

TEXTE

66/2016

Ökologische und ökonomische Aspekte beim Vergleich von Arbeitsplatzcomputern für den Einsatz in Behörden unter Einbeziehung des Nutzerverhaltens (Öko-APC)

TEXTE 66/2016

Umweltforschungsplan des
Bundesministeriums für Umwelt,
Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit

Forschungskennzahl 3712 95 301
UBA-FB 002385

Ökologische und ökonomische Aspekte beim Vergleich von Arbeitsplatzcomputern für den Einsatz in Behörden unter Einbeziehung des Nutzerverhaltens (Öko-APC)

von

Siddharth Prakash, Florian Antony, Dr. Andreas R. Köhler, Ran Liu
Öko-Institut e.V., Merzhauser Str. 173; 79100 Freiburg

In Zusammenarbeit mit

Alexander Schlösser, Technische Universität Berlin, Gustav-Meyer-Allee 25,
13355 Berlin

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

Herausgeber:

Umweltbundesamt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
Tel: +49 340-2103-0
Fax: +49 340-2103-2285
info@umweltbundesamt.de
Internet: www.umweltbundesamt.de

 /umweltbundesamt.de

 /umweltbundesamt

Durchführung der Studie:

Siddharth Prakash, Florian Antony, Dr. Andreas R. Köhler, Ran Liu
Öko-Institut e.V., Merzhauser Str. 173; 79100 Freiburg

Alexander Schlösser
Technische Universität Berlin, Gustav-Meyer-Allee 25, 13355 Berlin

Abschlussdatum:

01/2016

Redaktion:

Umweltbundesamt
Beratungsstelle nachhaltige Informations- und Kommunikationstechnik (Green-IT)
Marina Köhn
Fachgebiet III 1.1 (Übergreifende Aspekte des Produktbezogenen Umweltschutzes,
Nachhaltige Konsummuster, Innovationsprogramm)
Maike Janßen

Publikationen als pdf:

<http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/>

ISSN 1862-4804

Dessau-Roßlau, September 2016

Das diesem Bericht zu Grunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit unter der Forschungskennzahl 3712 95 301 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

Kurzbeschreibung

Das Ziel des Vorhabens war, die ökologischen und ökonomischen Auswirkungen von typischen informationstechnikgestützten Arbeitsplätzen in Bundesbehörden und vergleichbaren Einrichtungen zu untersuchen und die Potentiale zur Ressourceneinsparung aufzuzeigen. Die Studie hat gezeigt, dass ein Computerarbeitsplatz mit Mini-PC sowohl ökologisch als auch ökonomisch die beste Variante darstellt. Im Gegensatz weist ein Computerarbeitsplatz mit Notebook die höchsten Lebenszykluskosten sowie die höchsten Treibhausgasemissionen auf. Der Hauptgrund ist die kürzere Nutzungsdauer von 3 Jahren von Notebooks, womit die hohe Umweltrelevanz der Hardwareherstellung besonders stark zu Buche schlägt. Die Herstellungsphase von Computerarbeitsplätzen mit Notebooks verursacht ca. 83% der Gesamttreibhausgasemissionen, wobei die mikroelektronischen Komponenten, wie das Motherboard, der Arbeitsspeicher und die SSD fast 84% der Treibhausgasemissionen der Herstellung ausmachen. Die Studie zeigt, dass eine Nutzungsdauerverlängerung von 3 auf 6 Jahre von Notebooks eine Einsparung von 390 kg CO₂e und 527 € pro Produkt bewirkt. Bei einem angenommenen Anteil von 33% der Computerarbeitsplätze mit Notebooks in der Bundesverwaltung ließen sich damit ca. 95 Millionen Euro und Treibhausgasemissionen von 71.000 Tonnen CO₂e in 10 Jahren einsparen. Als Schlussfolgerung empfiehlt die Studie die Nutzungsdauerverlängerung von IKT-Geräten als Kernstrategie für die Bundesverwaltung. Außerdem betont die Studie, dass Mini-PCs, und nicht Desktop-PCs oder Notebooks, für die stationären Arbeitsplätze eingesetzt werden sollen. Zum Schluss empfiehlt die Studie einen 6-Punkte-Plan für die Bundesverwaltung, um die Umweltauswirkungen und Gesamtkosten von IKT-Geräten zu reduzieren.

Abstract

The objective of the study was to assess the ecological and economic impact of various IT-solutions in public authorities in Germany and to show the potential for resource efficiency. The study found out that an IT-solution based on mini-computer is the best alternative from environment as well as costs perspective. On the other hand, IT-solutions based on notebooks lead to highest costs as well as greenhouse gas emissions. The reason for high total greenhouse gas emissions of IT-solutions based on notebooks is attributed to the shorter usage-time of 3 years of notebooks, mainly due to the high impact of hardware manufacturing in the supply chain. The production phase of IT-solutions based on notebooks accounted for about 83% of the total greenhouse gas emissions, whereby electronics micro-components, such as the motherboard, memory and SSD account for almost 84% of the greenhouse gas emissions during the manufacturing. The study also shows that increasing the usage-time of notebooks from 3 to 6 years would yield greenhouse gas emission reduction of 390 kg CO₂e and costs reduction of 527 Euros per product. Assuming a 33% share of IT-solutions based on notebooks in the German public authorities, savings of about 95 Million Euros and 71,000 tonnes of CO₂e can be achieved in 10 years. Thus, the study concluded that the extension of the usage-time of ICT products should be the main strategy for the public authorities. The study also recommends using mini-computers for non-mobile workplaces in public authorities, instead of desktop computers or notebooks. Finally, the study proposes a 6-point plan for the public authorities for the purpose of minimizing the total environmental impact and costs of ICT products.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	IV
Tabellenverzeichnis.....	VI
Abkürzungen	XI
Zusammenfassung	13
Summary	26
1 Einleitung.....	38
2 Zielsetzung und Arbeitsweise des Forschungsvorhabens	42
3 Arbeitspaket 1: Vorschlag einer geeigneten Methode zur Berechnung der Nutzung von ausgewählten IKT-Produkten als Grundlage für die Bestimmung deren Umweltwirkungen in der Nutzungsphase.....	44
3.1 Einführung	44
3.1.1 Gegenstand und Zielstellung	44
3.1.2 Abgrenzung des Untersuchungsrahmens	44
3.1.3 Übersicht existierender Berechnungsmodelle	50
3.1.4 Zusammenfassung und Auswertung	59
3.2 Messung der Arbeitsplatzcomputer im Umweltbundesamt.....	64
3.2.1 Bereitgestellte Datensätze	64
3.2.2 Durchschnittliche Leistungsaufnahme und Nutzungsdauer	67
3.2.3 Zusammenfassung der Messwerte	70
3.3 Ableitung eines neue Berechnungsmodells APC.....	71
3.3.1 Grundstruktur	71
3.3.2 Parametrisierung.....	75
3.3.3 Ableitung eines Berechnungsmodells für Notebooks.....	79
4 Arbeitspaket 2: Erhebung von Lebenszyklusdaten für die Untersuchungen der Umweltauswirkungen von Arbeitsplatzcomputern (APC).....	85
4.1 Einführung	85
4.2 Datensatz für interne Festplatte (HDD).....	89
4.2.1 Beschreibung des Produktes und Vorgehensweise zur Datenerhebung.....	89
4.2.2 Festlegung des Untersuchungsrahmens.....	91
4.2.3 Ergebnis und Auswertung des Datensatzes für die Fertigung der HDD	93
4.2.4 Ergebnisse der Datensätze.....	112
4.2.5 Datenqualitätsanalyse.....	114

4.2.6	Diskussion der Skalierbarkeit des Datensatz.....	115
4.3	Datensatz für CPU.....	117
4.3.1	Beschreibung des Produktes	117
4.3.2	Quellendiskussion für die Auswahl der Daten.....	120
4.3.3	Vorgehensweise zur Datenerhebung und Repräsentativität der Daten.....	123
4.3.4	Festlegung des Untersuchungsrahmens.....	126
4.3.5	Ergebnis und Auswertung des Datensatzes für die Herstellung der CPU.....	127
4.3.6	Ergebnisse der Datensätze.....	128
4.3.7	Treibhausgaspotenzial	136
4.3.8	Datenqualitätsanalyse.....	136
4.3.9	Ergebnis und Auswertung für das Packaging der CPU	145
4.3.10	Diskussion der Skalierbarkeit des Datensatz.....	151
4.4	Datensatz für unbestückte Leiterplatten	151
4.4.1	Beschreibung des Produktes und Vorgehensweise zur Datenerhebung.....	151
4.4.2	Festlegung des Untersuchungsrahmens.....	153
4.4.3	Ergebnis und Auswertung des Datensatzes für die Herstellung der Leiterplatte	154
4.4.4	Ergebnisse der Datensätze.....	157
4.4.5	Datenqualitätsanalyse.....	158
4.4.6	Diskussion der Skalierbarkeit des Datensatzes	159
5	Arbeitspaket 3: Ökologische und ökonomische Vergleichsrechnungen	160
5.1	Einführung	160
5.2	Recherche zur Ableitung der Bilanzierungsparameter	161
5.3	Modellannahmen	163
5.4	Funktion und funktionelle Einheit.....	165
5.5	Festlegung der Systemgrenzen	166
5.6	Berücksichtigte Wirkungskategorien.....	168
5.7	Datengrundlage, Modellierung und Annahmen.....	168
5.7.1	Herstellungsphase	169
5.7.2	Transport (Distribution und Feinverteilung).....	173
5.7.3	Nutzungsphase	175
5.7.4	End-of-Life.....	176
5.8	Ergebnisdarstellung und Auswertung	178

5.8.1	Gesamtbewertung	178
5.8.2	Beitragsanalyse	181
5.8.3	Diskussion der Ergebnisse	190
5.9	Ökonomische Vergleichsrechnungen	193
5.10	Sensitivitätsanalysen.....	197
5.10.1	Sensitivitätsanalyse 1: Auswirkungen unterschiedlicher Anteile der drei Arbeitsplatzlösungen auf den Energieverbrauch in der Nutzungsphase sowie auf die jährlichen Gesamtkosten und die jährlichen lebenszyklusbezogenen Treibhausgasemissionen.....	197
5.10.2	Sensitivitätsanalyse 2: Verlängerung der Nutzungsdauer von Notebooks auf 6 Jahre.....	199
5.10.3	Sensitivitätsanalyse 3: Nutzung der Berechnungsmethodik der Ökodesign-Verordnung (617/2013) im Vergleich zur Berechnungsmethodik des Vorhabens Öko-APC	201
5.11	Amortisationsrechnung aus ökologischer Sicht	202
6	Diskussion der Ergebnisse.....	204
7	Schlussfolgerung und Empfehlungen	209
8	Literatur	212
9	Danksagung.....	218
10	Anhang.....	218

