellen, um Ressourceneffizienzgewinne zu erzielen und dabei Rebound-Effekte zu vermeiden. Der „Final Report – Impacts of ICT on Energy Efficiency“ der europäischen Kommission DG INFSO beziffert die Einsparungen auf 35 bis 45 %²⁷. Mittels Lichtregelung und -steuerung lassen sich gemäß Angaben der Energieagentur NRW mit einer optimierten Beleuchtungsanlage noch bis zu 50 % Energie einsparen²⁸. Die Hochschule Biberach berechnet in einer Studie zur Raum- und Gebäudeautomation das Energieeinsparpotenzial durch Automatisierung im Bereich des Sonnenschutzes auf 4 bis 27 %, im Bereich der Beleuchtung auf 13 bis 30 %. Das größte Einsparpotenzial kann dadurch erreicht werden, dass mehrere Funktionen für verschiedene Gewerke miteinander kombiniert werden. Hierbei ergibt sich eine Einsparung bis zu 40 %. Direkte Rebound-Effekte sind diesbezüglich gering. Indirekte-Rebound-Effekte ergeben sich durch Einkommens-Effekte. Auch psychologisch motivierte Rebound-Effekte sind möglich.

Im Bereich **Smart Logistics** sind mögliche Rebound-Effekte ausgeprägter. IKT wird dazu eingesetzt, um Informationen über das Verkehrsangebot zu verbreiten, Verkehr zu lenken und den Verkehr flüssiger zu machen. Durch eine Logistik ohne Medienbrüche (z. B. durch Objektidentifikation mittels Smart Labels zur berührungslosen Identifikation von Transportgut) ermöglichen sie eine Optimierung der betrieblichen Prozessabläufe und sparen Zeit. IKT kann allerdings auch verkehrserzeugende Wir-

²⁶ Mit 8'750 Kilowattstunden pro Jahr ist der Bezug im Smart Home beinahe doppelt so groß, wie in einem vergleichbaren Haushalt von 1992. Verschiedene Gerätekategorien, speziell die Beleuchtung und der Bereich Unterhaltung und Kommunikation, tragen zu dieser Zunahme bei. Mehrere Kategorien sind dazugekommen, die 1992 noch gar nicht einzeln ausgewiesen wurden, so der Bereich Pflege und Gesundheit und natürlich die Geräte der Steuerung und Vernetzung. Bei anderen Anwendungen ist der Strombezug tiefer, als 1992, so bei der „Weissen Ware“ und im Bereich „Energie & Klima“. Der zusätzliche Strombezug der Geräte, die der Vernetzung dienen oder direkt damit im Zusammenhang stehen, beträgt ca. 2.400 kWh pro Jahr.

²⁷ ftp://ftp.cordis.europa.eu/pub/fp7/ict/docs/sustainable-growth/ict4ee-final-report_en.pdf (S. 157ff)

(18.4.2012)

²⁸ <http://www.ea-nrw.de/unternehmen/page.asp?TopCatID=&CatID=3905&RubrikID=3905> (10.5.2012)

kung haben. Wenn beispielsweise Navigationssysteme in Fahrzeugen zu einer Verringerung von Staus durch längere Umwege durch das Nebenstraßennetz beitragen, wird das Entlastungspotenzial verringert. Bisherige Erfahrungen mit zeitsparenden Verkehrstechniken haben gezeigt, dass durch die Beschleunigung kein absoluter Rückgang der Umweltbelastung eintreten muss. Die Belastung kann absolut betrachtet sogar zunehmen. Beispielsweise haben schnellere Verkehrsmittel nicht dazu geführt, dass wir durchschnittlich weniger Zeit im Verkehr verbringen. Vielmehr haben die zurückgelegten Entfernungen zugenommen. Die zunehmende Durchdringung des Verkehrssektors mit IKT wird an diesen Mechanismen wenig ändern. Ob Anwendungen der IKT im Verkehr in der Gesamtbilanz zur Ressourcenschonung führen, ist letztlich von verkehrspolitischen Entscheidungen abhängig. Von Bedeutung sind diesbezüglich insbesondere IT-Konzepte zur Verlagerung von Verkehrsströmen auf ressourcenschonendere Verkehrsmittel. In begrenztem Umfang können sie physischen Verkehr ersetzen und den Straßenverkehr flüssiger machen. Mit geringen Rebound-Effekten ist beispielsweise bei einer IKT-gestützten Städtetaut zu rechnen. In Stockholm, wo 2007 eine solche Taut eingeführt wurde, ging der Verkehr um 25 % zurück. Gleichzeitig stieg die Anzahl der Nutzer des Öffentlichen Nahverkehrs deutlich an. Die verkehrsbedingten Treibhausgasemissionen verringerten sich um 40 % (BCG, 2009).

Bei **Smart Grids** wird durch Mess- Steuerungs- und Regelkonzepte die Leistungsfähigkeit der Stromnetze erhöht, viele kleine dezentrale Erzeuger können integriert und fluktuierende erneuerbare Energien ins Netz geregelt eingespeist werden. Teil eines solchen intelligenten Stromnetzes sind Konzepte, wie die des virtuellen Kraftwerks, bei dem räumlich verteilte Erzeuger (sowie Energiespeicher und Verbraucher) über geeignete Automationstechnik so gesteuert werden, dass sie sich virtuell ähnlich verhalten wie ein klassisches Großkraftwerk. Damit ist es möglich, fluktuierende Erzeugung (aus Wind und Sonne) mit regelbaren Kleinsterzeugern (aus Biomasse und Kraft-Wärme-Kopplung) und gezielten Maßnahmen zur Verbrauchssteuerung (Demand-Side-Management) so zu kombinieren, dass zuverlässig bedarfsgerecht Strom zur Verfügung gestellt wird. Aktuell werden die ersten virtuellen Kraftwerke in Pilotprojekten entwickelt und getestet. Rebound-Effekte sind kaum zu erwarten. IKT ist vielmehr ein Enabler für den Ausbau der erneuerbaren Energien. Anders sieht es bei IT gestützten Maßnahmen zur Erhöhung der Transparenz des Stromverbrauchs und der daraus resultierenden Einsparung aus. Konzepte dazu werden als Smart Metering zusammengefasst. In Deutschland gibt es derzeit über 100 laufende oder bereits abgeschlossene Pilotprojekte, die in der Mehrzahl der Erprobung der neuen Technik dienen. Das Einsparpotenzial wird auf durchschnittlich 5 % geschätzt. Außerdem kann das Lastmanagement optimiert werden. Neben dem zeitaufgelösten Auslesen (ggf. in real-time) von Verbrauchs- und Erzeugungsdaten soll es auch die Möglichkeit geben, Informationen (z. B. aktueller Strompreis) weiterzugeben oder Steuerungsbefehle (etwa zum Ausschalten bestimmter Verbraucher) abzusetzen. Energieversorger können dadurch Stromangebot und -nachfrage besser steuern, indem sie in verbrauchsarmen Zeiten Strom zu niedrigen Preisen, bei großer Nachfrage zu hohen Preisen anbieten. Erste Schätzungen gehen beim kombinierten Angebot von intelligenten Zählern und variablen Tarifen von Energie- und Kosteneinsparungen zwischen 3 und 20 % aus. Cap Gemini gibt das Einsparpotenzial sogar mit 32 % des Jahresenergieverbrauchs der deutschen Haushalte für Wohnen an. Cap Gemini geht dabei von einem Verlagerungspotenzial zwischen 14 TWh/a und 33 TWh/a aus. Das entspricht 9,9 % und 23,8 % des Jahresenergieverbrauchs der Haus-

halte in Deutschland für Wohnen. Die Bundesnetzagentur hat in einer neuen Studie derart hohe Einsparpotenziale in Frage gestellt und für einen Haushalt mit 3165 kWh eine Einsparung von 1,9 bis 8 % errechnet²⁹. Die Deutsche Energieagentur hält 5 bis 10 % für realistisch. Eine Studie der Universität Delft zeigte, dass sich die anfänglich großen Energieeinsparungen nicht halten lassen³⁰. In manchen Fällen konnten gemäß einem Review von Fischer (2007) über Energieverbrauchsfeedbacksysteme auch gar keine oder sogar negative Effekte festgestellt werden. Über eine Zunahme des Energieverbrauchs bei Haushalten mit geringem Energieverbrauch wird auch in einem Review von Abrahamse et. al (2005) berichtet. Hier liegen offenbar Rebound-Effekte vor, die Energieeffizienzgewinne kompensiert haben. Damit sich die Einsparungen realisieren lassen, müssen eine Reihe von Voraussetzungen erfüllt sein. So stellt die Bundesnetzagentur fest: „Der Rollout selbst trägt zur Energieeffizienz nicht bei. In Bezug auf die Energieeffizienzziele begänne die eigentliche Aufgabe erst mit der anschließenden Überzeugung des Verbrauchers, die Möglichkeiten der intelligenten Technik im Alltag in Energie- oder Kostensparmaßnahmen umzusetzen“ (Bundesnetzagentur, 2010, 82). Darüber hinaus werden die Umweltbelastungen, die durch die Produktion, den Einbau und den Betrieb derart komplexer Systeme entstehen, in den Potenzialabschätzungen nicht berücksichtigt. Erste Abschätzungen zeigen, dass diese Embodied-Energy-Effekte teilweise Effizienzgewinne kompensieren können³¹.

Im Bereich **Smart Motors** treten Rebound-Effekte aufgrund von Kosteneinsparungen in Form von Re-Investitions-Effekten auf. Relativ gut dokumentiert sind die Energieeinsparpotenziale durch IKT im Bereich der intelligenten Motorensteuerung und anderer Automatisierung, d. h. einer bedarfsgerechten Steuer- und Regelung von Maschinen und Anlagen. Laut ZVEI besitzt die Prozess- und Fertigungsautomation ein Gesamtpotenzial von 10-25 % zur Energieeinsparung. Allein durch den Einsatz von Antrieben mit Frequenzumrichtern anstelle herkömmlicher elektromotorisch betriebener Motoren ließe sich der Stromverbrauch um 27,5 TWh. pro Jahr in Deutschland reduzieren. Dies entspricht einem Einsparvolumen von 15 % des gesamten industriellen Stromverbrauchs und hat einen Gegenwert von 2,2 Mrd. EUR Stromkosten jährlich. Geld, das zusätzlichen Investitionen zur Verfügung steht (Re-Investitions-Effekt) oder zu Preissenkungen eingesetzt werden kann (Marktpreis-Effekt) und auf diese Weise Rebound-Effekte auslöst. Unternehmen reagieren im Allgemeinen auf Effizienzerhöhungen mit einer Nachfrageausweitung. Belastbare Daten und Fakten über die Größe dieser Rebound-Effekte liegen bis dato nicht vor.

Die Substitution physischer Produkte durch digitale Alternativen ist eine Möglichkeit zur Dematerialisierung. Beispiele hierfür sind der Ersatz von Papierrechnungen durch digitale Varianten per E-Mail, digitale Musik anstelle von CDs oder eBooks und ePaper statt gedruckte Bücher und Zeitungen.