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Vergleich zeitliche Gewichtung der Betriebszustände (Grafik: TU Berlin).....	60
Abbildung 2:	Berechneter jährlicher Stromverbrauch auf Basis der Desktop ohne Monitor, Kategorie B nach Energy Star (Graphik: TU Berlin)	62
Abbildung 3:	Vergleich prozentualer Anteile der jeweiligen Betriebszustände am Gesamtenergiebedarf eines PCs (Grafik: TU Berlin)	63
Abbildung 4:	Typisches Tagesprofil eines APC mit Unterscheidung einzelner Betriebszustände (Graphik: DeZem, bearbeitet von TU Berlin)	67
Abbildung 5:	Auswirkungen des ECO-Mode für die Leistungsaufnahme des Monitors (DeZem. 2013)	68
Abbildung 6:	Festlegung des Leerlauf-Schwellenwertes (Graphik: DeZem, bearbeitet durch TU Berlin).....	69
Abbildung 7:	Jahresstromverbrauch auf Basis von mit Datenblattangaben parametrisierten Berechnungsmodellen	77
Abbildung 8:	Vergleich des neuen Berechnungsmodells mit unterschiedlichen Arbeitstagannahmen.....	78
Abbildung 9:	Jährlicher Strombedarf von Desktop-APC und Notebook-APC im Vergleich.....	83
Abbildung 10:	Beitrag einzelner Baugruppen zu Gesamttreibhausgasemissionen der Herstellung eines Notebooks (Quelle: O’Connell & Stutz 2010).....	86
Abbildung 11:	Seltene Erden Magnete des Schwingspulenbetätigers (Buchert et al. 2012).....	87
Abbildung 12:	Beitrag einzelner Subkomponenten zu Gesamttreibhausgasemissionen eines Mainboards (Quelle: O’Connell & Stutz 2010).....	88
Abbildung 13:	Vorgehensweise zur Datenerhebung.....	90
Abbildung 14:	Festplatte: Western Digital Modell Caviar Green (Fotos: Öko-Institut)	90
Abbildung 15:	Systemgrenze des ProBas-Datensatzes für die Fertigung der Festplatte im Rahmen dieses Arbeitspakets	92
Abbildung 16:	Verhältnisse zwischen Energieverbrauch und Anzahl der Medien sowie die Kapazität.....	110
Abbildung 17:	Relation zwischen Anzahl der Medien und Kapazität (direkt entnommen aus Schischke et al. 2012, Figure 3-12).....	116
Abbildung 18:	Intels Carbon Footprint (Zusammenstellung: Fraunhofer IZM).....	121
Abbildung 19:	Systemgrenze des ProBas-Datensatzes für die Herstellung des CPU-Wafers im Rahmen dieses Arbeitspakets (Darstellung: Öko-Institut).....	127
Abbildung 20:	Sensitivitätsanalyse der Chemikalien mit der größten Abweichung	142
Abbildung 21:	Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse (mögliches Unterschätzen des Ergebnisses) (Berechnung und grafische Darstellung: TU Berlin)	144

Abbildung 22:	Systemgrenze des ProBas-Datensatzes für die Herstellung der Leiterplatte im Rahmen dieses Arbeitspakets (Darstellung: Öko-Institut).....	153
Abbildung 23:	Systemgrenze der Sachbilanz.....	167
Abbildung 24:	Modellskizze zu Transportvorgängen bei Neugeräten (Desktop-PCs, Notebooks, Mini-PC und Monitore).....	174
Abbildung 25:	Vergleich des gesamten Treibhausgaspotenzials (THG100) der drei Arbeitsplatzlösungen aufgeschlüsselt nach Lebenszyklusphasen (kg CO ₂ e); kumuliert über 10 Jahre (mit Gutschriften).....	179
Abbildung 26:	Prozentualer Anteil der Lebenszyklusphasen am Treibhausgaspotenzial der drei Arbeitsplatzlösungen (ohne Recyclinggutschriften).....	180
Abbildung 27:	Anteil von Hardwarekomponenten am THG-Potenzial der Herstellung eines Computerarbeitsplatzes mit Desktop-PC (inkl. externer Desktop-Monitor) (%).....	183
Abbildung 28:	Anteil von Hardwarekomponenten am THG-Potenzial der Herstellung eines Computerarbeitsplatzes mit Notebook (mit HDD) (%).....	185
Abbildung 29:	Anteil von Hardwarekomponenten am THG-Potenzial der Herstellung eines Computerarbeitsplatzes mit Notebook (mit SSD) (%).....	186
Abbildung 30:	Anteil von Hardwarekomponenten am THG-Potenzial der Herstellung eines Computerarbeitsplatzes mit Mini-PC (mit HDD) (%).....	187
Abbildung 31:	Anteil von Hardwarekomponenten am THG-Potenzial der Herstellung eines Computerarbeitsplatzes mit Mini-PC (mit SSD) (%).....	188
Abbildung 32:	Treibhausgaspotenzial (THG100) eines Computerarbeitsplatzes mit Desktop-PC (anteilig per Kalenderjahr).....	191
Abbildung 33:	Treibhausgaspotenzial (THG100) eines Computerarbeitsplatzes mit Notebook (anteilig per Kalenderjahr).....	192
Abbildung 34:	Treibhausgaspotenzial (THG100) eines Computerarbeitsplatzes mit Mini-PC (anteilig per Kalenderjahr).....	192
Abbildung 35:	Lebenszykluskosten für untersuchte Arbeitsplatzlösungen über 10 Jahre	196
Abbildung 36:	Jährliche Gesamtkosten für untersuchte Arbeitsplatzlösungen (Werte gerundet)	197
Abbildung 37:	Sensitivitätsanalyse: THG-Potenzial (kg CO ₂ e) Computerarbeitsplatz mit Notebook: Vergleich Baseline (Nutzungsdauer 3 Jahre) vs. Sensitivität (Nutzungsdauer 6 Jahre); ohne Recyclinggutschriften	199
Abbildung 38:	Sensitivitätsanalyse: Lebenszykluskosten (€) Computerarbeitsplatz mit Notebook: Vergleich Baseline Szenario (Nutzungsdauer 3 Jahre) vs. Sensitivität (Nutzungsdauer 6 Jahre).....	200

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Energiebezogene Betriebszustände nach ACPI.....	46
Tabelle 2:	Definition der Betriebszustände von Computern.....	48
Tabelle 3:	Übersicht der Terminologie der Betriebszustände	49
Tabelle 4:	Übersicht der untersuchten Berechnungsmodelle	50
Tabelle 5:	Terminologie Betriebszustände in Energy Star v5.2/v6	50
Tabelle 6:	Gewichtung der Betriebszuständen nach EnergyStar v5.2.....	51
Tabelle 7:	Gewichtung der Betriebszustände innerhalb des Energy Star v6.....	53
Tabelle 8:	Terminologie Betriebszustände in ECMA 383.....	54
Tabelle 9:	Gewichtung der Betriebszustände des ECMA-383 Standard	54
Tabelle 10:	Gewichtung der Betriebszustände nach Energy Star v5.2 Conventional Profil	55
Tabelle 11:	Terminologie der von Fujitsu verwendeten Betriebszustände.....	56
Tabelle 12:	Terminologie der bei PG Green IT verwendeten Betriebszustände	57
Tabelle 13:	Verteilung der Werk- und Feiertage nach Handreichung der PG Green IT	57
Tabelle 14:	Durchschnittliche Nutzungszeiten nach Fraunhofer ISI (Fraunhofer ISI 2005).....	58
Tabelle 15:	Vergleich durchschnittliche Leistungsaufnahme Betriebszustände für PC-Gerätekategorien nach Energy Star (Energy Star 2013).....	61
Tabelle 16:	Modellpalette der im UBA verwendeten APCs	65
Tabelle 17:	Angaben zur Leistungsaufnahme laut Datenblatt	66
Tabelle 18:	Durchschnittliche Leistungsaufnahme und Nutzungsdauer pro Arbeitstag	70
Tabelle 19:	Verteilung von Arbeitstagen und Nichtarbeitstagen in existierenden Berechnungsmodellen	72
Tabelle 20:	Neues Berechnungsmodell – Zeitliche Verteilung der Betriebszustände für den Desktop-PC.....	74
Tabelle 21:	Neues Berechnungsmodell – Zeitliche Verteilung der Betriebszustände für den Monitor	74
Tabelle 22:	Berechnungsmodell für Desktop-PC parametrisiert mit Daten aus der UBA-Messung.....	75
Tabelle 23:	Berechnungsmodell für Desktop-PC mit mittlerer Nutzung parametrisiert mit Datenblattangaben.....	77
Tabelle 24:	Berechnungsmodell für Desktop-PC mit hoher Nutzung parametrisiert mit Datenblattangaben.....	78

Tabelle 25:	Berechnungsmodell für das Notebook bei stationärer Nutzung im Netzbetrieb	81
Tabelle 26:	Berechnungsmodell für den separaten Monitor bei stationärer Nutzung des Notebooks	81
Tabelle 27:	Berechnungsmodell für das Notebook bei mobiler Nutzung im Akkubetrieb	82
Tabelle 28:	Berechnungsmodell für Notebooks mit mittlerer Nutzung parametrisiert mit Datenblattangaben.....	82
Tabelle 29:	Merkmale des Referenzproduktes	91
Tabelle 30:	Repräsentativität des Festplatten-Datensatzes (Ohne Vorkette).....	92
Tabelle 31:	Ermittlung des Gewichts der Komponenten der untersuchten Festplatte.....	94
Tabelle 32:	Materialienzusammensetzung der Magnete.....	96
Tabelle 33:	Die mikroelektronischen Komponenten auf der Hauptleiterplatte mit ihrer wichtigen Parametern.....	97
Tabelle 34:	Parameter für die flexible Leiterplatte.....	99
Tabelle 35:	Materialienzusammensetzung eines aluminiumbasierten Mediums (Quelle: Herstellerangaben 2013).....	99
Tabelle 36:	Materialienzusammensetzung eines glasbasierten Mediums (Quelle: Herstellerangaben 2013)	100
Tabelle 37:	Komponentenzusammensetzung des Lese-/Schreibkopfs.....	101
Tabelle 38:	Zusammengefasste Aluminium-Komponenten.....	102
Tabelle 39:	Zusammengefasste Stahl-Komponenten.....	102
Tabelle 40:	Zusammengefasste Kupfer-Komponenten.....	103
Tabelle 41:	Ermittlung des Stromverbrauchs nach Prozessen auf Basis der THG-Emissionen von Western Digital.....	104
Tabelle 42:	Stromverbrauch für die Fertigung einer durchschnittlichen HDD auf Basis der Daten von Western Digital (Western Digital 2012).....	104
Tabelle 43:	Ermittlung der Verbrauchsmenge der fossilen Brennstoffe pro Jahr	105
Tabelle 44:	Zusammenstellung des Energieverbrauchs bei Western Digital (2012) und Seagate (Daten bezogen auf die Fertigung einer durchschnittlichen HDD, d.h. ohne Differenzierung von Formfaktoren und andern Technikparametern).....	105
Tabelle 45:	Ermittlung des durchschnittlichen Wasserverbrauchs	107
Tabelle 46:	Ermittlung der klimarelevanten prozessspezifischen direkten Emissionen (Quelle: Western Digital 2012).....	107
Tabelle 47:	Ermittlung der klimarelevanten prozessspezifischen direkten Emissionen (Quelle: Herstellerangaben 2013)	107
Tabelle 48:	VOC-Emissionen nach Formgrößen (Herstellerangaben: 2013).....	108

Tabelle 49:	Zusammenfassung der direkten Emissionen für die Fertigung pro durchschnittliche HDD.....	108
Tabelle 50:	Die Menge der Abfälle bei der Produktion der Hersteller der Festplatten (Quelle: Seagate 2012).....	109
Tabelle 51:	Durchschnittlicher Stromverbrauch nach Angaben verschiedener Hersteller, differenziert nach Prozessen und bezogen auf eine durchschnittliche HDD.....	110
Tabelle 52:	Durchschnittliche Kapazität und Anzahl des Mediums (LCA to go 2013).....	111
Tabelle 53:	Ermittlung des spezifischen Stromverbrauchs bezogen auf den jeweils bestimmenden Parameter	111
Tabelle 54:	Ermittlung des Stromverbrauchs für die Fertigung der untersuchten Festplatte bei den Herstellern	111
Tabelle 55:	Input- und Outputdaten für den Datensatz „Herstellung interne 3,5"-Festplatte (1 TB; 3 Medien)“	112
Tabelle 56:	Abmessungen der Packages rPGA988B und BGA 1023 Intel (2013).....	118
Tabelle 57:	Sachbilanz für die Fertigung eines Keramikkondensators nach Schischke et al. (2008)	119
Tabelle 58:	Energieinput im Front-End-Prozess im Vergleich.....	120
Tabelle 59:	PFC-Emissionen und ihre GWP-Werte	122
Tabelle 60:	Input- und Outputdaten für den Datensatz „IC-Fertigung Back End Prozess“ (direkte Emissionen) nach Prakash et al. (2013).....	123
Tabelle 61:	Merkmale des Referenzproduktes	124
Tabelle 62:	Kenndaten der Wafer-Herstellung und Ermittlung der Ausbeute mit Core i5 Prozessor nach Tabelle 56.....	125
Tabelle 63:	Wasserverbrauch Intel (2013c)	125
Tabelle 64:	Repräsentativität des CPU-Datensatzes (ohne Vorkette).....	127
Tabelle 65:	Inputdaten für den Datensatz „Herstellung CPU-Wafer“	129
Tabelle 66:	Outputdaten für den Datensatz „Herstellung CPU-Wafer“	131
Tabelle 67:	Inputdaten für den Datensatz „Herstellung CPU-Wafer“ – Vergleich der Daten von Schmidt et al. (2011) mit der Einschätzung der SEMATECH CFWG.....	137
Tabelle 68:	Nicht berücksichtigte Inputflüsse für die Modellierung des Schmidt et al. (2011) Datensatzes.....	140
Tabelle 69:	Sensitivitätsanalyse der Chemikalien mit der größten Abweichung	142
Tabelle 70:	Anteil des Stickstoffs am Gesamtergebnis der jeweiligen Wirkungskategorie (Sensitivitätsanalyse)	143
Tabelle 71:	Sensitivitätsanalyse (mögliches Unterschätzen des Ergebnisses)	143
Tabelle 72:	Metallgehalte BGA-Lotkugeln einer Intel-BGA1023-CPU (eigene Berechnung)	149

Tabelle 73:	CPU-Fertigung nach Prozessen zusammengefasst.....	150
Tabelle 74:	Merkmale des Referenzproduktes	152
Tabelle 75:	Repräsentativität des Leiterplatten-Datensatzes (ohne Vorkette).....	154
Tabelle 76:	Inputdaten für den Datensatz „Herstellung Leiterplatte“	157
Tabelle 77:	Standzeiten und Nutzungsdauer von IT Geräten	162
Tabelle 78:	Reparaturen und Gewährleistung in den Bundesbehörden	162
Tabelle 79	Nutzungsdauer von IT-Geräten auf Basis der Empfehlungen des IT-Rates im Betrachtungszeitraum 2014-2023.....	164
Tabelle 80:	Allokationsfaktoren der Gerätetypen im jeweiligen Beschaffungszyklus (Betrachtungszeitraum 10 Jahre).....	164
Tabelle 81:	Hardwarespezifikationen der berücksichtigten Gerätemodelle	166
Tabelle 82:	Datensätze zur Modellierung der Herstellung des Desktop-PC	169
Tabelle 83:	Datensätze zur Modellierung der Herstellung des Mini-PC	169
Tabelle 84:	Datensätze zur Modellierung der Herstellung des Notebooks	170
Tabelle 85:	Datensätze zur Modellierung der Herstellung des externen Monitors.....	170
Tabelle 86:	Datensätze zur Modellierung der Herstellung einer bestückten Leiterplatte	170
Tabelle 87:	Datensätze zur Modellierung der Herstellung von aktiven Elektronikbauteilen und anderer Komponenten	171
Tabelle 88:	Datensätze zur Modellierung der Distribution und Feinverteilung – Datenquellen.....	174
Tabelle 89:	Datensätze zur Modellierung der Distribution und Feinverteilung – Emissionsfaktoren.....	174
Tabelle 90:	Stromverbrauch (kWh/Jahr) in der Nutzungsphase.....	175
Tabelle 91:	Durchschnittliche Leistungsaufnahme von Computerendgeräten in der Bundesverwaltung.....	176
Tabelle 92:	Angenommene Nutzungsdauer der verschiedenen Gerätetypen.....	176
Tabelle 93:	Angenommene Elektroschrottmengen* der verschiedenen Gerätetypen.....	177
Tabelle 94:	Treibhausgaspotenzial der drei Arbeitsplatzlösungen (kg CO ₂ e), kumuliert über 10 Jahre	179
Tabelle 95:	Prozentualer Anteil der Lebenszyklusphasen am Treibhausgaspotenzial der drei Arbeitsplatzlösungen (ohne Recyclinggutschriften).....	180
Tabelle 96:	Treibhausgaspotenzial (THG100) der Herstellung eines Computerarbeitsplatzes mit Desktop-PC.....	182
Tabelle 97:	Treibhausgaspotenzial (THG100) der Herstellung eines Computerarbeitsplatzes mit Notebook.....	184

Tabelle 98:	Treibhausgaspotenzial (THG100) der Herstellung eines Computerarbeitsplatzes mit Mini-PC	186
Tabelle 99:	Treibhausgaspotenzial (THG100) der Distribution (inkl. Peripheriegeräte) in kg CO ₂ e.....	188
Tabelle 100:	Treibhausgaspotenzial (THG100) der Nutzungsphase (inkl. Peripheriegeräte)in kg CO ₂ e.....	189
Tabelle 101:	Treibhausgaspotenzial (THG100) der Entsorgung (inkl. Peripheriegeräte) in kg CO ₂ e.....	189
Tabelle 102:	Recyclinggutschriften in kg CO ₂ e	189
Tabelle 103:	Lebenszykluskosten aus der Sicht eines Konsumenten.....	193
Tabelle 104:	Kostenelemente zur Ermittlung der Lebenszykluskosten für die untersuchten Arbeitsplatzlösungen	195
Tabelle 105:	Angenommene Anteile von Arbeitsplatzcomputern in der öffentlichen Bundesverwaltung und entsprechender Energieverbrauch in der Nutzungsphase sowie jährliche Gesamtkosten	198
Tabelle 106:	Sensitivitätsanalyse: THG-Potenzial (kg CO ₂ e) Computerarbeitsplatz mit Notebook: Vergleich Baseline Szenario (Nutzungsdauer 3 Jahre) vs. Sensitivität (Nutzungsdauer 6 Jahre).....	200
Tabelle 107:	Energieverbrauch (kWh) in der Nutzungsphase von drei Arbeitsplatzlösungen im Betrachtungszeitraum von 10 Jahren (2014–2023).....	201

Abkürzungen

ABS	Acrylnitril-Butadien-Styrol
ACPI	Advanced Configuration and Power Interface
AfA-AV	Abschreibung für Abnutzung für allgemein verwendbare Anlagegüter
Akku	Akkumulator
APC	Arbeitsplatzcomputer
BGA	Ball Grid Array
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
BOM	Bill of Materials
CPU	Central Processing Unit
DDR3	Double Data Rate Synchronous Dynamic Random Access Memory
DEFRA	Department for Environment, Food and Rural Affairs, UK
DIMM	Dual Inline Memory Module
DRAM	Dynamic Random Access Memory
DVD	Digital Versatile Disc
ECMA	European Computer Manufacturers Association
ESIA	European Semiconductor Industry Association
FBGA	Fine Pitch Ball Grid Array
GB	Giga-Byte
Gbit	Giga-Bit
GFU	Gesellschaft für Unterhaltungselektronik
GJ	Gigajoule
GPU	Graphic Processing Unit
GWP	Global Warming Potential; deutsch: Treibhauspotenzial
HDD	Hard Disk Drive
HGA	Head Gimbal Assembly
IEC	International Electrotechnical Commission
IKT	Informations- und Kommunikationstechnologien
KBSt	Koordinierungs- und Beratungsstelle der Bundesregierung für Informationstechnik
KLR	Kosten- und Leistungerechnung
kWh	Kilowattstunde

LCD	Liquid Crystal Display
LED	Light Emitting Diode
Li-ion	Lithium-Ionen-Batterie
LKW	Lastkraftwagen
Öko-APC	Ökologische und ökonomische Aspekte beim Vergleich von Arbeitsplatzcomputern für den Einsatz in Behörden unter Einbeziehung des Nutzerverhaltens (Titel des Vorhabens)
OLED	Organic Light Emitting Diode
PC	Personal Computer
PCB	Printed Circuit Board
PFC	Per- und polyfluorierte Chemikalien
PGA	Pin Grid Array
PG GreenIT	Projektgruppe GreenIT
PGM	Platingruppenmetalle
ProBas	Prozessorientierte Basisdaten für Umweltmanagementsysteme
PS	Polystyren (Kunststoff)
RPM	Revolutions per Minute
SMD	Surface Mounted Device
SSD	Solid State Drive
TB	Terra-Byte
TEC	Typical Energy Consumption
THG	Treibhausgasemissionen
TWh	Terra Wattstunde
VOC	Volatile Organic Compound
VRAM	Video Random Access Memory
WEEE	Waste of Electrical and Electronic Equipment; deutsch: Elektro- und Elektronikgeräte-Abfall
WRAP	Waste & Resources Action Programme

Zusammenfassung

Informations- und Kommunikationstechnologie (IKT) ist aus der modernen Verwaltung nicht mehr wegzudenken. Durch den technologischen Fortschritt ermöglicht die IKT eine neue Qualität und Quantität des Verwaltungshandelns. Gleichzeitig trägt die IKT mit ihren schnellen Innovationszyklen, kurzlebigeren Produkten und immer intensiv werdender Nutzung zu hohen globalen Umweltbelastungen bei.

Die globale Ressourcennutzung hat eine Entwicklung genommen, die nicht dauerhaft fortgesetzt werden kann, ohne die Perspektiven zukünftiger Generationen auf wirtschaftlichen Wohlstand und sozialen Zusammenhalt zu beeinträchtigen. Schon jetzt übersteigt die Nutzung von natürlichen Ressourcen die Regenerationsfähigkeit der Erde deutlich. Die Bundesregierung hat sich daher im „Deutschen Ressourceneffizienzprogramm“ (ProRes) das Ziel gesetzt, die natürlichen Ressourcen nachhaltig zu nutzen und zu schützen. Darüber hinaus will Deutschland international eine wichtige Rolle im Klimaschutz spielen und beschließt in dem nationalen Aktionsplan Klimaschutz 2020¹ Maßnahmen, um den Schutz des Klimas als gesamtgesellschaftliche Aufgabe zu verankern. Für die IKT der Bundesverwaltung hat die Bundesregierung in der „Digitalen Agenda 2014-2017“ angekündigt, im Rahmen der Green-IT-Initiative den Energieverbrauch und den Bedarf an natürlichen Ressourcen weiter zu verringern.