²⁹ http://www.bundesnetzagentur.de/cae/servlet/contentblob/151968/publicationFile/6321/Bericht_ZaehlMesswesenpdf.pdf (68ff) (22.11.2010)

³⁰ http://www.strom-magazin.de/strommarkt/smart-meter-bringen-nur-kurzfristigen-spareffekt_29026.html (24.11.2010)

³¹ Umweltbundesamt 2012, Ressourcenschonung im Aktionsfeld Informations- und Kommunikationstechnik, UFOPLAN 2009 FKZ 3709 95 308

Durch den Ersatz von physischen Gütern durch elektronische Nutzungsalternativen rechnet die Boston Consulting Group in ihrer Studie SMART 2020 mit einem Reduktionspotenzial der Treibhausgase von 4,5 Mio. Tonnen CO₂e. In der Studie des IPTS (2006) wird virtuellen Gütern das größte Treibhausgas-minderungspotenzial zugewiesen. Es handelt sich dabei um ein theoretisches Potenzial, deren Realisierung von einer Vielzahl von Variablen abhängt. Rebound-Effekte spielen dabei eine erhebliche Rolle. So werden elektronische Zeitungen, die aus dem Netz heruntergeladen werden, teilweise nach Empfang ausgedruckt oder heruntergeladene Musikstücke werden auf CD gebrannt. Hier kommt es zu Re-Materialisierungseffekten. Gewichtiger noch sind Additions-Effekte. Bisher werden Medien selten einfach substituiert, vielmehr sind sie häufig Teil eines crossmedialen Angebots und in ein komplexes Mediennutzungsverhalten eingebettet. Zwar hat sich die tägliche Nutzungsdauer in den letzten zehn Jahren deutlich zugunsten des Internets verschoben. Generell haben aber die Printmedien ihren Platz und Stellenwert im Alltag und werden vielfach komplementär als substitutiv genutzt. Die „Substitutionsfrage“, sich also nur noch für ein Medium zu entscheiden, entspricht daher der Alltagswirklichkeit der Mediennutzung sehr viel weniger als die Frage, wie intensiv und in welchen Situationen man ein Medium nutzt. Substitutionen der Nutzung klassischer Medien durch (internetbasierte) elektronische Medien sind, wie aktuelle Online-Studien (u. a. von ARD und ZDF, 2010) zeigen, vor allem dort zu verzeichnen, wo Funktionen traditioneller Medien mit erfüllt werden. Dabei gilt, dass der Stellenwert des Internets in dem Maße zunimmt, in dem es seine Möglichkeiten erweitert und insbesondere über seine Eigenschaft als Plattform verschiedene Funktionen der herkömmlichen Medien integriert. Damit wird das Internet immer mehr als „Allroundmedium“ wahrgenommen. Zunehmende Multifunktionalität und Mobilität des Internets unterstützen dies. Solange verschiedene Medien komplementär genutzt werden, besteht die Gefahr von Konsum-Akkumulations-Effekten. Auch bei Substitution ist keineswegs eine Umweltentlastung sicher. Ob das Print- oder das elektronische Medium ökologisch besser abschneidet, hängt von der Häufigkeit und Dauer der Mediennutzung, Leistungseigenschaften der Geräte und Netzinfrastrukturen sowie deren Auslastungs- und Nutzungs-grad ab. Betrachtet man das Treibhauspotenzial, so weist ein E-Book-Reader mit e-Ink-Display erst ab 22 substituierten Büchern aus Frischfasern einen Umweltvorteil gegenüber dem gedruckten Buch (Öko-Institut, 2011). Hinzu kommt noch der Energieverbrauch der Netzinfrastruktur, so dass der Break-even-point höher liegt. Da die Deutschen im Durchschnitt rund 12 Bücher pro Jahr lesen, sind E-Book-Reader demzufolge bezüglich des Treibhausgaspotenzials nur für Vielleser ökologisch von Vorteil, für Durchschnitts- und Wenigleser jedoch nicht. Da es bisher zur Frage der Dematerialisierung durch digitale Mediennutzung keine generellen Antworten gibt, muss dies im Einzelfall geprüft und abgeschätzt werden.

Die Befunde zeigen, dass Rebound-Effekte in allen Bereichen auftreten. Sie sind aber unterschiedlich ausgeprägt. Rebound-Effekte fallen bei Smart Buildings, Smart Grids und Smart Motors vergleichsweise gering aus. Ressourceneffizienzpotenziale sind hier so groß, dass sie vermutlich nicht überkompensiert werden. Diese Gefahr ist bei Smart logistics und Dematerialisierung zumindest nicht auszuschließen.

Tabelle 18: Mögliche Rebound-Effekte „Green durch IT“ bis 2020

IKT	Effizienz	Rebound-risiko	Mechanismen	Typ
Smart buildings	Reduktion des Energieverbrauchs von Gebäuden (nutzungsabhängige Steuerung der Heizungs-, Klima- und Lüftungsversorgung, adaptive Heizungssysteme, bedarfsgeführte Regelung von Kältemaschinen, automatische Lichtsteuerung, intelligentes An- und Abschalten von Geräten)	gering	Direkte Rebound-Effekte gering; ggf. erhöhte Nachfrage nach alternativen Gütern durch Einkommensgewinne. Psychologische Rebound-Effekte möglich, z. B. länger Licht anlassen weil energieeffizient	Einkommens-Effekt, Re-Investitions-Effekt, Moral-Leaking-Effekt
Smart logistics	IKT-optimierte Verkehrsströme, -systeme und -mittel (z. B. Fahrzeugnavigation und –elektronik, IKT-gestützte Stadtemaut)	mittel-hoch	Auf Konsumentenseite sind Zeitgewinne möglich. Effizienzerhöhung wird durch weitere oder häufigere Reisen kompensiert. Im Logistiksektor ermöglicht IKT eine Optimierung der betrieblichen Prozessabläufe und spart Kosten und Zeit.	Cross-Factor-Effekt
Smart grids	Erhöhung der Transparenz des Stromverbrauchs, Absenkung von Lastspitzen, Verschiebung des Verbrauchs auf CO2-effizientere Erzeugung, Verringerung der Verluste bei der Netzübertragung (Virtuelle Kraftwerke, Advanced smart meters, Demand-side management)	gering-hoch	Investitionen in Smart Grids bewirken eine höhere Nachfrage nach Rohstoffen und Material; Eigenverbrauch von Smart Meter verringern Energieeinsparungen, psychologische Rebound-Effekte können Energieverbrauch erhöhen	Embodied-Energy-Effekt, Cross-Factor-Effect
Smart motors	Erhöhung der Energie- und Materialeffizienz in der Produktion (bedarfsgerechte Steuer- und Regelung von Maschinen und Anlagen, kontinuierliche Überwachung und Diagnose von Maschinen, Anlagen und industriellen Prozessen, Antriebe mit Frequenzumrichter)	gering	Prozessverbesserungen wirken positiv auf Ausfallzeiten und Lebensdauer von Anlagen aus; Verringerung der Abfallmengen. Kosteneinsparungen können Re-Investitions- und Marktpreis-Effekte auslösen	Re-Investitions-Effekt; Marktpreis-Effekt
Dematerialisierung	Substitution physischer Güter und Transporte durch ressourceneffizientere Produkt-, Transport- und Nutzungsalternativen (Telearbeit, Virtuelle Treffen, E-Media, E-Document, E-Invoice, E-Paper)	mittel-hoch	Additiver Konsum von Medien, Rematerialisierung durch Ausdruck oder Brennen auf CD digitaler Medien	Rematerialisierungseffekt, Konsum-Akkumulations-Effekt

Quelle: Eigene.

8.4 Entkopplung von Wirtschaftswachstum und Ressourcenverbrauch durch Green IT

Die ausgeführten Einschätzungen machen deutlich, dass die Herstellung von IKT-Geräten (PCs, Notebooks, Fernseher etc.) und Infrastrukturen (Rechenzentren, Mobilfunknetze usw.) sowie deren Nutzung mit einem erheblichen Energie- und Ressourcenverbrauch verbunden ist und Rebound-Effekte erzeugt. Mit Blick darauf sind bisher diskutierte Potenziale der IKT zur Ressourcenschonung und Klimaschutz neu zu bewerten. Abschätzungen zur Ressourcenschonung von IKT ohne die Berücksichtigung von Rebound-Effekten sind unvollständig. Grundsätzlich hat die Abbildung der Umwelteffekte diesen komplexen Wirkungsmechanismen Rechnung zu tragen, um gravierende Fehleinschätzungen zu vermeiden und richtungssichere Schlüsse zu ziehen. Primäre Effekte müssen mit sekundären Effekten aufgerechnet werden. Die Befunde zeigen zudem, dass Rebound-Effekte infolge von Konsumverschiebungen keine vernachlässigbare Größe darstellen. Neue Produkte und Dienstleistungen schaffen zusätzliche Konsumbedürfnisse. Das Schwungrad zunehmender Produktion und Konsumtion bleibt nicht nur unangetastet, vielmehr ist zu vermuten, dass es durch Telekommunikation und Informationstechnologien noch beschleunigt wird.

Es wäre aber verfehlt, daraus abzuleiten, der IKT-Fortschritt stünde einer Verringerung des Ressourcenverbrauchs im Wege. Das Fazit lautet vielmehr: Die Erschließung von Ressourceneffizienzpotenzialen der IKT setzt erhebliche und gezielte Anstrengungen sowohl auf Seiten der Politik und der Wirtschaft als auch bei den Anwendern voraus und erfordert, dass potenziellen Rebound-Effekten aktiv entgegenzuwirken ist. Dabei sind drei Stränge zu verfolgen:

- technikzentrierte Effizienzstrategien reichen nicht aus; es bedarf einer Systemperspektive
- ressourcenschonende IKT Anwendungen mit geringen Rebound-Effekten sind konsequent zu erschließen
- Rebound-Effekte sind eine Gestaltungsaufgabe für das Politikfeld des nachhaltigen Konsums

Systemperspektive: Voraussetzung zur Entkopplung von Wirtschaftswachstum und Ressourcenverbrauch

Lösungen, die tatsächlich einen Beitrag zur Entkopplung von Wirtschaftswachstum und Ressourcenverbrauch leisten, können nur aus der Systemperspektive heraus entwickelt werden. Es ist wenig handlungsrelevant Rebound-Effekte auf einzelne Produkte und Prozesse zu beschränken, vielmehr ist es notwendig, sie in eine Dynamik von Angebot, Nachfrage und Konsum einzuordnen (Hilty, 2006). Weitaus wirklichkeitsnäher als modellhafte Betrachtungen zur Frage von Rebound-Effekten technischer Effizienz ist deshalb die Akteursperspektive mit Berücksichtigung von alternativen Handlungsmustern. Entkopplungseffekte lassen sich am ehesten erzielen, wenn dominante Produktnutzungssysteme und Logiken verlassen werden. Dies ist z. B. der Fall, wenn es sich um neue Technologien handelt, es um neue Nutzungskonzepte geht oder Systemlösungen entwickelt werden sollen, die eine Bündelung von Leistungen verschiedener Akteure zu einem funktionsfähigen Nutzungssystem erforderlich machen (z. B. für Thin client und Web based Computing). Ressourceneffizienzpotenziale werden mit Blick darauf dann realisiert werden können, wenn die politischen und ökonomischen

Rahmenbedingungen einen effizienten Umgang mit natürlichen Ressourcen befördern. Andernfalls besteht die Gefahr, dass Wachstumseffekte die Einsparungen schmälern, kompensieren und die Gesamtbelastung steigt.

Umsetzung ressourcenschonender IKT und Applikationen mit geringen Rebound-Effekten

Entlastungseffekte sind vor allem dort zu erwarten, wo einerseits Potenziale zur Ressourcenschonung und zum Klimaschutz besonders groß und andererseits mögliche Rebound-Effekte relativ klein ausfallen. Dies ist insbesondere bei intelligenten Energienetzen, IKT-gestützten Wärme-, Kälte- und Klimamanagement und ressourceneffizienten Prozessen in der Produktion der Fall. Auch im Verkehrsbereich kann IKT in bestimmten Feldern als Enabler ressourceneffizientere Systemlösungen unterstützen: Innovative Konzepte wie etwa „car2go“, „flinkster“ oder „bemobility“ weiten das bisher auf Carsharing beschränkte Entwicklungspotenzial des Autoteilens deutlich aus. Internetbasierte Plattformen und Softwarelösungen schaffen dafür technische Voraussetzungen für entsprechende Geschäftsmodelle. Erwartet werden umwelt- und verkehrsentlastende Effekte, die daraus resultieren, dass sich die Verkehrsmittelwahl zugunsten öffentlicher Verkehrsmittel verlagert und die Fahrzeugflotte insgesamt reduziert wird. Auch hier spielen die wirtschafts- und fiskalpolitischen Rahmenbedingungen eine entscheidende Rolle, da sie positive und negative Anreize im Markt setzen. Sie sind ein wichtiger Treiber, der sowohl die Technologieentwicklung als auch Größe und Geschwindigkeit der Marktentwicklung maßgeblich beeinflussen wird.