Eine wirkungsvolle und einfache Maßnahme die Energie- und Ressourceneffizienz zu steigern besteht darin, die IKT-Produkte möglichst lange zu nutzen und sie erst dann auszutauschen, wenn sie defekt oder technisch überholt sind. Die Frage, wann und ob der Ersatz vom bestehenden Gerätepark durch neue energieeffizientere Geräte sinnvoll ist, kann nur verlässlich beantwortet werden, wenn alle Faktoren über den gesamten Lebensweg des Produktes betrachtet werden. Das bedeutet, dass neben dem Energieverbrauch in der Nutzung auch andere Umweltwirkungen, wie z. B. der Bedarf an Rohstoffen, der Aufwand für die Herstellung, die Distribution und die Entsorgung ebenfalls in die Entscheidungsprozesse einfließen sollen.

Oft wird der Fokus allerdings nur auf die Energieeffizienz von Geräten in der Nutzungsphase gelegt und weitere relevante Parameter, wie auch die Lebens- und Nutzungsdauer von IKT-Geräten, werden vernachlässigt. Ein Beispiel ist der Ersatz von funktionierenden Desktop-PCs durch energieeffizientere Notebooks, um den Energieverbrauch in der Nutzung und somit auch die Stromkosten zu reduzieren. Notebooks sind in der Nutzung ohne Zweifel deutlich energieeffizienter als vergleichbar ausgestattete Desktop-PCs. Allerdings haben Prakash et al. (2011) gezeigt, dass es ökologisch nicht sinnvoll ist, Entscheidungen bezüglich des vorzeitigen Ersatzes der IKT-Geräte ohne Berücksichtigung des Herstellungs-, Distributions- und Entsorgungsaufwands zu treffen. Denn die Herstellung von IKT-Geräten – wie Notebooks – ist sehr energieintensiv und belastend für die Umwelt. Laut Prakash et al. (2011) kann die Herstellungsphase, je nach getroffenen Annahmen, zwischen 56 und 75% der Gesamtreibhausgasemissionen eines Notebooks ausmachen. Die Entscheidung, Desktop-PCs durch Notebooks zu ersetzen ohne Berücksichtigung des gesamten Lebenswegs der Geräte, der erwarteten sowie realisierten Nutzungsdauer in der Praxis, der spezifischen Anforderungen der Nutzer und der Umweltauswirkungen über den reinen Energieverbrauch in der Nutzenden hinaus, könnte im schlimmsten Fall für die Umwelt

¹ Nationale Klimapolitik in Deutschland: <http://www.bmub.bund.de/themen/klima-energie/klimaschutz/nationale-klimapolitik/>

und für die Haushaltsmittel negative Wirkungen haben. Beispielsweise gibt es bis dato keine ganzheitlichen ökologischen Berechnungen, wie unterschiedliche Nutzungsdauern von bestimmten Arbeitsplatzlösungen in der Bundesverwaltung die Umwelt beeinflussen. Hier ist vor allem zu berücksichtigen, dass der Rat der IT-Beauftragten der Bundesverwaltung eine Nutzungsdauer von 3 Jahren für mobile IT-Geräte (z.B. Notebooks) und eine Nutzungsdauer von 5 Jahren für Arbeitsplatz PC empfiehlt (Richtlinie zur Nutzungsdauer, Aussonderung und Verwertung von IT-Geräten und Software, Anlage zum Beschluss Nr. 2013/7 des Rats der IT-Beauftragten der Ressorts vom 6. Dezember 2013).

Die derzeitige Informations- und Datenlage zu den Herstellungsketten und den Stoff- und Energieströmen sowie zum Material- und Ressourcenverbrauch der IKT-Produkte ist unbefriedigend. Hinzu kommt, dass die bestehenden Datengrundlagen zur Herstellung der IKT-Produkte selten miteinander vergleichbar sind, so dass sich keine richtungssicheren Handlungsoptionen im Hinblick auf eine Reduzierung der Umweltauswirkungen und des Ressourcenverbrauchs ableiten lassen. Die vorhandenen Daten zur Erstellung von Ökobilanzen im Bereich der IKT-Produkte bedürfen aufgrund der hohen Technologiedynamik bei Produkten und Fertigungsprozessen einer stetigen Überprüfung, Aktualisierung und Ergänzung. Derzeit verfügbare Datensätze können nur bedingt auf moderne Produkte angewendet werden, da sie nicht mehr den Stand der Technik abbilden.

Außerdem sind existierende Konzepte und Standards zur Ermittlung des Nutzungsprofils für IKT-Geräte nicht auf dem aktuellsten Stand und vernachlässigen entscheidende Kenngrößen, wie beispielweise die aktive Nutzung der Rechner. Es kann davon ausgegangen werden, dass der durch den Digitalisierungsprozess im Medienbereich ausgelöste Anstieg der Datenmenge und des Datenverkehrs im Netz zu einer deutlich anderen Gewichtung der Betriebszustände führt als bisher angenommen, weil möglicherweise eine permanente Verbindung zum Server gehalten werden muss. Überlegungen zum Ersatz von IKT-Geräten aus ökologischen Gesichtspunkten beruhen u.a. auf Annahmen zu Nutzungsdauer, -häufigkeit und -intensität. Daher ist es erforderlich, eine sich an der Praxis sowie an den gegenwärtigen Anforderungen orientierende Berechnungsmethode für die Nutzungsphase zu entwickeln. Die derzeitigen Methoden zu den Nutzungsprofilen und Nutzerverhalten befinden sich noch auf einer sehr allgemeinen Ebene. Beispielsweise findet keine Differenzierung zwischen unterschiedlichen Nutzergruppen und -profilen statt.

In Deutschland sind im öffentlichen Dienst ca. 4,6 Millionen Personen beschäftigt. Hiervon ist ein großer Teil der Beschäftigten an Computerarbeitsplätzen tätig. Öffentliche Verwaltungen haben also einen erheblichen Anteil an dem von der IKT verursachten Energie- und Ressourcenverbrauch. Damit die Bundesverwaltung zur Erreichung der von der Bundesregierung festgelegten Klimaziele im Zusammenhang mit Arbeitsplatzrechnern beitragen kann, bedürfen sie einer wissenschaftlich fundierten Entscheidungsgrundlage.

Zielsetzung

Das übergeordnete Ziel dieses Vorhabens „*Ökologische und ökonomische Aspekte beim Vergleich von Arbeitsplatzcomputern (APC) für den Einsatz in Behörden unter Einbeziehung des Nutzerverhaltens*“ (Öko-APC) ist, die Potentiale zur Ressourceneinsparung im Aktionsfeld Informations- und Kommunikationstechnik (IKT) auszuloten und aufzuzeigen, wie die IKT dazu beitragen kann, die Ressourceninanspruchnahme insgesamt zu senken.

Im Konkreten soll im Rahmen dieses Vorhabens der Energie- und Ressourcenverbrauch von typischen informationstechnikgestützten Arbeitsplätzen in Bundesbehörden und vergleichbaren Einrichtungen untersucht werden. Hierbei sollen die Umweltauswirkungen von typischen Arbeitsplatzcomputern quantifiziert werden, die als Technik für den Büroarbeitsplatz zum Einsatz kommen.

Das Vorhaben gliedert sich in 3 inhaltliche Arbeitspakete (AP):

- AP 1: Vorschlag einer geeigneten Methode zur Berechnung der Nutzung von ausgewählten IKT-Produkten als Grundlage für die Bestimmung von deren Umweltwirkungen in der Nutzungsphase (Nutzerprofile)
- AP 2: Erhebung von Lebenszyklusdaten für die ausgewählten Komponenten von Arbeitsplatzcomputern (APC)
- AP 3: Ökologische und ökonomische Vergleichsrechnungen zwischen unterschiedlichen Varianten von Arbeitsplatzcomputern (APC)

Zur fachlichen Unterstützung des Projektteams wurde jeweils ein Begleitkreis für AP 1 und 2 ins Leben gerufen. Der erste Begleitkreis für das AP 1 beschäftigte sich mit folgenden Themen:

- Auswertung und Vergleich von Nutzungsmustern in Messstandards,
- Erkenntnisse aus Messungen der Nutzungsphase an Arbeitsplatzcomputern im Umweltbundesamt,
- Vergleich mit typischen Nutzungsmustern in anderen Einrichtungen,
- Entwicklung von Szenarien zur ökonomischen und ökologischen Bewertung verschiedener Handlungsoptionen.

Der Begleitkreis für das AP 2 hat sich mindestens in folgenden Bereichen eingebracht:

- Beschaffung von Primärdaten für die ausgewählten Komponenten, Festplatte (HDD), unbestückte Leiterplatte und CPU
- Suche nach aktuellen und verfügbaren Sekundärdaten zu HDD, unbestückter Leiterplatte und CPU
- Kontaktvermittlung mit den in ihren Firmen für die Erhebung der Lebenszyklusdaten zuständigen Personen
- Prüfung der erhobenen Daten im Hinblick auf die Datenlücken, Allokationen usw.
- Qualitätssicherung (Plausibilität, Repräsentativität, Validierung)

Nutzerprofile

Zur Ermittlung der Nutzerprofile in der Bundesverwaltung wurde zunächst eine vergleichende Gegenüberstellung und systematische Auswertung von existierenden Methoden zur Berechnung des durchschnittlichen elektrischen Stromverbrauchs von Arbeitsplatzcomputern vorgenommen. Die Auswertung wurde dann anschließend mit realen Messungen des Stromverbrauchs von Arbeitsplatzcomputern im Umweltbundesamt ergänzt, um daraus eine geeignete Methode zur Berechnung der Nutzung von IKT-Arbeitsplatzlösungen in der Bundesverwaltung, inkl. Nutzerprofile abzuleiten. Die vergleichende Gegenüberstellung von realen Messwerten und existierenden Berechnungsmethoden sollte schlussendlich zeigen, ob spezifische Nutzungsmodelle für die

Ermittlung des durchschnittlichen Energieverbrauchs in der Verwaltung nötig sind und inwiefern verschiedene Nutzertypen aufgrund ihrer Nutzungsintensität unterschieden werden sollten.

Der Vergleich von existierenden Berechnungsmodellen zeigte, dass die Unterscheidung von Arbeitstagen und Nichtarbeitstagen sowie die gewählte unmittelbare Tagesverteilung pro Jahr einen signifikanten Einfluss sowohl auf das Berechnungsmodell als auch auf den resultierenden Jahresstromverbrauch haben. Wird beispielsweise, wie beim Energy Star TEC (Typical Energy Consumption²), keine Unterscheidung von Arbeitstagen und Nichtarbeitstagen vorgenommen, so spiegelt dies ein Mischszenario von betrieblicher und privater Nutzung wieder, mit einer daraus resultierenden längeren Aktiv-/Leerlauf-Dauer im Jahresmittel. Die Modellierung mit den Durchschnittswerten der Leistungsaufnahmen der Kategorie B Computer vom Energy Star v5.2 zeigte beispielsweise, dass der Stromverbrauch Desktop-PCs (ohne Monitor) entsprechend der Berechnung nach dem Berechnungsmodell PG Green IT³ mit 51,7 kWh substanzial geringer war als der nächsthöhere Berechnungswert nach Fujitsu⁴ mit 81,3 kWh pro Jahr. Die Berechnung nach ECMA 383 (European Computer Manufacturers Association) war mit 144,7 kWh pro Jahr um Faktor 2,8 und die nach der Ökodesign-Richtlinie mit 117,4 kWh pro Jahr um Faktor 2,3 größer als der Wert nach PG Green IT.