Rebound-Effekte sind eine Gestaltungsaufgabe für das Politikfeld des nachhaltigen Konsums

Einige der Rebound-Effekte sind nicht IKT-spezifisch, sondern ergeben sich daraus, dass Einkommens- und Zeitgewinne oder Kostenersparnisse realisiert werden. Eingesparte Kosten oder zusätzliches Einkommen eröffnen finanzielle Spielräume in anderen Feldern, was ein starker Grund für mögliche Rebound-Effekte ist. Ob diese neue Nachfrage zu Rebound-Effekten führt und damit die Umweltentlastungseffekte ausgleicht, hängt weitgehend davon ab, wie Akteure die zusätzlichen Ressourcen nutzen – ob Verbraucher beispielsweise das zusätzliche verfügbare Einkommen in einen Fernflug stecken. Oder ob sie die Einsparungen oder Einkommen für umweltentlastende Aktivitäten (z. B. ökologische Lebensmittel) nutzen. Um Wirtschaftswachstum vom Ressourcenverbrauch stärker als bisher abkoppeln zu können, sind deshalb Anstrengungen notwendig, die nicht nur durch Effizienzsteigerungen bei der Umweltnutzung und dem Ressourcenverbrauch erreicht werden können, sondern verlangt auch die Entwicklung und Förderung nachhaltiger Konsummuster. Allgemein empfiehlt es sich daher, ordnungsrechtliche Maßnahmen wie Ökodesignstandards in einen Mix mit marktwirtschaftlichen Instrumenten zu verknüpfen, um Rebound-Effekte einzudämmen. Dazu wird u. a. eine Ökologische Steuerreform vorgeschlagen, bei der die Steuersätze mit den Effizienzgewinnen steigen. Damit sollen „Effizienz bedingte Kostenersparnisse über Steuern abgeschöpft werden“ (Santarius, 2012). Weitere Ansätze sehen absolute Obergrenzen für die Umweltnutzung und den Ressourcenverbrauch vor. Theoretisch könnten Rebound-Effekte zumindest in den regulierten Feldern so

ausgeschlossen werden (Santarius, 2012). Belastbare Vorschläge, wie diese Ansätze effektiv umgesetzt werden können, liegen bis dato kaum vor. Hier herrscht erheblicher Forschungsbedarf.

9 Möglichkeiten und Maßnahmen zur Reduzierung des Ressourcenbedarfs

Aufbauend auf den Ergebnissen und Erkenntnissen der vorangegangenen Kapitel werden im Folgenden die Möglichkeiten und Grenzen zur Reduzierung des Ressourcenbedarfs der IKT und ihres möglichen Beitrages zur Ressourcenschonung vorgestellt und Handlungsempfehlungen für „Green IT und Nachhaltigkeit“ formuliert.

9.1 Möglichkeiten und Grenzen zur Reduzierung des Ressourcenbedarfs durch Green IT

Bei der Betrachtung der Möglichkeiten und Grenzen zur Reduzierung des Ressourcenbedarfs durch Green IT ist zwischen der Senkung des Ressourcenbedarfs der IKT selbst (Herstellung, Nutzung, Recycling von Endgeräten, Netzen, Rechenzentren) (Green in der IT) und der Nutzung von IKT in anderen Branchen und Anwendungsfeldern (Gebäude, Verkehr, Stromnetze etc.) (Green durch IT) zu unterscheiden.

9.1.1 Green in der IT

Wie in Kapitel 4 gezeigt werden konnte, ist die Datenlage bezüglich des Ressourcenverbrauchs der IKT noch äußerst lückenhaft. Bisherige Untersuchungen beschränken sich weitgehend auf den Energieverbrauch in der Nutzungsphase von IKT-Geräten und –Infrastrukturen. Für den IKT-bedingten Stromverbrauch in Deutschland liegen allerdings belastbare Daten vor. Diese zeigen, dass der IKT-bedingte Stromverbrauch (Endgeräte, Netze, Rechenzentren) in den vergangenen zehn Jahren erheblich angestiegen ist und in 2010 bereits 11 % des Gesamtstromverbrauchs in Deutschland ausmachte.

Im Bereich des Ressourcenbedarfs der IKT selbst bestehen aufgrund der hohen Innovationsdynamik in der IKT und den schon bestehenden Treibern zur Steigerung der Energieeffizienz (Ökodesign-Anforderungen, Strompreisentwicklung etc.) erhebliche Potenziale zur Verbesserung der Ressourceneffizienz. Trotz erheblicher Effizienzfortschritte auf der Ebene einzelner IKT-Geräte (Miniaturisierung, Steigerung der Energieeffizienz etc.), bei Netzen und Rechenzentren, in der Vergangenheit und der bestehenden Ressourceneffizienzpotenzialen ist bis zum Jahr 2020 mit einem weiteren deutlichen Anstieg des IKT-bedingten Ressourcenverbrauchs in Deutschland zu rechnen. Ohne zusätzliche erhebliche Anstrengungen zur Steigerung der Energieeffizienz der IKT ist davon auszugehen, dass der Gesamtstromverbrauch der IKT von rund 59,6 TWh in 2010 auf über 90 TWh im Jahr 2020 ansteigen wird. Damit würde der Stromverbrauch der IKT bis 2020 um weitere 50 % ansteigen und der Anteil des durch IKT verursachten Stromverbrauchs am Gesamtstromverbrauch in Deutschland könnte bis 2020 auf fast 20 % zunehmen.

Mit Blick auf die Ziele der Energiewende ist diese zusätzliche Belastung der deutschen Stromnetze eine erhebliche Herausforderung. Dies gilt sowohl für die Versorgungssicherheit und die mit dem Stromverbrauch verbundenen Umweltbelastungen (Treibhausgasemissionen etc.) als auch mit Blick

auf die volkswirtschaftlichen Kosten eines steigenden Stromverbrauchs. Die vorliegende Studie zeigt allerdings auch, dass die Innovations- und Wachstumsdynamik der Informations- und Kommunikationstechniken sich nicht nur im Energieverbrauch, sondern auch im Materialeinsatz und dem damit verbundenen Rohstoffverbrauch niederschlägt. Der IKT-bedingte Material- und Rohstoffverbrauch ist erheblich und wird ebenso wie Fragen des „End-of-life-Managements“ (Rücknahme, Recycling etc.) weiter an Bedeutung gewinnen, dies gilt insbesondere mit Blick auf seltene Erden und Metalle, deren Gewinnung mit erheblichen Umweltbelastungen verbunden sind. Szenarien zeigen allerdings, dass es in einzelnen Bereichen wie z. B. im Bereich Arbeitsplatzcomputer oder Rechenzentren sehr wohl möglich ist, den zunehmenden Ressourcenverbrauch der IKT zu stoppen.

Dies setzt in den kommenden Jahren allerdings zusätzliche Anstrengungen auf Seiten der Politik wie auch der IKT-Wirtschaft voraus. Konkrete langfristige Ressourcen-Zielsetzungen für einzelne Segmente der IKT (IKT-Netze, Rechenzentren, IKT-Einsatz in Unternehmen, öffentlicher Verwaltung oder Privathaushalten), Masterpläne mit konkreten Maßnahmen sowie ein nationales kontinuierliches Umweltmonitoring der IKT, mit der der Ressourcenverbrauch und die Erreichung gesetzter Ziele überprüft werden können, sowie die Berücksichtigung der in dieser Studie herausgearbeiteten Rebound-Risiken sind die Voraussetzung dafür.

Mit diesen zusätzlichen Maßnahmen wird es voraussichtlich nicht möglich sein, den Gesamtenergieverbrauch und Materialeinsatz der IKT bis 2020 auf heutigem Niveau zu halten. Sehr wohl ist es aber möglich und realistisch den weiteren rasanten Anstieg des Ressourcenverbrauchs der IKT insgesamt abzumildern. Dass sich das auch ökonomisch auszahlt, zeigt der Bereich Arbeitsplatzcomputer. Unternehmen, Behörden und Bildungseinrichtungen in Deutschland würden durch den verstärkten Einsatz energieeffizientere Computerlösungen (Mini-PCs, Notebooks, Thin Clients) bis 2020 Stromkosten von rund 2,75 Mrd. € einsparen und gleichzeitig das Stromnetz entlasten. Dies setzt allerdings eine öffentlich-private Partnerschaft z.B. in Form einer „Green Office Computing“-Initiative von Staat; IKT-Hersteller und -Anwendern voraus.

9.1.2 Green durch IT

Die in Kapitel 5 beschriebenen theoretischen Potenziale, die durch die Nutzung von IKT in anderen Branchen und Anwendungsfeldern erwachsen können („Green durch IT“) sind erheblich und liegen deutlich über dem Ressourcenverbrauch der IKT selbst. Einzelne Studien gehen davon aus, dass durch die gezielte Nutzung von IKT in Gebäuden, Stromnetzen, Industrieprozessen usw., also durch „Green durch IT“-Maßnahmen, achtmal mehr an Ressourcen eingespart werden kann als die IKT selbst verbraucht. So eindrucksvoll die ermittelten Potenziale auch sind, so sollte zum einen die Höhe der Werte und zum andern die Bedingungen für deren Realisierung kritisch hinterfragt werden. Die in den 1990er Jahren im Zuge der Einführung von PCs in die Arbeitswelt oft verbreitete Vision eines papierlosen Büros mag die Zwiespältigkeit solcher Abschätzungen verdeutlichen. Der Papierverbrauch in Deutschland ist seither nicht etwa gesunken, sondern gestiegen. Für viele der Maßnahmen aus dem Bereich Green durch IT liegen bislang ausschließlich Potenzialabschätzungen vor. D. h., dass für diese Felder keine oder nur wenig belastbare Daten über tatsächliche, aus der Anwendungserfahrung ableitbare Einsparungen vorliegen. Dies gilt insbesondere für die Bereiche intelligenten

te Stromnetze (Smart Grid), intelligente Verkehrslösungen (Smart Mobility / Smart Logistics) und Dematerialisierung. Die Abschätzungen sind daher stark von den getroffenen Annahmen sowie teilweise auch von den Interessen der Auftraggeber entsprechender Untersuchungen abhängig. Gerade bei Auftraggebern aus dem Kreis der Hersteller oder Anbieter bestimmter IKT-Lösungen besteht ein erhebliches Interesse an der Ausweisung eines möglichst hohen ökologischen Zusatznutzens ihrer Produkte und Dienstleistungen, um diese besser verkaufen zu können.

Hinzu kommt, dass die meisten Potenzialabschätzungen von „Green durch IT“-Lösungen Reboundeffekte nicht berücksichtigen. Abschätzungen zur Ressourcenschonung von IKT ohne die Berücksichtigung von Rebound-Effekten sind allerdings unvollständig. Grundsätzlich hat die Abbildung der Umwelteffekte diesen komplexen Wirkungsmechanismen Rechnung zu tragen, um gravierende Fehleinschätzungen zu vermeiden und richtungssichere Schlüsse zu ziehen. Primäre Effekte müssen mit sekundären Effekten aufgerechnet werden. Die Befunde zeigen zudem, dass Rebound-Effekte infolge von Konsumverschiebungen keine vernachlässigbare Größe darstellen. Neue Produkte und Dienstleistungen schaffen zusätzliche Konsumbedürfnisse. Das Schwungrad zunehmender Produktion und Konsumtion bleibt nicht nur unangetastet, vielmehr ist zu vermuten, dass es durch Telekommunikation und Informationstechnologien noch beschleunigt wird.

Es wäre aber verfehlt, daraus abzuleiten, der IKT-Fortschritt stünde einer Verringerung des Ressourcenverbrauchs im Wege. Das Fazit lautet vielmehr: Die Erschließung von Ressourceneffizienzpotenzialen der IKT setzt erhebliche und gezielte Anstrengungen sowohl auf Seiten der Politik und der Wirtschaft als auch bei den Anwendern voraus und erfordert, dass potenziellen Rebound-Effekten aktiv entgegenzuwirken ist. Handlungsempfehlungen wie diesen begegnet werden kann, werden im folgenden Kapitel formuliert.

9.2 Handlungsempfehlungen

Wie der vorangegangene Abschnitt zeigt, ist „Green IT“ kein Selbstläufer. Die Realisierung von Green IT und die Erzeugung positiver gesamtgesellschaftlicher Nachhaltigkeitseffekte, sowohl in ökologischer, ökonomischer als auch in sozialer Hinsicht, stellt eine umfangreiche und komplexe politische Herausforderung dar. Dabei kann davon ausgegangen werden, dass Deutschland im internationalen Vergleich besonders günstige Ausgangsbedingungen hat. Dies liegt zum einen an den bestehenden gesetzlichen Rahmenbedingungen auf europäischer und nationaler Ebene, dem vergleichsweise hohen Bewusstsein bei Herstellern und Anwendern für Fragen eines ressourcenschonenden IKT-Einsatzes, leistungsfähigen und innovativen Anbietern von Green IT-Lösungen sowie politischen Rahmenbedingungen wie sie z.B. durch die Energiewende entfaltet werden. Deutschland hat vor diesem Hintergrund beste Voraussetzungen international zum „Green IT“-Pionier und zum Weltmarktführer für Green IT-Lösungen zu werden. Neben positiven inländischen Effekten der Realisierung einer „Green IT“, bietet diese also auch erhebliche Chancen zum „Exportschlager“ zu werden.