Berechnungsverfahren, wie die, der PG Green IT, die die Aspekte, wie die Wochenenden, Feiertage und durchschnittliche Urlaubs- und Krankheitszeiten berücksichtigen, kommen in ihren Ergebnissen den realen Messergebnis aus der Messung im Umweltbundesamt recht nahe. Denn die Auswertung der am Umweltbundesamt durchgeführten Messungen von Arbeitsplatzcomputern zeigte ebenfalls, dass die Nutzung über den Arbeitstag stark fluktuiert und die Nichtnutzungszeit eine deutende Rolle spielt. Hierbei ist die Verteilung der Arbeitstage zu Nichtarbeitstagen entscheidend. Andere Verfahren, wie z.B. Ökodesign-Richtlinie, Energy Star und ECMA, die oben genannten Aspekte nicht berücksichtigen, führen zu einer zeitlichen Überbewertung der aktiven Nutzungsdauer bei typischen Verwaltungsarbeitsplätzen und zu einer deutlichen Ergebnisverschiebung. Wie stark sich diese Modellunterschiede auf die jeweiligen Ergebnisse der Berechnungsverfahren auswirken, wurde in dieser Studie untersucht. Auf Basis der Datenblattwerte⁵ für Desktop-PC und Monitor wurde der Jahresstromverbrauch eines Computerarbeitsplatzes mit Desktop-PCs nach den jeweiligen Verfahren berechnet. Mit dem Berechnungsverfahren des Energy Star v5.2 (Full Proxying) betrug der Jahresstromverbrauch 102,6 kWh. Nach dem Berechnungsverfahren der Ökodesign-Richtlinie lag der berechnete Stromverbrauch bei sogar 131,1 kWh. Das Ergebnis des in dieser Studie erstellten Berechnungsverfahrens beträgt 58,1 kWh, es stimmt mit dem Modell der PG Green IT (Jahresstromverbrauch 59,6 kWh) gut überein. Der um den Faktor 1,8 höhere Jahresenergiebedarf des Computerarbeitsplatzes mit Desktop-PC aus dem Berechnungsmodell des Energy Star v5.2 gegenüber dem in dieser Studie entwickelten

² TEC = Typical Energy Consumption (“typischer Energiebedarf bzw. Stromverbrauch“) bezeichnet den Stromverbrauch eines Produktes innerhalb bestimmter Zeiträume bei festgelegten Verbrauchsmodi und -zuständen

³ Die PG GreenIT ist eine vom Rat der IT-Beauftragten des Bundes berufene Projektgruppe, mit dem Auftrag die Ziele der Green-IT umzusetzen.

⁴ Fujitsu Technology Solutions hat in Anlehnung an den Energy Star v5.2 in seinen White Papers eine leicht geänderte Berechnungsmethodik für bestimmte Produkte und den Energiebedarf der einzelnen Produkte vorgestellt (siehe 3.1.3)

⁵ Siehe Abschnitt Parametrisierung und Vergleich des Berechnungsmodells mit Datenblattwerten

Berechnungsverfahren ist insbesondere auf die fehlende Berücksichtigung von Arbeits- und Nichtarbeitstagen zurückzuführen.

Es konnte auch gezeigt werden, dass die aktive Nutzungsdauer von Arbeitsplatzcomputern in Behörden über ein Jahr gerechnet vergleichsweise recht kurz ist. So liegt der Berechnungsformel des Energy Star Programms (Version 6.0) eine zeitlich etwa dreifach längere aktive Nutzungsdauer zugrunde als real in der Bundesverwaltung in Deutschland vorkommt. Dieser Umstand erklärt auch, warum in der Vergangenheit die potentiellen Stromverbräuche der Arbeitsplatzcomputer häufig überschätzt wurden.

Neben der zeitlichen Dauer wird die Aktiv-/Leerlauf-Phase auch über die Leistungsaufnahme im Aktiv- und Leerlauf-Zustand bestimmt. Dabei ist ersichtlich, dass mehr als 70% des gesamten Jahresenergieverbrauchs des Desktop-PC durch die Aktiv-/Leerlauf-Phase bestimmt wird. Die geringere Leistungsaufnahme des Notebooks im Aktiv- und Leerlaufzustand resultiert damit auch in einem deutlich geringeren Jahresenergiebedarf gegenüber dem Desktop-PC. Einen großen Anteil am gesamten Jahresenergiebedarf eines Computerarbeitsplatzes hat der Monitor. Beim Computerarbeitsplatz mit Desktop-PC hat der Monitor einen Anteil von ca. 50 % und beim Computerarbeitsplatz mit Notebook einen Anteil von 66,6% am gesamten Jahresenergiebedarf.

Erhebung von Lebenszyklusdaten

Im Rahmen dieser Studie wurden Lebenszyklusdaten für unbestückte Leiterplatte, CPU und HDD erhoben und entsprechende Datensätze für die Probas-Datenbank des Umweltbundesamtes erarbeitet. Die folgende Tabelle stellt die Kernparameter der Datensätze dar:

Kernparameter der Datensätze

Datensatz	Zeitlicher Bezug	Geografischer Bezug	Systemgrenze	Technologischer Bezug
Fertigung / interne Festplatte (ohne Vorkette)	2008-2013	Weltmix	Gate-to-Gate; beinhaltet die Produktion der Medien, Slider und HGA sowie Montage und Test der Endprodukte	Formfaktor: 3,5 Zoll
				Kapazität: 1 TB
				Puffergröße: 16 MB
				Spindelgeschwindigkeit: 5400 RPM
				Schnittstelle: SATA II
				Technische Merkmale: PC Externe Datenübertragungsrate 300 Megabyte pro Sekunde Interne Datenübertragungsrate 144,5 Megabyte pro Sekunde
				Abmessungen: Höhe 2,62 cm (1,03 in.); Breite 10,16 cm (4 in.); Tiefe 14,71 cm (5.79 in.)
				Gewicht: 0,605 kg ⁶
				Anzahl der Medien: 3
Produktionsjahr: 2008				

⁶ Das Gewicht der Medien wurde auf Basis der Daten von Herstellern (2013) für den Probas-Datensatz adjustiert (s. Tabelle 31).

Datensatz	Zeitlicher Bezug	Geografischer Bezug	Systemgrenze	Technologischer Bezug
Herstellung CPU (ohne Vorkette)	2005	Weltmix	Gate-to-Gate; beinhaltet Produktion CPU Wafer	Wafer-Durchmesser: 300 mm
				Waferfläche eines Wafers: 0,071 m ²
				Waferdicke: 0,75 mm
				Gewicht eines Wafers: ~150 gr
				Prozess-Yield (Ausbeute): 84%
Herstellung unbestückte Leiterplatte (ohne Vorkette)	2012-2013	Europa	Gate-to-Gate; beinhaltet Produktion Leiterplatte und Abwasseraufbereitung	Lagenzahl: 6
				Substrat: FR4
				Oberflächenbeschichtung: Ni-Au
				Abmessungen: Europakarte-Standardmaß 0,016 m ²
				Produktionsjahr: 2012
				Systemgrenzen: Produktion und Abwasseraufbereitung

Für den HDD-Datensatz konnten alle wesentlichen Informationen und Materialdaten erhoben werden. Die Daten repräsentieren somit den technologischen Hintergrund der Jahre 2008-2012. Insgesamt kann die Datenqualität des Datensatzes als gut eingestuft werden. Die gewonnenen Daten und Kenntnisse in dieser Studie bieten zusätzlich eine Grundlage für die weitere Verbesserung des Datensatzes sowie auch für die Erstellung von neuen Datensätzen für Festplatten mit einem Formfaktor von 2,5“. Der Datensatz für 2,5“-Festplatten lässt sich nicht auf einen Datensatz für 3,5“-Festplatten skalieren, weil sich die Materialzusammensetzung unterscheidet, und die Packaging-Fläche für den Motor-Controller-Chip nicht proportional zum Gewicht ist. Eine Skalierbarkeit ist allerdings innerhalb des erstellten 3,5“-Festplatten-Datensatzes in Bezug auf die Kapazität oder Anzahl der Medien durchaus möglich.

Der Datensatz zur CPU-Fertigung für ein 300-mm-Wafer und aktuelles BGA-Design⁷, welches insbesondere für Notebook-CPUs eingesetzt wird, stellte große Herausforderungen dar. Die Datenlage für die CPU-Fertigung ist immer noch extrem lückenhaft. Daher konnte in diesem Vorhaben kein vollständiger Datensatz geschaffen werden. Aber die einzelnen Fertigungsprozesse wurden, u.a. mithilfe von Herstellern und Halbleiterverband, sehr ausführlich beschrieben. Allerdings führte der Austausch mit den Industrievertretern höchstens zu einer Einschätzung der Datenqualität und nicht unbedingt zu einer Verbesserung der Datenlage. Hier ist weitere Forschung, vor allem im Hinblick auf die Back-End-Prozesse, notwendig. Der Datensatz kann grundsätzlich für die Front-End-Prozesse über die Chipfläche skaliert werden. Dies wurde bereits exemplarisch für den Intel Core-i5 Prozessor mit einer Die-Fläche von 0,94 cm² durchgeführt. Für das Package sind neben der Die⁸-Größe die Fläche des Package und die Packageausführung entscheidend. Das hier beschriebene Package wird überwiegend für Notebook CPUs eingesetzt und zum Teil auch für Desktop-PCs. Für Desktop-PCs ist anzumerken, dass überwiegend ein Pin Grid Array-Package (PGA) verwendet wird. Die Fertigungsprozesse können nicht direkt mit den BGA-Prozessen

⁷ Aktuelle Prozessoren für Desktop-PCs und Notebooks werden üblicherweise in der Gehäuseform bzw. Packagevariante PGA (Pin Grid Array) oder BGA (Ball Grid Array) gefertigt. Für diese Studie wird das aktuellere BGA-Design betrachtet, welches insbesondere für Notebook-CPUs eingesetzt wird. Bei diesem Design wird der fertig verkapselte Chip nicht in einen Sockel gesteckt, sondern direkt auf das Mainboard gelötet.

⁸ Unverkapselte einzelne Chips vor der Verkapselung („nackte“ Chips)

verglichen werden. Zusätzlich zur komplett gehäuteten CPU muss bei der PGA-Ausführung der Sockel berücksichtigt werden, in welchen der fertig verkapselte Chip gesteckt wird.

Der Datensatz für unbestückte Leiterplatten basiert auf der Prozessbilanz eines europäischen Leiterplattenherstellers und wird sowohl von der Qualität der Datenaufnahme als auch von der Aktualität her als gut eingeschätzt. Allerdings wird mit einem europäischen Produktionsstandort nicht der Marktdurchschnitt abgebildet, da der Großteil der Leiterplatten, vor allem für Consumer-Elektronik, in Asien gefertigt wird. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Annahmen über die Umweltwirkung der Herstellung einer unbestückten Leiterplatte für den Einsatz in Computer und Notebook moderat vorgenommen wurde. Mit dem Fokus auf Arbeitsplatzcomputer ist eine 6-lagige FR4-Leiterplatte mit Nickel-Gold-Beschichtung gewählt worden, was dem gängigen Stand der Technik entspricht. Der Datensatz ist über die Fläche skalierbar und daher gut für die Bewertung unterschiedlicher Arbeitsplatzcomputer mit unterschiedlichen Leiterplattengrößen und -formaten nutzbar. Der Datensatz ist von den Grundzügen her übertragbar auf Leiterplatten gleichen Typs (gleiches Substratmaterial und gleiche Beschichtung) mit anderer Lagenzahl. Da jedoch nur ein Datensatz vorliegt, ist keine direkte Skalierung möglich. Dazu müsste mindestens ein zweiter Datensatz für eine andere Lagenzahl vorliegen. Hier wären weitere Projekte mit der Aufnahme von Primärdaten von Leiterplatten unterschiedlicher Lagenzahl wünschenswert.