Aus der Vielzahl möglicher und notwendiger Maßnahmen zur Realisierung von Green IT in Deutschland soll hier auf solche fokussiert werden, die für das Gesamtfeld der IKT von besonderer Bedeutung sind und die in den beiden großen Teilbereichen „Green in der IT“ und „Green durch IT“ wichtige Impulse auslösen können:

9.2.1 Übergreifende Handlungsempfehlungen

Aufbau eines nationalen Green IT-Monitoring

Eine wesentliche Voraussetzung für erfolgreiche Green IT-Strategien ist ein kontinuierliches Monitoring der Green IT-Entwicklung und der mit dem IKT-Einsatz verbundenen Umwelt- und Ressourceneffekte. Nur auf Basis verlässlicher wissenschaftlicher Grundlagen lassen sich langfristige Orientierungen und Entscheidungsgrundlagen sowohl für die Politik als auch für die Hersteller und Anwender von IKT schaffen und unerwünschte Reboundeffekte vermeiden.

Die vorliegende Studie zeigt, dass die Datenlage bezüglich des Ressourcenverbrauchs der IKT noch äußerst lückenhaft ist und sich bisherige Untersuchungen weitgehend auf den Energieverbrauch in der Nutzungsphase von IKT-Geräten und –Infrastrukturen beschränken. Hinzu kommt, dass verschiedene Studien unterschiedliche Systemabgrenzungen und Datenerhebungsmethoden verwenden, wodurch die bislang vorliegenden Daten nicht ohne weiteres vergleichbar sind und auf nationaler Ebene aggregiert werden können. Bislang fehlt ein differenziertes, methodisch einheitliches und kontinuierliches nationales Monitoring der Umwelteffekte des IKT-Einsatzes in Deutschland.

Vor diesem Hintergrund wird empfohlen, ein kontinuierliches nationales Green IT-Monitoring aufzubauen. Dieses sollte mit dem Monitoring-Prozess "Energie der Zukunft", den die Bundesregierung im Oktober 2011 beschlossen hat, eng verbunden werden. Da es sich bei IKT um eine Querschnittstechnologie mit vielfältigen und komplexen Anwendungen handelt, sollten die methodischen Grundlagen zur Erfassung von Umwelteffekten und Ressourceneinsparungen differenziert für verschiedene Betrachtungsebenen (Geräteebene, Infrastrukturebene (Rechenzentren, Netze), Anwendungsfeld (z.B. IKT-Einsatz in Unternehmen oder öffentlicher Verwaltung, intelligente Gebäude etc.) und gesamtwirtschaftlicher bzw. gesamtgesellschaftlicher Ebene) ausgearbeitet werden. Hierfür bietet sich z.B. ein Förderschwerpunkt vergleichbar dem aktuellen Förderprogramm „it2green“ des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie oder ein gemeinsamer Förderschwerpunkt mehrerer Ministerien an.

Nationale Roadmap „Green IT“ mit konkreten Zielen für einzelne Green IT-Felder

Potenziale, die sich durch die Nutzung von IKT in anderen Branchen und Anwendungsfeldern („Green durch IT“) erschließen lassen, sind erheblich und liegen deutlich über dem Ressourcenverbrauch der IKT selbst. Angesichts der Komplexität der jeweiligen Anwendungsfelder (Gebäude, Stromnetze etc.) ist allerdings ohne eine gezielte und kooperative Herangehensweise nicht mit einer Erschließung der erheblichen ökologischen und ökonomischen Potenziale zu rechnen. Vor diesem Hintergrund wird empfohlen, im Rahmen einer gemeinsamen Anstrengung von Staat, IKT-Anbietern und IKT-Anwendern eine nationale Roadmap „Green IT“ zu erarbeiten. Im Rahmen eines kooperativen Roadmapping sollten langfristige Ziele sowohl für den Bereich „Green in der IT“ (IKT-Netze, Rechenzentren, IKT-Einsatz in Unternehmen und öffentlichen Einrichtungen) als auch für die verschiedenen „Green durch IT“-Felder wie intelligente Gebäude (smart buildings), intelligente Stromnetze (smart grids) oder intelligente Industrieprozesse (smart industry / motors) erarbeitet werden.

9.2.2 Green in der IT

Initiative klimaneutrale Rechenzentren für Deutschland

Die rund 52.000 Rechenzentren in Deutschland verbrauchten im Jahr 2011 knapp 10 TWh an Strom. Das entspricht einem Anteil von 1,8 % am Gesamtstromverbrauch in Deutschland. Es sind ca. vier mittelgroße Kohlekraftwerke notwendig, um diese Strommenge zu erzeugen. Die mit dem Stromverbrauch der Rechenzentren verbundenen Kohlendioxid-Emissionen beliefen sich in 2011 auf rund 5,5 Mio. t. Wie vielfältige Praxisbeispiele der vergangenen Jahre zeigen, kann die Energieeffizienz von Rechenzentren erheblich gesteigert werden. Eine Reihe von Rechenzentren sind heute bereits klimaneutral, weil sie Energiesparmaßnahmen mit dem Einsatz erneuerbarer Energien und dem Bezug von zertifiziertem Öko-Strom kombinieren. Die Klimaneutralität von Rechenzentren ist also ohne Weiteres umsetzbar. Bislang sind es aber nur wenige Vorreiter, die dies realisiert haben. Vor diesem Hintergrund wird empfohlen, eine gemeinsame von Bundesregierung, IKT-Wirtschaft sowie großen Rechenzentrumsbetreibern getragene Initiative „Klimaneutrale Rechenzentren für Deutschland“ zu starten. Ziel einer solchen Initiative sollte es sein, zumindest die rund 500 mittleren und großen Rechenzentren in Deutschland, die rund 40 % aller Server betreiben, bis 2015 klimaneutral zu stellen.

Umsetzung der Initiative „Green Office Computing“

Aufgrund der wachsenden Bedeutung des Dienstleistungssektors, der zunehmenden Computerisierung von Branchen mit bisher geringer Computerausstattung (Handel, Handwerk etc.) und der politischen Zielsetzung, Schulen und Hochschulen zukünftig besser mit Computern auszustatten, gehen aktuelle Schätzungen davon aus, dass der Bestand an Arbeitsplatzcomputern in Deutschland von 26,5 Mio. in 2010 auf rund 37,5 Mio. Geräte in 2020 anwachsen wird. Der Desktop-PC wird als „Computer-Allround-Talent“ auch zukünftig bei einzelnen Anwendungen eine sinnvolle Lösung darstellen, für den ganz überwiegenden Teil von Büro- und Arbeitsplatzanwendungen stellen Mini-PCs, Notebooks und insbesondere das Thin Client & Server Based Computing (TC&SBC) unter ökologischen Gesichtspunkten aber eindeutig die besseren Alternativen dar. Für das TC&SBC können aber auch andere Vorteile wie ein geringerer Administrationsaufwand, höhere Sicherheit und geringere Total Cost of Ownership sprechen. Vor diesem Hintergrund und aufbauend auf einer umfangreichen Analyse, warum sich Ansätze des Thin Client & Server Based Computing trotz bestehender Best Practice-Anwendungen in der Praxis bislang nur sehr schleppend verbreitet haben, wurde in einem vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) und dem Umweltbundesamt geförderten Vorhaben in der Zusammenarbeit von Politik, Behörden, IT-Unternehmen, Verbänden und Wissenschaft die Roadmap „Ressourceneffiziente Arbeitsplatz-Computerlösungen 2020“ erarbeitet. Ziel der Roadmap ist ein nachhaltiger Strukturwandel bei arbeitsplatzbezogenen Computerlösungen in Deutschland bis 2020. Mit der Roadmap soll ein Leitmarkt für „Green Office Computing“ entwickelt werden. Die Realisierung der Roadmap-Maßnahmen würde bis 2020 zu einer Einsparung von 29,4 TWh an Primärenergie, zu einer Stromkosteneinsparung von 2,75 Mrd. Euro sowie zu einer Reduzierung von CO₂-Emissionen von 5,5 Mio. t und von 245.000 t an Computermaterial führen. Mit der Umsetzung der Roadmap kann außerdem ein rasant wachsender Markt für „grüne“ Zukunfts-

technologien erfolgreich erschlossen und Deutschland als Green IT-Pionier im internationalen Wettbewerb positioniert werden.

Zur Durchführung der Roadmap wird hier daher die Gründung einer Initiative „Green Office Computing“ in der Form einer Öffentlich-Privaten-Partnerschaft vorgeschlagen. Als Netzwerk von Partnern, die ressourceneffiziente Computerlösungen in Unternehmen, Verwaltung und Bildungseinrichtungen fördern und voranbringen möchten, dient die Initiative als institutionelle „Plattform“, die sich um die Entwicklung der strategischen Partnerschaft sowie um die Koordination der Umsetzung der Roadmap-Maßnahmen kümmert. Die Initiative sollte durch die Bundesregierung, IKT-Anbieter, IKT-Anwender (Rat der IT-Beauftragten, CIOcolloquium, etc.), Branchenverbände wie BITKOM sowie wissenschaftliche Einrichtungen getragen werden.

9.2.3 Green durch IT

Mit Blick auf die Erschließung von Ressourceneinsparpotenzialen im Bereich „Green durch IT“ können drei zentrale Handlungsempfehlungen abgeleitet werden:

Ausweitung der Forschung zu Reboundeffekten der IKT

Wie in der vorliegenden Studie gezeigt werden konnte, sind viele IKT-Anwendungen mit Rebound-Effekten verbunden. In den vergangenen Jahren wurden auch Ansätze diskutiert, wie Rebound-Effekten begegnet werden kann. Belastbare Vorschläge, wie diese Ansätze effektiv umgesetzt werden können, liegen bis dato kaum vor. Hier herrscht erheblicher Forschungsbedarf. Es wird daher empfohlen, die Erforschung von Reboundeffekten auszuweiten und verstärkt zu fördern. Die Ausweitung der Forschung zu Reboundeffekten sollte sich insbesondere mit den Feldern Smart Mobility/Smart Logistics und Dematerialisierung beschäftigen, bei denen bis dato erhebliche Unsicherheiten bzgl. ihrer Umwelteffekte bestehen.

Förderung von IKT-Bereichen mit geringer Reboundgefahr (z. B. smart energy in Gebäuden)

Entlastungseffekte sind vor allem dort zu erwarten, wo einerseits Potenziale zur Ressourcenschonung und zum Klimaschutz besonders groß und andererseits mögliche Rebound-Effekte relativ klein ausfallen. Dies ist insbesondere bei intelligenten Energienetzen (Smart grids), IKT-gestützten Wärme-, Kälte- und Klimamanagement in Gebäuden (Smart energy) und ressourceneffizienten Prozessen in der Produktion (Smart industry/motors) der Fall. Vor diesem Hintergrund wird empfohlen, „Green durch IT“-Ansätze insbesondere in diesen Bereichen zu fördern und voranzutreiben.

Festlegung konkreter Reduktionsziele für Deutschland für die einzelnen „Green durch IT“-Felder

Als Teil eines nationalen Masterplans „Green IT“ (s. o.) wird empfohlen, langfristige Ziele für die verschiedenen „Green durch IT“-Felder wie intelligente Energienetze (Smart grids), IKT-gestütztes Wär-

me-, Kälte- und Klimamanagement in Gebäuden (Smart energy buildings) und ressourceneffiziente Prozesse in der Produktion (Smart industry/motors) zu entwickeln. Ansätze des kooperativen Roadmapping von Staat, IKT-Anbietern und –Anwendern zur Entwicklung langfristiger Masterpläne zur Erschließung von Ressourceneinsparpotenzialen können dies unterstützen.