Ökologische und ökonomische Vergleichsrechnungen zwischen unterschiedlichen Varianten von Arbeitsplatzcomputern

Im Vorhaben „Öko-APC“ wurden die ökologischen und ökonomischen Auswirkungen von drei verschiedenen Arbeitsplatzlösungen miteinander verglichen:

- Computerarbeitsplatz mit Desktop-PC: Desktop-PC + externer Monitor + externe Tastatur + Maus
- Computerarbeitsplatz mit Notebook: Notebook (mit integriertem Monitor) + externer Monitor + Docking-Station + externe Tastatur + Maus
- Computerarbeitsplatz mit Mini-PC: Mini-PC + externer Monitor + externe Tastatur + Maus

Für die Untersuchung wurde der Betrachtungszeitraum von zehn Jahren ausgewählt (2014-2023), um mittel- bis langfristige Effekte aufgrund von unterschiedlichen Nutzungsdauern von IT-Geräten besser im Blick zu behalten. Je nach der angenommenen Nutzungsdauer der einzelnen Varianten und Komponenten müssen unterschiedlich häufig neue Geräte beschafft werden. Reparatur und Aufrüstung konnten aufgrund der unzureichenden Informationen nicht einbezogen werden. Für die Nutzungsdauer wurden die vom IT-Rat empfohlenen Mindestnutzungszeiten angenommen (siehe folgende Tabelle).

Nutzungsdauer von IT-Geräten auf Basis der Empfehlungen des IT-Rates im Betrachtungszeitraum 2014-2023

IT-Gerät	Beschaffungszyklus	Angenommene Nutzungsdauer
Desktop-PC	Beschaffungszyklus 1	5 Jahre
	Beschaffungszyklus 2	5 Jahre
Notebook	Beschaffungszyklus 1	3 Jahre
	Beschaffungszyklus 2	3 Jahre
	Beschaffungszyklus 3	3 Jahre
	Beschaffungszyklus 4	1 Jahr ⁹
Mini-PC	Beschaffungszyklus 1	5 Jahre
	Beschaffungszyklus 2	5 Jahre
Monitor	Beschaffungszyklus 1	5 Jahre
	Beschaffungszyklus 2	5 Jahre

Für die Untersuchung der Umweltbelastungen wurden die Treibhausgasemissionen und weitere Umweltwirkungen in allen Lebensphasen der Geräte, sprich Rohstoffgewinnung, Herstellung, Transport, Nutzung und Recycling bzw. Entsorgung, einbezogen. Der Schwerpunkt der Umweltbilanzierung lag auf den Treibhausgasemissionen, die für den Klimawandel verantwortlich sind. Es wurden zusätzlich weitere Umweltauswirkungen untersucht, die in dieselbe Richtung, wie die Bilanzierung der Treibhausgas-Emissionen, aufweisen. Für den Kostenvergleich zwischen drei Ausstattungsvarianten wurde der Ansatz der Lebenszykluskosten angewendet.

In der Berechnung der Ökobilanz sowie der Lebenszykluskosten wurde berücksichtigt, dass die IT Geräte unterschiedlich lange genutzt werden. Beispielsweise werden das Notebook nach 3 Jahren und der dazugehörige Monitor erst nach 5 Jahren ausgewechselt. Im Betrachtungszeitraum von 10 Jahren werden bei den Notebooks drei Beschaffungen voll eingerechnet und die vierte nur zu einem Drittel (inkl. Herstellung, Transporten und Entsorgung). Die aus der Nutzungsphase resultierende Umweltbelastung wird entsprechend der funktionellen Einheit per Jahr Nutzung eingerechnet. Reparatur und Aufrüstung konnten aufgrund der unzureichenden Informationen nicht einbezogen werden. Diese wurden allerdings in einer Sensitivitätsanalyse über den Vergleich der Notebooks mit 3 und 6 Jahre Nutzungsdauer berücksichtigt. Bei Lebenszykluskosten wird der sogenannte Restwert als negativer Kostenanteil berücksichtigt, wenn die Nutzungsdauer nur zu einem Teil am Ende des Betrachtungszeitraumes erreicht wurde.

Ökologische Vergleichsrechnung

Das kumulierte Treibhausgaspotenzial (THG-Potenzial) aller Lebenszyklusphasen der jeweiligen Arbeitsplatzlösungen über den Betrachtungszeitraum von 10 Jahren zeigt, dass das höchste absolute THG-Potenzial ein mit Notebook ausgestatteter Computerarbeitsplatz (1.394 kg CO₂e ohne Recyclinggutschriften) verursacht (siehe folgende Tabelle). Der Grund ist die mehrfache Anschaffung bzw. Herstellung der Hardware im Betrachtungszeitraum. Jedoch bewirkt der Einsatz von Notebooks anstelle des Desktop-PCs im Rahmen der in dieser Ökobilanz getroffenen Annahmen zur Nutzungsdauer, Hardwareausstattung und Energieeffizienz der jeweiligen Gerätetypen nur marginale Erhöhung des THG-Potenzials. Zurückzuführen ist das auf den hohen Herstellungsaufwand des höher dimensionierten Desktop-PCs und seinen hohen Energieverbrauch

⁹ Anteilige Nutzungsdauer, die innerhalb des zehnjährigen Betrachtungszeitraumes liegt.

in der Nutzung. Hingegen weist der Computerarbeitsplatz mit Mini-PC ein etwa 31% geringeres THG-Potenzial als der Computerarbeitsplatz mit Notebook und ca. 28% geringeres THG-Potenzial als der Computerarbeitsplatz mit Desktop-PC auf. Insgesamt hat ein Computerarbeitsplatz mit Mini-PC über den Betrachtungszeitraum von 10 Jahren die geringsten Treibhausgasemissionen von 959 kg CO₂e (ohne Recyclinggutschriften).

Treibhausgaspotenzial der drei Arbeitsplatzlösungen (kg CO₂e), kumuliert über 10 Jahre (ohne Recyclinggutschrift)

	Computerarbeitsplatz mit Desktop-PC	Computerarbeitsplatz mit Notebook	Computerarbeitsplatz mit Mini-PC
Herstellung	870,2	1152,96	616,8
Distribution	39,6	33,7	26,8
Nutzung	423,49	198,82	310,71
Entsorgung	9,6	8,1	4,8
Summe	1343	1394	959

Obwohl Notebooks insgesamt deutlich leichter sind als Desktop-PCs, fällt die Masseersparnis in der THG- Bilanz kaum ins Gewicht, weil die größten Beiträge zum THG-Potenzial von den aktiven Mikroelektronikkomponenten (z.B. DRAM) herrühren. Zusammen mit dem Motherboard und der SSD machen die Speichermodule mehr als 84% der herstellungsbedingten Treibhausgasemissionen eines Notebooks aus. Der hohe Herstellungsaufwand eines DRAM Speicherriegels und anderer mikroelektronischen Komponenten gekoppelt mit einer kürzeren Nutzungsdauer von Notebooks ist der Hauptgrund dafür, dass ein Computerarbeitsplatz mit Notebook trotz vergleichsweise besserer Energieeffizienz insgesamt schlechter abschneidet als ein Computerarbeitsplatz mit Desktop-PC.

Die Ergebnisse der Ökobilanz verdeutlichen, dass der größte Anteil der gesamten Treibhausgasemissionen auf die Hardwareherstellung zurückzuführen ist. Beim Computerarbeitsplatz mit Notebook macht die Herstellungsphase über 82% der Gesamttreibhausgasemissionen dieser Arbeitsplatzlösung aus. Anders als in einigen Studien (wie z.B. EuP 2007 dargestellt, hat sogar bei einem Computerarbeitsplatz mit Desktop-PC die Herstellungsphase und nicht die Nutzungsphase den höchsten Anteil (64,80%) an Gesamttreibhausgasemissionen. Selbst mit der ökologischsten Variante der Arbeitsplatzlösung mit Mini-PC macht die Herstellungsphase mit 64,31% den größten Anteil der Gesamttreibhausgasemissionen aus.

Aus den zuvor diskutierten Ökobilanzergebnissen lässt sich zusammenfassend schlussfolgern, dass leichtere und sparsamere Hardware gegenüber dem Desktop-PC nicht zwangsläufig zu ökologischen Vorteilen führen. Die kurze Nutzungsdauer von Notebooks resultiert sogar in höheren Treibhausgasemissionen im Vergleich zu den Computerarbeitsplätzen mit Desktop-PCs. Die geringsten Treibhausgasemissionen eines Computerarbeitsplatzes mit Mini-PC sind ebenfalls darauf zurückzuführen, dass die Mini-PCs eine vergleichsbare längere Nutzungsdauer von 5 Jahren aufweisen.

Ökonomische Vergleichsrechnung

Die Berechnung der Lebenszykluskosten für die untersuchten Arbeitsplatzlösungen über einen Betrachtungszeitraum von 10 Jahren zeigte, dass der Computerarbeitsplatz mit Notebook die höchsten Kosten verursacht, was ebenfalls auf die mehrfache Anschaffung von Notebooks aufgrund seiner kürzeren Nutzungsdauer zurückzuführen ist (siehe folgende Tabelle). Zusätzlich hat ein Notebook einen höheren Kaufpreis als ein Mini-PC und ein Desktop-PC. Im Vergleich zu

einem Computerarbeitsplatz mit Mini-PC verursacht ein Computerarbeitsplatz mit Notebook ca. 744 € Mehrkosten in 10 Jahren. Der Computerarbeitsplatz mit Mini-PC hat geringste Lebenszykluskosten unter den drei untersuchten Arbeitsplatzlösungen. Dieser hat marginal geringere Lebenszykluskosten als ein Arbeitsplatz mit Desktop-PC, denn ein Computerarbeitsplatz mit Mini-PC verfügt über energiesparsamere Komponenten, verbraucht in der Nutzung weniger Strom und verursacht somit geringere Stromkosten. Allerdings ist der angenommene Kaufpreis in diesem Fall entscheidend. Würde der Kaufpreis eines Mini-PCs noch höher, würde diese Variante höhere Lebenszykluskosten aufweisen als der Computerarbeitsplatz mit Desktop-PC.

Lebenszykluskosten der drei Arbeitsplatzlösungen (€), kumuliert über 10 Jahre

	Computerarbeitsplatz mit Desktop-PC	Computerarbeitsplatz mit Notebook	Computerarbeitsplatz mit Mini-PC
Anschaffungskosten (Preisniveau 2014)	1.004 €	1.814 €	1.028 €
Energiekosten (Barwert 2014)	157 €	73 €	115 €
Summe	1.161 €	1.887 €	1.143 €

Jährlicher Energieverbrauch und jährliche Gesamtkosten in der Bundesverwaltung

Im Rahmen der ökologischen und ökonomischen Vergleichsrechnungen wurde untersucht, wie unterschiedliche Anteile der drei Arbeitsplatzlösungen auf den Energieverbrauch in der Nutzungsphase sowie auf die jährlichen Gesamtkosten¹⁰ und die jährlichen lebenszyklusbezogenen Treibhausgasemissionen in der Bundesverwaltung auswirken. Dafür werden die in der folgenden Tabelle angenommenen Anteile der Arbeitsplatzcomputer für die Berechnung des jährlichen Energieverbrauchs in der Nutzungsphase sowie der jährlichen Gesamtkosten und der jährlichen lebenszyklusbezogenen Treibhausgasemissionen zugrunde gelegt¹¹.