10 Literaturverzeichnis

- Abrahamse, W., Steg, L., Vlek, C. & Rothengatter, T. (2005). A review of studies aimed at household energy conversation. *Journal on Environmental Psychology*, 25, 273-201.
- AGEB (2011). *Energieflussbild 2010 für die Bundesrepublik Deutschland in Petajoule*- AG Energiebilanzen e.V.
- Ajzen, I. & Fishbein, M. (1977). Attitude-Behavior Relations: A Theoretical Analysis and Review of Empirical Research. *Psychological Bulletin*, 84(5), 888-918.
- Allenby, B. (1999). Culture and Industrial Ecology. *Journal* 401.
- Amazon.com Inc. (2011). *News Release: Introducing Amazon Cloud Drive, Amazon Cloud Player for Web, and Amazon Cloud Player for Android*. Presseerklärung. Verfügbar unter <http://phx.corporate-ir.net/phoenix.zhtml?c=176060&p=irol-newsArticle&ID=1543596> [20.11.2012]
- Angerer, G., Erdmann, L., Marscheider-Weidemann, F., Scharp, M., Lüllmann, A., Handke, V. & Marwede, M. (2009). *Rohstoffe für Zukunftstechnologien*. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag.
- ARD/ZDF Onlinestudie (2012). Verfügbar unter <http://www.ard-zdf-onlinestudie.de/> [20.11.2012]
- Bailey, M., Eastwood, M., Grieser, T., Borovick, L., Turner, V. & Gray R.C. (2007). *Special Study: Data Center of the Future*. New York, NY: IDC. IDC #06C4799. April 2007.
- Bardt, H. (2012). Gehen uns die Rohstoffe aus? BME-Tagung, Mainz, 21.5.2012.
- BAUM (2012). Smart Energy made in Germany. Zwischenergebnisse der E-Energy-Modellprojekte auf dem Weg zum Internet der Energie. B.A.U.M Consult GmbH. München/Berlin.
- BCG - Boston Consulting Group (2009). *SMART 2020*. Bonn.
- Behrendt, S. & Erdmann, L. (2003). *Displaymärkte im Umbruch – Neuorientierungen für Umweltschutzstrategien IZT-Werkstattbericht Nr. 63*. Berlin.
- Behrendt, S. & Erdmann, L. (2010). Querschnittstechnologien: Innovationssprünge zur Ressourceneffizienz. Berlin: VDI Zentrum Ressourceneffizienz (VDI ZRE).
- Behrendt, S. (2010). *Integriertes Roadmapping, Nachhaltigkeitsorientierung in Innovationsprozessen des Pervasive Computing*. Heidelberg, New York: Springer.
- Behrendt, S., Fichter, K. et. al. (2008). *Nachhaltigkeitsinnovationen in der Display-Industrie*. Berlin.
- Behrendt, S., Blättel-Mink, B. & Clausen, J. (2011). *Wiederverkaufskultur im Internet – Chancen für nachhaltigen Konsum am Beispiel von eBay*. Heidelberg: Springer.
- Behrendt, S., Henseling, C., Fichter, K. & Bierter, W. (2005). *Chancenpotenziale für nachhaltige Produktnutzungssysteme im E-Business. E-Business und nachhaltige Produktnutzung durch mobile Multimediadienste. Werkstattbericht Nr. 71*. Herausgegeben vom Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung, Berlin.
- Behrendt, S., Pfitzner, R., Kreibich, R. & Hornschild, K. (1998). Innovationen zur Nachhaltigkeit: Ökologische Aspekte der Informations- und Kommunikationstechniken. Berlin u.a.: Springer.

- Behrendt, S., Scharp, M., Kahlenborn, W., Feil, M., Dereje, C., Bleisschwitz, R. & Delzeit, R. (2007). *Seltene Metalle, Maßnahmen und Konzepte zur Lösung des Problems konfliktverschärfender Rohstoffausbeutung am Beispiel Coltan*. Herausgegeben vom Umweltbundesamt, Dessau.
- Behrendt, S., Würtenberger, F. & Fichter, K. (2003). *Falluntersuchung zur Ressourcenproduktivität von E-Commerce, Werkstattbericht Nr. 52*. Berlin.
- Behrendt, S., Würtenberger, F. & Fichter, K. (2003). *Falluntersuchungen zur Ressourcenproduktivität von E-Commerce, IZT Werkstattbericht Nr. 52*. Berlin.
- Beucker, S., Bergset, L., Beeck, H., Bormann, F. & Riedel, M. (2012). Geschäftsmodelle für den Zukunftsmarkt des dezentralen Energiemanagements in Privathaushalten. Projektbericht erscheint Juli 2012, Berlin
- Beucker, S., Clausen, J., Schischke, K., Mwanza, J., Altendorf, P. & Reichl, H. (2008). Wireless Sensor Networks for Agriculture and Automation: Challenges and Chances for Sustainability. In Reichl et al. (Hrsg.), *Electronics Goes Green 2008+, Merging Technology and Sustainable Development, Proceedings*, Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag.
- Binswanger, M. (2001). Technological progress and sustainable development: what about the rebound-effect? *Ecological economics*, 36(1), 119-132.
- BMP - Bundesverband Wärmepumpe (2010). *Positionspapier Smart Grid. Der Beitrag der Wärmepumpe zum Lastmanagement in intelligenten Stromnetzen*. Bundesverband Wärmepumpe e.V.. Berlin.
- Buchert, M., Schluer D. & Bleher, D. (2009). *Critical Metals for future sustainable technologies and their recycling potential*. Freiburg i. Br.: Öko-Institut.
- Buchert, M., Hermann, A., Jenseit, W., Stahl, H., Osyguß, B. & Hagelücken, C. (2007). *Verbesserung der Edelmetallkreisläufe: Analyse der Exportströme von Gebrauchtpkw und – Elektro(nik)geräten am Hamburger Hafen, Kurzbericht eines Forschungsvorhabens im Auftrag des Umweltbundesamtes. Förderkennzeichen 363 01 133*. Umweltbundesamt. Dessau.
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) (Hrsg.) (2008). *Energieeffiziente Rechenzentren. Best Practice-Beispiele aus Europa, USA und Asien*. Verfügbar unter <http://borderstep.de/details.php?menu=33&le=de> [30.01.2009]
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), Umweltbundesamt (UBA) und Bundesverband Informationswirtschaft, Telekommunikation und neue Medien e.V. (BITKOM) (2011). Roadmap „Ressourceneffiziente Arbeitsplatz-Computerlösungen 2020“: Entwicklung eines Leitmarktes für Green Office Computing. Berlin, Dessau-Roßlau.
- Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) (2010). *Verkehrsprognosen zeigen: Güterverkehr wächst dramatisch*. Verfügbar unter http://www.bmvbs.de/DE/VerkehrUndMobilitaet/Verkehrspolitik/GueterverkehrUndLogistik/Aktionsplan/aktionsplan_node.html [20.11.2012]
- Bundesnetzagentur (2010). Bericht Wettbewerbliche Entwicklungen und Handlungsoptionen im Bereich Zähl- und Messwesen und bei variablen Tarifen, verfügbar unter: <http://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/BNetzA/Sachgebiete/Ener>

[gie/Sonderthemen/BerichtZaehlMesswesen/BerichtZaehlMesswesenpdf.pdf? blob=publicationFile](#) [18.06.2012]

- Bundesumweltministerium (Hrsg.) (2009). *Energieeffiziente Rechenzentren, Best Practice-Beispiele aus Europa, USA und Asien*. Erstellt durch Fichter, K. und Clausen, J. (2. Auflage). Berlin.
- Bundesverband Informationswirtschaft, Telekommunikation und neue Medien e.V. (BITKOM) (2012a). *Fernseher mit Internet-Anschluss werden Standard*. Pressemeldung vom 20.5.2012. Verfügbar unter: http://www.bitkom.org/de/presse/8477_72261.aspx [20.11.2012]
- Bundesverband Informationswirtschaft, Telekommunikation und neue Medien e.V. (BITKOM) (2012b). *Markt für Breitbandzugänge im Festnetz wächst weiter*. Presseinformationen vom 13.2.2012. Verfügbar unter: http://www.bitkom.org/de/presse/8477_71221.aspx [20.11.2012]
- Bundesverband Informationswirtschaft, Telekommunikation und neue Medien e.V. (BITKOM), Roland Berger (Hrsg.) (2007). *Zukunft digitale Wirtschaft*. Berlin.
- Bundesverband Informationswirtschaft, Telekommunikation und neue Medien e.V. (BITKOM) (Hrsg.) (2008a). *Blade-Server – Technologie, Einsatzgebiete und Betriebskonzepte*. Berlin.
- Bundesverband Informationswirtschaft, Telekommunikation und neue Medien e.V. (BITKOM) (Hrsg.) (2008b). *Energieeffizienz im Rechenzentrum. Ein Leitfaden zur Planung, zur Modernisierung und zum Betrieb von Rechenzentren*. Berlin.
- Bundesverband Informationswirtschaft, Telekommunikation und neue Medien e.V. (BITKOM) (Hrsg.) (2008c). *Mehr als 100 Millionen Mobilfunkanschlüsse in Deutschland* (Presseinformation vom 27.4. 2008). Berlin.
- Bundesverband Informationswirtschaft, Telekommunikation und neue Medien e.V. (BITKOM) (Hrsg.) (2008d). *Energieeffizienz-Analysen in Rechenzentren, Messverfahren und Checkliste zur Durchführung*. Berlin.
- Bundesverband Informationswirtschaft, Telekommunikation und neue Medien e.V. (BITKOM) (Hrsg.) (2009). *Planungshilfe Betriebssicheres Rechenzentrum*. Berlin.
- Bundesverband Informationswirtschaft, Telekommunikation und neue Medien e.V. (BITKOM) (Hrsg.) (2010). *Betriebssichere Rechenzentren – Leitfaden (Version 2)*. Berlin.
- Bundesverband Informationswirtschaft, Telekommunikation und neue Medien e.V. (BITKOM) (Hrsg.) (2010a). Presseinformation vom 9. August 2010, verfügbar unter: http://www.bitkom.org/64775_64770.aspx
- Bundesverband Informationswirtschaft, Telekommunikation und neue Medien e.V. (BITKOM) (2011). *Tablet Computer erobern den Massenmarkt*. Verfügbar unter http://www.bitkom.org/70902_70631.aspx [14.06.2012]
- Buttazoni, M. (2008). Potential global CO2 emission reductions from ICT use: Identifying and assessing the opportunities to reduce the first billion tonnes of CO2. Ecofys Italy Srl. World Wildlife Fund Sweden, Solna
- Cabrera, L. (2011). *Next week: The Microsoft Surface SDK and other Tools and Resources will be available to you!* The Microsoft Surface Blog.

<http://blogs.msdn.com/b/surface/archive/2011/07/07/new-tools-and-resources-for-surface-partners-for-the-samsung-sur40-for-microsoft-surface.aspx> [22.07.2011]

Cisco (2011a). Cisco Visual Networking Index – Forecast and Methodology, 2010–2015, White Paper. verfügbar unter:

http://www.cisco.com/en/US/solutions/collateral/ns341/ns525/ns537/ns705/ns827/white_paper_c11-481360.pdf [20.11.2012]

Cisco (2011b). *The Zettabyte Era*. Whitepaper. Verfügbar unter

http://www.cisco.com/en/US/solutions/collateral/ns341/ns525/ns537/ns705/ns827/VNI_Hyperconnectivity_WP.pdf. [18.07.2011]

Clausen, J. & Fichter, K. (2009a). *Energieeffizienz im Rechenzentrum. Intelligent modernisieren, Leistung steigern und Kosten sparen*. Hrsg. von der Deutschen Energie-Agentur (dena). Berlin.

Clausen, J. & Fichter, K. (2009b). *Ressourceneffiziente IT in Schulen. Optionen des energie- und materialeffizienten Einsatzes von Informationstechnik*. Hrsg. vom Umweltbundesamt. Verfügbar unter <http://www.umweltbundesamt.de/uba-info-medien/3914.html> [15.06.2012]

Clausen, J. & Fichter, K. (2009c). Wie wird ein Computer grün? Intelligente IT-Innovationen in Schulen. *Einblicke. Forschungsmagazin der Universität Oldenburg* 49, 48 – 51.

Clausen, J. & Fichter, K. (2009d). Wie wird ein Schul-Computer grün? Ressourceneffiziente IT-Innovationen. *AKP – Fachzeitschrift für Alternative Kommunalpolitik* 3, 50 – 52.

Clausen, J. & Fichter, K. (2010). *Ressourceneffiziente IT in Schulen. Optionen des energie- und materialeffizienten Einsatzes von Informationstechnik. MaRess Paper 9.1*. Verfügbar unter <http://ressourcen.wupperinst.org> [20.06.2012]

Clausen, J. & Winter, W. (2011). *Serverbasierte IT-Konzepte und ihre Auswirkungen auf Ergonomie, Datenschutz, Mitarbeiterzufriedenheit und Umweltschutz*. Verfügbar unter <http://www.borderstep.de/details.php?menue=33&subid=101&le=de> [15.06.2012]

Clausen, J. (2009). *Leitfaden Energieeffizienter Computereinsatz an Schulen - Thin Clients und Kompaktcomputer als neue Optionen*. Hrsg. von proKlima – den encercity fonds, Hannover.

Clausen, J., Fichter, K. & Hintemann, R. (2010). *Diskussionspapier "Ökologische Bewertung TC&SBC"*. Verfügbar unter <http://www.borderstep.de/details.php?menue=33&subid=101&le=de> [15.06.2012]

Clausen, J., Winter, W. & Sprute, C. (2011). *Serverbasierte IT-Konzepte und ihre Auswirkungen auf Ergonomie, Datenschutz, Mitarbeiterzufriedenheit und Umweltschutz. Handreichung für Betriebs- und Personalräte*. Verfügbar unter <http://www.borderstep.de/details.php?menue=33&subid=101&le=de> [15.06.2012]

Climate Group (2008). SMART 2020: Enabling the low carbon economy in the information age. A report by the Climate Group on behalf of the Global eSustainability Initiative (GeSI). Verfügbar unter: <http://www.gesi.org/LinkClick.aspx?fileticket=tbp5WRTHUoY%3D> (20.6.2012)

Cremer, C. et al. (2003). *Energy Consumption of Information and Communication Technology (ICT) in Germany up to 2010, Zusammenfassung des Endberichts für das Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit*. Karlsruhe, Zürich.

- C-Tech Innovation (2008). *Material Security, Ensuring resource availability for the UK economy, Resource Efficiency Knowledge Network*. Chester, Cheshire, UK.
- Deng, L., Williams, E. & Babbitt, C. (2008). Hybrid Life Cycle Assessment of Energy Use in Laptop Computer Manufacturing. IEEE International Symposium on Sustainable Systems and Technology. Phoenix, Arizona (USA): IEEE.
- Destatis (2012). Ausstattung privater Haushalte mit Informations- und Kommunikationstechnik – Deutschland. Quelle: https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/GesellschaftStaat/EinkommenKonsumLebensbedingungen/AusstattungGebrauchsguetern/Tabellen/Infotechnik_D.html [18.06.2012]
- Deutsche Energie-Agentur (Dena) (2010). *dena-Netzstudie II: Integration erneuerbarer Energien in die deutsche Stromversorgung im Zeitraum 2015 – 2020 mit Ausblick 2025*. Berlin.
- Deutsche Energie-Agentur (Dena) (Hrsg.) (2009). *Green IT: Potenzial für die Zukunft. Energieeffizienz steigern, Wachstumsmärkte erschließen und Nachhaltigkeit sichern*. Berlin.
- Deutsche Telekom (2008). *Corporate Responsibility Bericht 2008. Connected life and work*. Verfügbar unter <http://www.telekom.com/static/-/10124/1/cr-bericht-08-si> [15.06.2012]
- Deutscher Bundestag (2012). *Antrag, Sammlung und Recycling von Elektronikschrott verbessern* (Drucksache 17/8899, 17.3.2012). Verfügbar unter <http://dipbt.bundestag.de/dip21/btd/17/088/1708899.pdf> [15.06.2012]
- Donath, A. (26. Januar, 2011). Gestensteuerung: Tastatur beobachtet die Finger mit Kameras. *Golem.de*. Verfügbar unter <http://www.golem.de/1101/80980.html> [20.11.2012]
- eco – Verband der deutschen Internetwirtschaft e.V. (2008). *Bestandsaufnahme effiziente Rechenzentren in Deutschland*. Köln.
- EITO (2009). *Daten des European Information Technology Observatory*. Verfügbar unter [20.03.2009]
- Erdmann, L & Casal, C. R. (2005). Defining "Environmental Sustainability". *Information for development i4d*, 8, 15-17.
- Erdmann, L. & Behrendt, S. (2004). *The Precautionary Principle in the Information Society - The Impacts of Pervasive Computing on Health and Human Environment. Conference Proceedings. Electronics Goes Green*. Berlin.
- Erdmann, L. & Behrendt, S. (2006). *From Technology-Driven Roadmapping towards Sustainability-Oriented Roadmapping: Development and Application of an Integrated Method. Second International Seville Seminar on Future-Oriented Technology Analysis: Impact of FTA Approaches on Policy and Decision-Making*. 28-29 September 2006. Sevilla.
- Erdmann, L. & Hilty, L.M. (2011). Scenario Analysis: Exploring the Macroeconomic Impacts of Information and Communication Technologies on Greenhouse Gas Emissions. *Journal of Industrial Ecology* 15(5), 826-843.
- Erdmann, L. (2011). Quantifizierung der Umwelteffekte des privaten Gebrauchsgüterhandels am Beispiel von eBay, in: Behrendt, S., Blätzel-Mink, B. & Clausen, J. (2011). *Wiederverkaufskultur im Internet – Chancen für nachhaltigen Konsum am Beispiel von eBay*. Heidelberg: Springer. 127:158.

- Erdmann, L., Hilty, L., & Goodman, J. & Arnfalk, P. (2004). The future impact of ICTs on environmental sustainability. EUR21384. Seville, Spain: Institute for Prospective Technology Studies
- Erdmann, L., Forge, S., Houston, K. & Williams, R. (2010). *Evaluation of the Information and Communication Technology for Energy Efficiency (ICT4EEE) Forum Roadmap, Joint report of the Independent Panel of Experts, 2010.*
- Erdmann, L., Hilty, L., Goodman, J. & Arnfalk, P. (2004). The Future of ICT on Environmental Sustainability. IPTS Technical Report Series, EUR 21384 EN. European Commission JRC-IPTS. Sevilla.
- Erdmann, L., Behrendt, S. & Feil, M. (2011). Kritische Rohstoffe für Deutschland, Identifikation aus Sicht deutscher Unternehmen wirtschaftlich bedeutsamer mineralischer Rohstoffe, deren Versorgungslage sich mittel- bis langfristig als kritisch erweisen könnte, Kreditanstalt für Wiederaufbau, Frankfurt/M.
- EuP Lot 10; Riviere, P. (2008). *Preparatory study on the environmental performance of residential room conditioning appliances (airco and ventilation). Draft report of Task 5 July 2008.*
- EuP Lot 3; Jönbrink, A. K. (2007). *EuP Lot 3 Personal Computers (desktops and laptops) and Computer Monitors. IVF Industrial Research and Development Corporation, European Commission DG TREN. August 2007.*
- European Commission (2010). *Critical Raw Materials for the EU. Report of the Ad-hoc Working Group on defining critical raw materials.*
- Facebook (2012). *Key Facts*. Verfügbar unter <http://newsroom.fb.com/Key-Facts> [20.11.2012]
- Fichter K. (2008c). Energie- und Materialeinsparpotenzial von Thin Client & Server Centric Computing, Trends und Einsparpotenziale bis 2020. Berlin. Verfügbar unter <http://www.borderstep.de/details.php?menue=33&subid=101&le=de> [15.06.2012]
- Fichter, K. & Arnold, M. (2004). Nachhaltigkeitsinnovationen, Nachhaltigkeit als strategischer Faktor. *Unternehmensführung und Betriebliche Umweltpolitik. Schriftenreihe am Lehrstuhl für Allgemeine Betriebswirtschaftslehre, 38*. Berlin, Oldenburg.
- Fichter, K. & Beucker, S. (2008). *Innovation Communities - Promotorennetzwerke als Erfolgsfaktor bei radikalen Innovationen*. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag.
- Fichter, K. & Clausen, J. (2010). Einsparpotenziale von Thin Clients & Server Centric Computing auf nationaler und europäischer Ebene. In F. Lampe (Hrsg.) (2010). *Green-IT, Virtualisierung und Thin Clients: Mit neuen IT-Technologien Energieeffizienz erreichen, die Umwelt schonen und Kosten sparen* (S. 141 – 152.). Wiesbaden.
- Fichter, K. (2001). *Umwelteffekte von E-Business und Internetökonomie. Arbeitspapier für das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit*. Berlin.
- Fichter, K. (2002). Sustainable Business Strategies in the Internet Economy. In Park, J, Roome, N. (Hrsg.), *The Ecology of the New Economy* (S.22-34). Sheffield: Greenleaf.
- Fichter, K. (2003). E-Commerce - Sorting Out the Environmental Consequences. *Journal of Industrial Ecology, Volume 6(2)*, 25 – 41.

- Fichter, K. (2004). Bits statt Atome? Umweltrelevante Auswirkungen der Internetnutzung. In Institut für Mobilitätsforschung (ifmo) (Hrsg.), *Auswirkungen der virtuellen Mobilität* (S. 99-118). Berlin, Heidelberg, New York: Springer.
- Fichter, K. (2005). Innovation Communities: Die Rolle von Promotorennetzwerken bei Nachhaltigkeitsinnovationen. In Pfriem, R. et al. (Hrsg.). *Innovationen für eine nachhaltige Entwicklung*. Wiesbaden: Deutscher Universitätsverlag (S. 287 – 300).
- Fichter, K. (2005). *Interpreneurship, Nachhaltigkeitsinnovation in interaktiven Perspektiven eines vernetzenden Unternehmertums* (Habilitationsschrift). Marburg: Metropolis.
- Fichter, K. (2006). *Das „e-place“-Konzept der IBM Deutschland*. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag.
- Fichter, K. (2007). *Zukunftsmarkt energieeffiziente Rechenzentren*, Berlin.
- Fichter, K. (2008a). *Energieverbrauch und Energiekosten von Servern und Rechenzentren in Deutschland, Trends und Einsparpotenziale bis 2013*. Berlin. Verfügbar <http://www.borderstep.de/details.php?menue=33&subid=101&le=de> [15.06.2012]
- Fichter, K. (2008b). *Zukunftsmarkt energieeffiziente Rechenzentren. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit*. Berlin.
- Fichter, K., Beucker, S., Clausen, J. & Hintemann, R. (2009). *Green IT: Zukünftige Herausforderungen und Chancen. Hintergrundpapier für die BMU/UBA/BITKOM-Jahreskonferenz 2009*. Dessau.
- Fichter, K., Beucker, S., Noack, T. & Springer, S. (2007). *Entstehungspfade von Nachhaltigkeitsinnovationen*. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag.
- Fichter, K., Clausen, J. & Hintemann, R. (2010). *Szenarien „Arbeitsplatzbezogene Computerlösungen 2020“, Arbeitspapier im Rahmen von AP 9 Roadmap-Dialoge des Vorhabens „Materialeffizienz und Ressourcenschonung (MaRess)“*. Berlin. Verfügbar <http://www.borderstep.de/details.php?menue=33&subid=101&le=de> [15.06.2012]
- Fichter, K. & Clausen, J. (2008). *Ressourceneffizienzpotenziale des Thin Client & Server Based Computing, MaRess-Diskussionspapier*. Berlin.
- Fichter, K., Noack, T., Beucker, S., Bierter, W. & Springer, S. (2006). *Nachhaltigkeitskonzepte für Innovationsprozesse*. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag.
- Fichter, K., Paech, N. & Pfriem, R. (2005). *Nachhaltige Zukunftsmärkte - Orientierungen für unternehmerische Innovationsprozesse im 21. Jahrhundert*. Marburg: Metropolis.
- Fischer, C. (2007). Influencing electricity consumption via consumer feedback: a review of experience. Forschungsstelle für Umweltpolitik, Berlin: Freie Universität Berlin., verfügbar unter: http://www.eceee.org/conference_proceedings/eceee/2007/Panel_9/9.095/paper (19.6.2012)
- Fischer, C. (2008). Feedback on Household electricity consumption: a tool for saving energy. *Energy Efficiency*, 1(1), 79-104.
- Fletcher, O. (4. Juli, 2011). Alibaba aims to launch Operating System for mobile phones. *Wall Street Journal*. Verfügbar unter <http://online.wsj.com/article/BT-CO-20110704-702552.html>. [04.07.2011]