Angenommene Anteile von Arbeitsplatzcomputern in der öffentlichen Bundesverwaltung und entsprechender Energieverbrauch in der Nutzungsphase sowie jährliche Gesamtkosten und jährliche lebenszyklusbezogene Treibhausgasemissionen

	Desktop-PC	Notebook	Mini-PC	Jährlicher Energieverbrauch in der Nutzungsphase in der Bundesverwaltung (GWh/ Jahr)	Jährliche Gesamtkosten in der Bundesverwaltung (Mio. €)	Jährliche Treibhausgasemissionen des gesamten Lebenszyklus (t CO ₂ e/ Jahr)
Szenario 1	90%	10%	0%	33,08 GWh/Jahr	67,65 Mio. €	73935,56 t CO ₂ e/Jahr
Szenario 2	0%	10%	90%	24,70 GWh/Jahr	66,79 Mio. €	54990,22 t CO ₂ e/Jahr
Szenario 3	25%	50%	25%	23,34 GWh/Jahr	83,36 Mio. €	69785,33 t CO ₂ e/Jahr
Szenario 4	33%	33%	34%	25,65 GWh/Jahr	76,49 Mio. €	67418,04 t CO ₂ e/Jahr

¹⁰ Jährliche Gesamtkosten setzen sich zusammen aus den anteiligen Investitionskosten und jährlichen Kosten für Energie und Entsorgung.

¹¹ Im Jahr 2014 gab es in der Bundesverwaltung insgesamt 548.501 Computerarbeitsplätze (laut Informationen des Umweltbundesamtes).

Es wird deutlich, dass der Energieverbrauch in der Nutzung am geringsten ist, wenn Notebooks ca. 50% und Mini-PCs 25% des Gesamt-PC-Bestandes ausmachen (Szenario 3). Betrachtet man die Lebenszykluskosten, also die Investitionskosten und Kosten, die während der Nutzung anfallen, ist dies jedoch die Variante, bei denen die jährlichen Gesamtkosten am höchsten sind. Was die jährlichen lebenszyklusbezogenen Treibhausgasemissionen angeht, sind sie im Szenario 1 am höchsten. Hier tragen die Herstellung und die Nutzung von Desktop-PCs maßgeblich zu Treibhausgasemissionen bei. Dagegen wird zeigt, dass die wirtschaftlichste Variante mit einem hohen Anteil von Mini-PCs (90%) und einem geringen Anteil von Notebooks (10%) zu erreichen ist (Szenario 2). Das ist auch die Variante, in der die jährlichen lebenszyklusbezogenen Treibhausgasemissionen am geringsten sind. Im Grunde kann festgehalten werden: je höher der Anteil der Notebooks in der Bundesverwaltung, umso höher sind die Lebenszykluskosten, und je höher der Anteil der Mini-PCs, umso geringer die Treibhausgasemissionen.

Aus diesem Grund ist empfehlenswert, stationäre Arbeitsplätze nicht mit Notebooks, sondern mit Mini-PCs auszustatten. Derzeit sind in der Bundesverwaltung rund 90% aller Computerarbeitsplätze mit Desktop-PCs ausgestattet, der Rest mit Notebooks (Szenario 1). Würden in der Bundesverwaltung statt Desktop-PCs Mini-PCs zu Einsatz kommen (Szenario 2), ließen sich jährlich ca. 8,37 GWh, 18.945 t CO₂e und Kosten von ca. 0,85 Millionen Euro einsparen. Würde hingegen Szenario 3 mit einem Anteil von 50% Notebooks umgesetzt, so wären die jährlichen Kosten 16,56 Millionen Euro höher als in Szenario 2. Realistischer ist evtl. der Vergleich zwischen Szenarien 3 und 4. Im Szenario 4 (Anteil Notebooks 33%) lassen sich im Vergleich zum Szenario 3 (Anteil Notebooks 50%) jährlich ca. 6,86 Millionen Euro einsparen. Allerdings liegt der jährliche Energieverbrauch (nur Nutzungsphase) des Szenarios 4 ca. 2,31 GWh höher als im Szenario 3. Berücksichtigt man aber die jährlichen lebenszyklusbezogenen Treibhausgasemissionen, ist Szenario 4 insgesamt klimafreundlicher.

Für die untersuchten Varianten der Arbeitsplatzcomputer ist aus Sicht des Klimaschutzes sowie der Wirtschaftlichkeit Szenario 2 die beste Lösung.

Verlängerung der Nutzungsdauer von Notebooks

Der wichtigste Einflussfaktor für die Verschlechterung der Umweltauswirkungen sowie Erhöhung der Gesamtkosten der Computerarbeitsplätze ist die Verkürzung der Nutzungsdauer der IT-Geräte, insbesondere bei Notebooks. Zu diesem Ergebnis kommen die Berechnungen der Ökobilanz sowie der Lebenszykluskosten. Es wurde untersucht, wie es sich auswirkt, wenn Notebooks 6 statt 3 Jahre genutzt werden. Im Modell geschieht die Nutzungsdauerverlängerung, indem bei 50% der Notebooks der Arbeitsspeicher von 4 auf 8 GByte aufgerüstet, der Akku erneuert und die ursprüngliche HDD gegen SSD ausgetauscht wird.

Die Ergebnisse zeigen deutlich, dass die Verlängerung der Nutzungsdauer des Notebooks das Treibhauspotenzial in einem Zeitraum von 10 Jahren um ca. 390 kg CO₂e ($\approx 28\%$) pro Computerarbeitsplatz verringert (siehe folgende Tabelle).

THG-Potenzial (kg CO₂e) Computerarbeitsplatz mit Notebook: Vergleich Notebook mit Nutzungsdauer 3 Jahre vs. Notebook mit Nutzungsdauer 6 Jahre

(kg CO ₂ e)	Computerarbeitsplatz mit Notebook (Nutzungsdauer 3 Jahre)	Computerarbeitsplatz mit Notebook (Nutzungsdauer 6 Jahre)
Herstellung	1152,96	772,48
Distribution	33,7	20,07
Nutzung	198,82	203,99
Entsorgung	8,1	6,26
Summe	1394	1003

Wirtschaftlich gesehen lassen sich im selben Betrachtungszeitraum ca. 527 € (=28%) pro Computerarbeitsplatz einsparen, wenn die Nutzungsdauer des eingesetzten Notebooks auf 6 Jahre erhöht wird (siehe folgende Tabelle).

Lebenszykluskosten (€) Computerarbeitsplatz mit Notebook: Vergleich Notebook mit Nutzungsdauer 3 Jahre vs. Notebook mit Nutzungsdauer 6 Jahre

(€)	Computerarbeitsplatz mit Notebook (Nutzungsdauer 3 Jahre)	Computerarbeitsplatz mit Notebook (Nutzungsdauer 6 Jahre)
Anschaffungskosten (Preisniveau 2014)	1.814 €	1.286 €
Energiekosten (Barwert 2014)	73 €	75 €
Summe	1.887 €	1.361

Bei einem Anteil von 33% der Computerarbeitsplätze mit Notebooks in der Bundesverwaltung ließe sich ca. 95 Millionen Euro und Treibhausgasemissionen von 71.000 Tonnen CO₂e in 10 Jahren einsparen, wenn die Nutzungsdauer von Notebooks von 3 auf 6 Jahre verlängert würde.

Offensichtlich ist es sinnvoller, Notebooks so lange wie möglich zu nutzen und gegebenenfalls aufzurüsten oder zu reparieren, als in kurzen Intervallen neue Notebooks zu beschaffen. Dadurch verzögern sich die erneute Belastung der Umwelt sowie des Haushaltes. Neue, womöglich energieeffizientere Computergenerationen, werden dadurch erst später in Betrieb genommen. Dadurch wird zwar in der Nutzung geringfügig mehr Strom verbraucht – über zehn Jahre macht das ca. 2 € Stromkosten und ca. 5 kg CO₂e pro Gerät aus. Dieser Mehraufwand an Kosten und Treibhausgasemissionen wird allerdings durch die Nutzungsdauerverlängerung der Hardware überkompensiert, wie die Berechnungen bestätigen.

Empfehlungen

Die Ergebnisse des Vorhabens „Öko-APC“ haben deutlich gezeigt, dass eine längere Mindestnutzungsdauer von IT Geräten und insbesondere von mobilen IT-Geräten sowohl ökologische als auch ökonomische Vorteile hat. Die Studie schlägt einen 6-Punkte-Plan für den Einsatz von Computerarbeitsplätzen in den Bundesbehörden vor, durch den Bundeshaushaltsmittel eingespart und die angekündigten Ziele der Bundesregierung im Rahmen der nationalen Nachhaltigkeitsstrategie, der Digitalen Agenda 2014-2017 und des Deutschen Ressourceneffizienzprogrammes unterstützt werden:

Maßnahme 1: Erhöhung der empfohlenen Mindestnutzungsdauer in der Bundesverwaltung

Alle Arbeitsplatzcomputer, stationär und mobil, sollten eine Mindestnutzungsdauer von 6 Jahren haben.

Maßnahme 2: Qualität und Haltbarkeit als Kernanforderung der öffentlichen Beschaffung

Die Berücksichtigung von Umweltkriterien bei der Anschaffung garantiert gute Qualität und Haltbarkeit von Arbeitsplatzcomputern. Die Beschaffungsleitfäden des Umweltbundesamtes und die Kriterien des Blauen Engel sind eine gute Orientierungshilfe. Damit kann eine Mindestnutzungsdauer von 6 Jahren möglichst ohne Reparaturen realisiert werden.

Maßnahme 3: Vorausschauende Beschaffung zur Vermeidung von häufigen Gerätewechseln

Bei einer Neuanschaffung sollte stets abgeschätzt werden, ob die zum Kauf erwogenen Arbeitsplatzcomputer den Ansprüchen der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter sowie der Software und Betriebssysteme auch in den nächsten 6 Jahren noch genügen werden.

Maßnahme 4: Bedarfsgerechte Ausstattung des Computerarbeitsplatzes

Wenn es sich um einen rein stationären Arbeitsplatz handelt, sollte ein Mini-PC genutzt werden. Nur wenn die Arbeit auch mobil erfolgen muss, sollte ein Notebook zum Einsatz kommen.

Maßnahme 5: Kaskadennutzung als Mittel zur Verlängerung der Nutzungsdauer

Eine weitere Nutzung der funktionstüchtigen Arbeitsplatzcomputer nach dem Nutzungsende sollte grundsätzlich angestrebt und in entsprechende Verwaltungsvorschriften geregelt werden.

Maßnahme 6: Beschaffung von wiederaufbereiteten Geräten

In den Beschaffungsprozess sollen auch gebrauchte und wieder aufgearbeitete Geräte einbezogen werden, um die Nachfrage der ReUse-Märkte zu stärken.