- Fraunhofer Institut Umwelt-, Sicherheits-, Energietechnik UMSICHT (2008). *Ökologischer Vergleich der Klimarelevanz von PC und Thin Client Arbeitsplatzgeräten*. Oberhausen.
- Fraunhofer IZM/ISI (2009). Abschätzung des Energiebedarfs der weiteren Entwicklung der Informationsgesellschaft. Abschlussbericht an das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie. Berlin, Karlsruhe. März 2009.
- Gibson, L., Bein, M. & Plamondon, B. (2008). *Innovating toward a low-carbon Canada: Using technology to transform tomorrow*. Toronto, Canada: World Wildlife Fund Canada.
- Goodman, J. & Alakeson, V. (2003). *The future impact of ICT on environmental sustainability. Scenarios. Third interim report*. London: Forum for the Future.
- Graedel, T.E. (2008). *Defining Critical Materials, Center for Industrial Ecology, Yale School of Forestry & Environmental Studies. Vortrag bei Wuppertal Colloquium Sustainable Growth, Sep 17 – 19 2008*.
- Gray, L. (2. September, 2011). In einem öffentlichen Beitrag auf Google+. Verfügbar unter <https://plus.google.com/100535338638690515335/posts> [20.11.2012]
- Greening, L., Greene, D. L. & Difiglio, C. (2000). Energy efficiency and consumption: The rebound effect - A survey. *Energy Policy*, 28(6–7), 389–401.
- Hagelüken C. (2006) (Umicore Precious Metals Refining). Improving metal returns and eco-efficiency in electronics recycling – a holistic approach for interface optimisation between pre-processing and integrated metals smelting and refining .Proceedings of the 2006 IEEE International Symposium on Electronics & the Environment, 8-11 May 2006, San Francisco. (S. 218-223).
- Hagelüken, C. (2012): *Welche Weichenstellungen sind auf europäischer Ebene notwendig, um die Versorgung mit metallischen Sekundärrohstoffen nachhaltig zu sichern? Vortrag auf dem Berliner Abfall- und Recyclingkongress, 19.4.2012: Verfügbar unter http://www.cyclos.de/fileadmin/user_upload/focus-cong-ress_2012/Vortrag_4_Hagelueken_Welche_Weichenstellungen_sind_auf_europaeischer_Ebene_notwenig.pdf [14.06.2012]*
- Heise Online (20. Juli, 2011a). Mehr als 30 Prozent Umsatzplus bei VMware. *Heise Online*. Verfügbar unter <http://heise.de/-1282680> [20.11.2012]
- Heise Online (28. Juni, 2011b). Ende der Beta-Phase: Microsoft Office 365 startet. *Heise Online*. Verfügbar unter <http://heise.de/-1269279>. [20.11.2012]
- Heise Online (6. Juli, 2011c). Universität von Nebraska steigt auf Office 365 um. *Heise Online*. Verfügbar unter <http://heise.de/-1274263>. [20.11.2012]
- Hertin, J. & Berkhout, F. (2003). Informationstechnologien und Klimaschutz In M. Angrick (Hrsg.), *Auf dem Weg zur nachhaltigen Informationsgesellschaft* (S. 55-72). Marburg.
- Heubach, D., Beucker, S. & Lang-Koetz, C. (2009). *Einsatz von Nanotechnologie in der hessischen Umwelttechnologie – Innovationspotenziale für Unternehmen, Unternehmensbroschüre der Aktionslinie hessen-umwelttech und hessen-nanotech des Hessischen Ministeriums für Wirtschaft, Verkehr und Landesentwicklung* (2. aktualisierte Auflage). Wiesbaden.

- Hewlett Packard (HP) (2008). *FY07 Global Citizenship Report*. Verfügbar unter www.hp.com [Januar 2009]
- Hilty, L. M. (2008). *Information Technology and Sustainability, Essays on the Relationship between Information Technology and Sustainable Development*. Norderstedt: Books on Demand GmbH.
- Hilty, L. M., Arnfalk, P., Erdmann, L., Goodman, J., Lehmann, M. & Wäger, P. (2006) The Relevance of Information and Communication Technologies for Environmental Sustainability – A Prospective Simulation Study. *Environmental Modelling & Software*, 21 (11), 1618-1629. doi:10.1016/j.envsoft.2006.05.007
- Hilty, L. M., Behrendt, S., Binswanger, M., Bruinink, A., Erdmann, L., Froehlich, J., Köhler, A., Kuster, N., Som, C. & Würtenberger, F. (2005). *The Precautionary Principle in the Information Society - Effects of Pervasive Computing on Health and Environment* (2. Überarbeitete Aufl.). Swiss Center for Technology Assessment (TA-SWISS), Bern (TA46e/2005) and Scientific technology options assessment at the European Parliament (STOA 125 EN)
- Hilty, L. M., Wäger, P., Lehmann, M., Hirsch, R., Ruddy, T. & Binswanger, M. (2004). *The future impact of ICT on environmental sustainability. Refinement and quantification. Fourth interim report*. St. Gallen, Switzerland: Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research.
- Hilty, L., Lohmann, W. & Wölk, M. (2012). *Arbeitspaket 1.1: Trendanalyse: Bedeutung von Softwarearchitekturen, aktuelle Entwicklungen und Herausforderungen*. Unveröffentlichtes Arbeitspapier des Forschungsprojekts Grüne Software im Auftrag des Umweltbundesamtes.
- Hilty, L.M. & Lohmann, W. (2011). *Trendanalyse: Bedeutung von Softwarearchitekturen, aktuelle Entwicklungen und Herausforderungen*. Unveröffentlichtes Arbeitspapier aus dem UFO-PLAN-Vorhaben "Grüne Software: Ermittlung und Erschließung von Umweltschutzpotenzialen der Informations- und Kommunikationstechnik (Green IT), TV 3: Potenzialanalyse zur Ressourcenschonung optimierter Softwareentwicklung und –einsatz, Zürich.
- Hintemann, R. & Fichter, K. (2012). *Energieverbrauch und Energiekosten von Servern und Rechenzentren in Deutschland: Aktuelle Trends und Einsparpotenziale bis 2015*. Berlin. Mai 2012.
- Hintemann, R. & Skurk, H. (2010). Energieeffizienz im Rechenzentrum. In F. Lampe (Hrsg.) (2010), *Green-IT, Virtualisierung und Thin Clients: Mit neuen IT-Technologien Energieeffizienz erreichen, die Umwelt schonen und Kosten sparen* (S. 19 – 56). Wiesbaden.
- Hintemann, R. (2011). Grün durch Thin Clients. In Bundesministerium des Inneren (Hrsg.), *Greenletter*, 1, 12. Verfügbar unter www.cio.bund.de. [20.12.2012]
- Hintemann, R. & Fichter, K. (2010). *Materialbestand in deutschen Rechenzentren – Eine Bestandsaufnahme zur Ermittlung von Ressourcen- und Energieeinsatz*. Hrsg. vom Umweltbundesamt (UBA). Dessau. Verfügbar unter http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/3708_93_302_materialbestand_bf.pdf [14.06.2012]
- Holstein, B. D. (6. Juni, 2011). *Speed delivery of Android devices and applications with model-driven development*. Verfügbar unter

<https://www.ibm.com/developerworks/rational/library/model-driven-development-speed-delivery/>. [20.11.2012]

- IBM (2008). *2007–2008 Corporate Responsibility Report*. Verfügbar unter www.ibm.com [Januar 2009]
- IDC (Hrsg.) (2011). *2011 IDC Digital Universe Study*. Framingham.
- Ihlenfeld, J. (21. März, 2007). Markt für x86-Server vor dem Umbruch: Weniger physische Server dank Multi-Core-Systemen und Virtualisierung. *Golem.de*. Verfügbar unter <http://www.golem.de/0703/51235.html> [20.11.2012]
- Ihlenfeld, J. (7. Juli, 2011). Facebook aktiviert automatische Gesichtserkennung. *Golem.de*. Verfügbar unter <http://www.golem.de/1106/84038.html> [20.11.2012]
- Initiative D 21 (2012). *Mobile Internetnutzung – Entwicklungsschub für die Digitale Gesellschaft*. Verfügbar unter: http://www.initiatived21.de/wp-content/uploads/2012/02/Mobile_Internetnutzung_2012.pdf [20.11.2012]
- IPTS RFID Technologies: Emerging Issues, Challenges and Policy Options. Institute for Prospective Technology Studies (IPTS), unter Mitarbeit von Britta Oertel (IZT), 2007
- ISI/IZT (2009) Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung (ISI), Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung (IZT). Rohstoffbedarf für Zukunftstechnologien, Einfluss des branchenspezifischen Rohstoffverbrauchs in rohstoffintensiven Zukunftstechnologien auf die zukünftige Rohstoffnachfrage, Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie, Berlin, 2009.
- IW (2012). Institut der deutschen Wirtschaft, Bardt, H.: Gehen uns die Rohstoffe aus, BME-Tagung, Mainz, 21.5.2012
- IZT/adelphi (2011) - Erdmann, L., Behrendt, S. & Feil, M.. Kritische Rohstoffe für Deutschland, Identifikation aus Sicht deutscher Unternehmen wirtschaftlich bedeutsamer mineralischer Rohstoffe, deren Versorgungslage sich mittel- bis langfristig als kritisch erweisen könnte, Kreditanstalt für Wiederaufbau, Frankfurt/M.
- Köhler, A. & Erdmann, L. (2004). Expected environmental impacts of pervasive computing. *Human and Ecological Risk Assessment*, 10(5), 831 - 852.
- Koomey, G. J. (2007). *Estimating Total Power Consumption by Servers in the U.S. and the World* (Final report, February 15, 2007).
- Kretschmer, T., Pittel, K., Albrecht, J., Strobel, T., Essling, C., Pfeiffer, J. & Röpke, L. (2011). Wohlstand und Produktivität, Studie für die Enquete Kommission des Deutschen Bundestags „Wachstum, Wohlstand, Lebensqualität“, verfügbar unter: <http://www.bundestag.de/bundestag/ausschuesse17/gremien/enquete/wachstum/gutachten/m17-26-14.pdf> [10.4.2012].
- Kuchta, K. (2012). Recycling seltener Erdmetalle gewährleistet Klimaschutz und Versorgungssicherheit,. In *TU International* 69, 32-34.

- Kuhndt, M., Geibler, J. v., Türk, V., Moll, S., Schallaböck, K. O. & Steger, S. (2003). Virtual dematerialization. ebusiness and factor X. Digital Europe. WP 3. Wuppertal. verfügbar unter: <http://cordis.europa.eu/documents/documentlibrary/66624241EN6.pdf> [19.6.2012].
- Labouze, E., Iyama, C. S., Beton, A., Stobbe, L., Gallehr, S. & Scheidt, L. G. (2008). *Impacts of information and communication technologies on energy efficiency. Final report*. Bio Intelligence Service. Brussels, Belgium: European Commission DGINFSO.
- Laitner, J. A. S. & Ehrhardt-Martinez, K. (2008). *Information and communication technologies: The power of productivity. Report number E081*. Washington.
- Laitner, J. A. S., Koomey, J. G., Worrell, E. & Gumerman, E. (2001). *Re-estimating the annual energy outlook 2000 forecast using updated assumptions about the information economy*. New Orleans, LA.
- Madlener, R. (2008). The implications of ICT for energy consumption. Study report 09/2008. Bonn, Germany: empirica/Brussels, Belgium: European Commission. Verfügbar unter: http://ec.europa.eu/enterprise/archives/e-business-watch/studies/special_topics/2007/documents/Study_09-2008_Energy.pdf [19.6.2012]
- Madlener, R. & Alcott, B. (2011). Herausforderungen für eine technisch-ökonomische Entkopplung von Naturverbrauch und Wirtschaftswachstum unter besonderer Berücksichtigung der Systematisierung von Rebound-Effekten und Problemverschiebungen, Studie für die Enquete Kommission des Deutschen Bundestags „Wachstum, Wohlstand, Lebensqualität“, verfügbar unter: <http://www.bundestag.de/bundestag/ausschuesse17/gremien/enquete/wachstum/gutachten/m17-26-13.pdf> [20.5.2012].
- MakeITfair (2007a). *Capacitating Electronics. The corrosive effects of platinum and palladium mining on labour rights and communities*, SOMO-Center for Research on Multinational Corporations, Niederlande, November 2007.
- MakeITfair (2007b). MakeITfair: Connecting Components, Dividing Communities. Tin production for consumer electronics in the DR Congo and Indonesia. FinnWatch, Dezember 2007.
- MakeITfair (2007c). MakeITfair: Gender Aspects. Production of Next-generation electronics in Poland. KARAT, Dezember 2007.
- MakeITfair (2007d). MakeITfair: Powering the Mobile World. Cobalt production for batteries in the DR Congo and Zambia. SwedWatch - November 2007.
- MakeITfair (2008). MakeITfair: Silenced to deliver. Mobile Phone manufacturing in China and the Philippines. SwedWatch and SOMO - September 2008.
- Mallon, K., Johnston, G., Burton, D. & Cavanagh, J. (2007). Towards a High-Bandwidth, Low-Carbon Future: Telecommunications-based Opportunities to Reduce Greenhouse Gas Emissions. Version 1.0. Fairlight, Australia: Climate Risk.
- McVeigh, C., Sandieson, G., Newitt, T., Webb, B., Keeble, J., Yurisich, S., Gordon, A. & Veillard, X. (2009). *Carbon connections: Quantifying mobile's role in tackling climate change*. Newbury Berkshire, UK: Vodafone/London: Accenture.

- MFS - Medienpädagogischer Forschungsverbund Südwest (2011). JIM 2011: Jugend, Information, (Multi-) Media. Basisstudie zum Medienumgang 12- bis 19- Jähriger in Deutschland, Stuttgart.
- Miller, C. C. (9. Mai, 2011). Google to Start a Cloud-Based Music Player. *The New York Times*. Verfügbar unter <http://bits.blogs.nytimes.com/2011/05/09/google-to-start-a-cloud-based-music-player/> [20.11.2012]
- Ministry of Internal Affairs and Communications (2008). Report from Study Group on ICT Policy for Addressing Global Warming. *Communications news*, 19(8), 1-7.
- Mobl (2011). *Website*. Verfügbar unter <http://www.mobl-lang.org/> [20.11.2012]
- National Research Council (2007). *Minerals, Critical Minerals, and the U.S. AND THE U.S. Economy*. Washington D.C.
- Nissen, N. F., Griese, H., Müller, J., Middendorf, A. & Funk, T. (2000). Environmental Assessment Using the IZM/EE Toolbox. In: Reichl, H, Griese, H. (Hrsg.), *Electronics goes green 2000+. A Challenge for the Next Millennium. Proceedings, 1, Technical Lectures, September 11-13 2000* (527 – 532). Berlin: VDE-Verlag.
- nova-net Konsortium (Hrsg.) (2006). *Nutzung von Internet und Intranet für die Entwicklung neuer Produkte und Dienstleistungen*. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag.
- OECD – Organisation for Economic Co-operation and Development (2008). OECD Umweltausblick bis 2030, Paris
- Öko-Institut (2011). *E-Book-Reader – Entwicklung der Vergabekriterien für ein klimaschutzbezogenes Umweltzeichen*, Freiburg/Br.
- Organization for Economic Cooperation and Development (OECD) (2009). *Declaration on green growth. Adopted at the council meeting at ministerial level on 25 June 2009*. Paris: Organization for Economic Cooperation and Development.
- Pamlin, D. & Szomolányi, K. (2007). *Saving the climate @ the speed of light. First roadmap for reduced CO2 emissions in the EU and beyond*. Solna, Sweden.
- Pixable Blog (2011). *Facebook Photo Trends [INFOGRAPHIC]*. Verfügbar unter <http://classic.pixable.com/blog/2011/02/14/facebook-photo-trends-infographic/> [20.11.2012]
- Pöschk, J. (Hrsg.) (2010). *Energieeffizienz in Gebäuden – Jahrbuch 2010*. Berlin: VME.
- Prakash, S., Liu, R., Schischke, K. & Stobbe, L. (2011). Schaffung einer Datenbasis zur Ermittlung ökologischer Wirkungen der Produkte der IKT., unter Mitarbeit von Gensch, C.-O. im Rahmen des Ufoplanvorhabens 2009 Ressourcenschonung im Aktionsfeld Informations- und Kommunikationstechnik (IKT) - FKZ 3709 95 308, Öko-Institut e.V. in Kooperation mit Fraunhofer Institut für Zuverlässigkeit und Mikrointegration (IZM), Umweltbundesamt, Dessau2012.
- Riedel, M. (2006). Hausautomation als wirtschaftliches Instrument für Energieeffizienz, in: Pöschk, J.: *Energieeffizienz in Gebäuden*, Jahrbuch 2006, Berlin: VME Verlag.

- Riedel, M. (2007). Mehrebenensteuerung für Energieeinspar-Contracting in Schulen und Kitas - Heizen nach Stundenplan, in: Pöschk, J.: *Energieeffizienz in Gebäuden*, Jahrbuch 2007, Berlin: VME Verlag.
- Romm, J., Rosenfeld, A. & Herrmann, S. (1999). *The Internet economy and global warming. A scenario of the impact of e-commerce on energy and the environment*. Arlington, VA: Center for Energy and Climate Solutions.
- Sander, K. & Schilling, S. (2010). Optimierung der Steuerung und Kontrolle grenzüberschreitender Stoffströme bei Elektroaltgeräten / Elektroschrott. Hrsg. vom Umweltbundesamt. UBA Texte 12/2010Dessau. Verfügbar unter: <http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/3769.pdf> [19.6.2012]
- Santarius, T. (2012). Der Rebound-Effekt. Über die unerwünschten Folgen der erwünschten Energieeffizienz, Wuppertal, März 2012.
- Schenk, M., Wolf, A., Wolf, M. & Schmitt-Walter, N. (2011). *Nutzung und Akzeptanz von Internet und E-Commerce 2010*. Stuttgart-München.
- Schischke, K. & Kohlmeyer, R. (2004). *Umweltbewertung des ReUse von PCs, Berlin*.
- Schischke, K, Beucker, S., Clausen, J. & Niedermayer, M. (2009). Innovations- und Technikanalyse Autonomer Verteilter Mikrosystem, Endbericht des Projektes ITA-AVM, Berlin
- Simons, R. J. G. & Pras, A. (2010). *The Hidden Energy Cost of Web Advertising. Technical Report TR-CTIT-10-24, Centre for Telematics and Information Technology University of Twente*. Enschede. Verfügbar unter <http://eprints.eemcs.utwente.nl/18066/> [20.11.2012]
- Sorrell, S., Dimitropoulos, J. & Sommerville, M. (2009). Empirical estimates of the direct rebound effect: A review. *Energy Policy* 37(4), 1356–1371.
- Statistisches Bundesamt (2009). Zuhause in Deutschland, Ausstattung und Wohnsituation privater Haushalte, Ausgabe 2009, Wiesbaden
- Steinlechner, P. (2011c). Fleet Commander: Star Wars in 8.160 x 2.304 Pixeln. *Golem.de*. <http://www.golem.de/1107/84888.html>. [20.11.2012]
- Stobbe, L. & Schlösser, A. Strombedarf der IK in Haushalten, : Technik, Nutzung und Systemdesign, Fraunhofer-IZM, verfügbar unter: http://www.energyagency.at/fileadmin/aea/pdf/publikationen/veranstaltungen/3_HOME-ICT_Stobbe_Schloesser.pdf [20.6.2012]
- Suma, E.A., Lange, B., Rizzo, A., Krum, D.M. & Bolas, M. (2011). FAAST: The Flexible Action and Articulated Skeleton Toolkit". *Virtual Reality Conference (VR), 2011 IEEE . 19-23 March 2011, 247-248*. doi: 10.1109/VR.2011.5759491
- Taylor, C. & Koomey, J. (2008). Estimating Energy Use and Greenhouse Gas Emissions of Internet Advertising. Dallas, New York City, Philadelphia: IMC2.
- TechConsult (2009). *Daten des E-Analysers*
- The Boston Consulting Group & Global e-Sustainability Initiative (BCG) & (GeSI) (Hrsg.) (2009). SMART 2020 Addendum Deutschland: Die IKT-Industrie als treibende Kraft auf dem Weg zu nach-

- haltigem Klimaschutz. Verfügbar unter www.telekom.com/static/-/10038/1/smart-2020-si [20.11.2012]
- Thiesen, J., Christensen, T.S., Kristensen, T.G., Andersen, R.D., Brunoe, B., Gregersen, T.K., Thrane, M. & Weidema, B. P. (2008). Rebound effects of price differences. *International Journal of Life Cycle Assessment* 13(2), 104–114.
- Trueb, L. F. & Rüetschi, P. (1997). *Batterien und Akkumulatoren: Mobile Energiequellen für heute und morgen*. Berlin: Springer.
- TU Berlin (2008). Technische Universität Berlin (TU) Innovationszentrum Energie (IZE) (Hrsg) (2008). *Konzeptstudie zur Energie- und Ressourceneffizienz im Betrieb von Rechenzentren*, Berlin.
- Tukker, A., Huppel, G., Guinée, J., Heijungs, R., Koning, A. de, Oers, L. van, Suh, S., Geerken, T., Holderbeke, M. van, Jansen, B. & Nielsen, P. (2006). Environmental impact of products (EIPRO). Analysis of the life cycle impacts related to final consumption. verfügbar unter: http://ec.europa.eu/environment/ipp/pdf/eipro_report.pdf [19.6.2012].
- U.S. Environmental Protection Agency (US EPA) (2007). *Report to Congress on Server and Data Center Energy Efficiency, Public Law 109-431*, August 2, 2007.
- U.S. Environmental Protection Agency (US EPA) (2009). External Power Supplies. Verfügbar unter http://www.energystar.gov/index.cfm?c=archives.power_supplies [15.06.2012]
- UGR (2011). *Umweltnutzung und Wirtschaft, Bericht zu den Umweltökonomischen Gesamtrechnungen*, Statisches Bundesamt, Wiesbaden
- UMSICHT 2006] Fraunhofer-Institut Umwelt-, Sicherheits-, Energietechnik (UMSICHT) (2006). *Ökologischer Vergleich von PC und Thin Client Arbeitsplatzgeräten*. Oberhausen.
- Umweltbundesamt (2010). Sander, K. & Schilling, S. *Optimierung der Steuerung und Kontrolle grenzüberschreitender Stoffströme bei Elektroaltgeräten / Elektroschrott*, Dessau.
- Umweltbundesamt (2012). *Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix 1990 – 2010 und erste Abschätzungen 2011*, Dessau-Roßlau, April 2012.
- Umweltbundesamt (UBA) (Hrsg.) (2009). *Computer, Internet und Co.: Geld sparen und Klima schützen, Verbraucherbrochure*. Dessau,. <http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/3725.pdf> [15.06.2012]
- UN – United Nations (2008). *World Urbanization Prospects, The 2007 Revision, Highlights*, New York
- VDE (2009). *Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V. Informations- und Kommunikationstechnik: Perspektiven und Chancen, Ein Positionspapier der , Informations-technischen Gesellschaft im VDE (ITG)*, Frankfurt/M.
- VDI Nachrichten, <http://www.vdi-nachrichten.com/artikel/Rfid-optimiert-Lager-und-Logistikprozesse/58303/2> [08.06.2012]
- Walle, M. & Jennings, N. (2001). *Safety & health in small-scale surface mines, A handbook*. Geneva: International Labour Office.
- Weber, C. L., Koomey, J. G. & Matthews, H. S., 2010. *The Energy and Climate Change Implications of Different Music Delivery Methods. Final Report to Microsoft Corporation and Intel Cor-*

poration, verfügbar unter:

<http://download.intel.com/pressroom/pdf/cdsvsdownloadsrelease.pdf> [19.6.2012]

Wüthrich, M. (23. Mai, 2011). Hinweise auf Apples Cloud-Musikdienst. *Swiss IT Magazine*. Verfügbar unter http://www.itmagazine.ch/Artikel/46776/Hinweise_auf_Apples_Cloud-Musikdienst.html [20.11.2012]

WWF - World Wildlife Fund /Brussels (2003). European Telecommunications Network Operators' Association. Rejeski, D. 2003. E-commerce, the Internet and the environment. *Journal of Industrial Ecology* 6(2): 1–3.

WWF (Hrsg) (2008). The potential global CO2 reductions from ICT use, Solna/Sweden.

Yi, L. & Thomas, H. (2007). A review of research on the environmental impact of e-business and ICT. *Journal of Environment International* 33(6): 841– 849. 840 Journal

ZVEI (2009). Mit Hightech für Umwelt- und Klimaschutz. Zentralverband Elektrotechnik und Elektronik, Frankfurt/M.

ZVEI (2009). Technologie-Roadmap Automation 2020+: Energie. Zentralverband Elektrotechnik und Elektronik, Frankfurt/M.