Summary

It is no longer possible to imagine modern administration without information and communication technology (ICT). Thanks to technological progress, ICT enables a new quality and quantity of administrative work. At the same time, ICT with its fast innovation cycles, its products that are more short-lived and its increasingly intensive usage is contributing to high levels of global environmental pollution.

The global use of resources is developing in a manner that cannot be continued on a sustained basis without impairing future generations' prospects for economic prosperity and social cohesion. Even now, the use of natural resources considerably exceeds the regenerative capacity of the earth. Therefore, in the "German Resource Efficiency Programme" (ProgRes) the German Federal Government has set itself the objective of sustainably using and protecting natural resources. Furthermore, Germany wants to play a prominent role in climate protection on the international stage and it has resolved measures in the national Climate Action Programme 2020/2022 to enshrine climate protection as a responsibility for society as a whole. Regarding ICT of the federal administration, in the "Digital Agenda 2014-2017" the German Federal Government announced the further reduction in energy consumption and in demand for natural resources in the context of the Green IT Initiative.

An effective and simple measure to increase energy and resource efficiency is to use the ICT products for as long as possible and only to replace them when they are defect or technically outdated. The question when and if the replacement of the existing devices with new, more energy-efficient devices is worthwhile can only be answered reliably when all factors throughout the whole life cycle of the product are considered. That means that alongside the energy consumption when in use, other environmental impacts, e.g., the need for raw materials or the energy used for production, distribution and disposal, should also be included in the decision-making process.

However, the focus is often only placed on the energy efficiency of devices during the usage phase, while other relevant parameters, such as the durability and service life of ICT devices, are neglected. An example is the replacement of functional desktop PCs with more energy-efficient notebooks in order to reduce the energy consumption when in use and consequently to reduce energy costs. When in use, notebooks are undoubtedly considerably more energy-efficient than PCs that are comparably equipped. However, Prakash et al. (2011) showed that it is not ecologically worthwhile to make decisions regarding the early replacement of ICT devices without considering the use of energy for production, distribution and disposal because the production of ICT devices, such as notebooks, is very energy-intensive and has a negative impact on the environment. According to Prakash et al. (2011), depending on the assumptions made, the production phase may represent between 56% and 75% of a notebook's greenhouse gas emissions. In the worst case the decision to replace desktop PCs with notebooks without considering the whole life cycle of the device, the expected and achieved service life in practice, the specific user requirements and the environmental impact beyond mere energy consumption when in use, may have a negative impact on the environment and on budgetary funds. For example, to

¹² National climate policy in Germany: <http://www.bmub.bund.de/themen/klima-energie/klimaschutz/nationale-klimapolitik/>

date there are no holistic ecological calculations as to how the different service lives of certain workplace IT-solutions in the federal administration departments affect the environment. In this case, it is primarily to be considered that the Council of the IT Officers of the Federal Administration (Rat der IT-Beauftragten der Bundesverwaltung) recommends a service life of three years for mobile IT devices (e.g., notebooks) and a service life of five years for workplace PCs (Guideline on service life, discarding and utilisation of IT devices and software – Richtlinie zur Nutzungsdauer, Aussonderung und Verwertung von IT-Geräten und Software), Annex to Resolution No. 2013/7 of the Council of the IT Officers of the Departments (Rat der IT-Beauftragten der Ressorts) dated 6th December 2013).

The current data and information situation regarding the production chains, the material and energy flows as well as the material and resource consumption of ICT products is not satisfactory. In addition, the existing databases on the production of ICT products are rarely comparable with each other so that no correct courses of action can be deduced with respect to a reduction of the environmental impacts and the consumption of resources. The existing data for generating life cycle assessments in the field of ICT products needs to be constantly verified, updated and amended due to the high technological dynamics in the products and production processes. Currently available data sets can only be applied to modern products to a limited extent because they no longer represent the state-of-the-art.

Furthermore, existing policies and standards to determine the usage profile for ICT devices are not up-to-date and neglect critical parameters, e.g., the active use of the computer. It can be assumed that the increase in the amount of data and data traffic in the network caused by the digitalisation process in the media sector leads to a distinctly different weighting of the operational states than was previously assumed because it is possible that a permanent connection to the server must be maintained. Considerations on the replacement of ICT devices from ecological viewpoints are based on assumptions regarding the service life as well as frequency and intensity of usage among other things. Therefore, it is necessary to develop a calculation method for the usage phase based on practice and present requirements. The current methods regarding usage profiles and user behaviour are still at a very general level. For example, there is no differentiation between different user groups and user profiles.

There are approximately 4.6 million people employed in public services in Germany. A large portion of these employees work at computer workplaces. Therefore, public administration departments account for a considerable share of the energy and resource consumption caused by ICT. The federal administration departments need a basis for decision-making that is scientifically profound so that they can contribute to achieving the climate goals connected to workplace computers and set by the German Federal Government.

Goals

The overriding goal of this project entitled “Ecological and economical aspects in a comparison of workplace computers intended to be used by public authorities, under consideration of the user behaviour” (Eco-WPC) is to investigate the potential to save resources in the information and communication technology (ICT) and to show how ICT can contribute to the overall reduction in resource consumption.

Specifically, the energy and resource consumption of typical IT based workplaces in federal authorities and comparable institutions is analysed in this project. In doing so, the environ-

mental impacts of typical workplace computers deployed as technology for the office workplace are to be quantified.

The project is structured into three content-related work packages (WP):

- WP 1: Suggestion of a suitable method to calculate the usage profile of selected ICT products as a basis for the determination of their environmental impacts in the usage phase (user profile)
- WP 2: Collection of life cycle data for the selected components of workplace computers (WPC)
- WP 3: Ecological and economical comparative calculations between different types of workplace computers (WPC)

In order to provide the project team with expert support, expert groups were set up for WP 1 and WP 2 respectively. The first expert group for WP 1 addressed the following topics:

- Evaluation and comparison of usage patterns in measurement standards
- Findings from measurements of the usage phase on workplace computers in the German Federal Environment Agency (Umweltbundesamt)
- Comparison with typical usage patterns in other institutions
- Development of scenarios for the economic and ecological evaluation of various courses of action

The accompanying group for WP 2 participated in the following areas at least:

- Collection of primary data for the selected components: hard discs (HDD), unmounted PCBs and CPUs
- Search for up-to-date and available secondary data on HDDs, unmounted PCBs and CPUs
- Establishing contact with the persons responsible for collecting the life cycle data in their companies
- Assessment of the collected data in regard to data gaps, allocation etc.
- Quality assurance (plausibility, representativeness, validation)

User profiles

In order to determine the user profiles in the federal administration departments, the existing methods to calculate the average electrical energy consumption of workplace computers were initially compared and systematically evaluated. Subsequently, the evaluation was supplemented by real energy consumption measurements from the workplace computers in the German Federal Environment Agency in order to derive a suitable method to calculate the usage of ICT workplace solutions in the federal administration departments, including user profiles. The comparison of real measurements and existing calculation methods was to ultimately show whether specific usage models are necessary to determine the average energy consumption in the administration departments and in how far a differentiation should be made between different user types on the basis of their intensity of use.

The comparison of existing calculation models showed that the differentiation between working days and non-working days as well as the selected direct daily distribution per year, have a

significant influence on both the calculation model and the resulting annual energy consumption. For example, if no differentiation is made between working days and non-working days, as is the case with Energy Star TEC (Typical Energy Consumption¹³), then it reflects a mixed scenario of professional and private use with a longer active/idle duration in the annual average resulting from it. The modelling using the average values of the energy consumption of the category B computers according to Energy Star v5.2 showed, for example, that the energy consumption of desktop PCs (without monitor) calculated at 51.7 kWh as per the PG Green IT calculation model¹⁴ was substantially less than the next highest calculation value at 81.3 kWh per year according to Fujitsu¹⁵. The calculation according to ECMA 383 (European Computer Manufacturers Association) at 144.7 kWh per year was higher than the value according to the PG Green IT by a factor of 2.8 and the calculation according to the Ecodesign Directive at 117.4 kWh per year was higher than the value according to the PG Green IT by a factor of 2.3.

The results of calculation procedures, such as those of the PG Green IT, that consider aspects, such as weekends, public holidays and average number of days of leave and sickness, come very close to the real results from the measurements at the Federal Environment Agency since the evaluation of the measurements on workplace computers performed at the Federal Environment Agency also showed that the usage fluctuates considerably over the working day and that the non-use time plays an important role. Thus, the distribution between working days and non-working days is critical. Other procedures, such as the Ecodesign Directive, Energy Star and ECMA, that do not consider the aforementioned aspects lead to a temporal overestimation of the active duration of usage at typical workplaces in administration departments and to a clear shift in results. Thus, the modelling of the calculation models based on the data sheet values for desktop PCs and monitors showed that the annual energy consumption of a computer workplace with desktop PC was 58.1 kWh according to the calculation model suggested in this study. In contrast, this value was 102.6 kWh when the calculation model of Energy Star v5.2 (full proxying) was taken as a basis. According to the calculation model of the Ecodesign Directive, the calculated energy consumption was even 131.1 kWh. It is noticeable that the new calculation model created in this study corresponds well with the model of the PG Green IT (annual energy consumption 59.6 kWh). The annual energy requirement of a computer workplace with a desktop PC according to the Energy Star v5.2 calculation is higher by a factor of 1.8 particularly because working and non-working days are not taken into account.

It was also shown that the active duration of usage of workplace computers in the authorities is comparatively short when calculated over a year. Thus, the calculation formula of the Energy Star program (version 6.0) is based on an active duration of usage that is three times longer than actually occurs in the federal administration departments in Germany. This circumstance also explains why in the past the potential energy consumption of workplace computers was often overestimated.

¹³ TEC = Typical Energy Consumption (typical energy requirement or energy consumption) describes the energy consumption of a product within a specified time period with defined consumption modes and consumption states.

¹⁴ PG Green IT is a project group appointed by the Council of the IT Officers of the German Federal Government with the task of implementing the goals of Green IT.

¹⁵ Based on the Energy Star v5.2, Fujitsu Technology Solutions presented a slightly amended calculation methodology for certain products and the energy requirement of the individual products in its white paper (see 3.1.3).

Apart from the duration of usage, the active/idle phase is also determined through the energy consumption in the active or idle state. In doing so, it is obvious that more than 70% of the total annual energy consumption of a desktop PC is determined through the active/idle phase. Therefore, the notebook's lower energy consumption in the active and idle state also results in a clearly lower annual energy requirement in comparison to desktop PCs. The monitor accounts for a large share of the total annual energy requirement of a computer workplace. At a computer workplace with a desktop PC, the monitor accounts for approximately 50% of the total annual energy requirement and at a computer workplace with a notebook, it accounts for 66.6%.

Collection of life cycle data

In the context of this study, life cycle data for unmounted PCBs, CPUs and HDDs was collected and corresponding data sets were developed for the Probas database of the Federal Environment Agency. The following table illustrates the core parameters of the data sets:

Core parameters of the data sets

Data set	Time reference	Geographical reference	System boundary	Technological reference
Production/internal hard disk (without upstream chain)	2008-2013	World mix	Gate-to-gate; includes the production of the media, sliders and HGA as well as installation and testing of the end products	Form factor: 3.5 inches
				Capacity: 1 TB
				Buffer size: 16 MB
				Spindle speed: 5400 rpm
				Interface: SATA II
				Technical features: PC external data transfer rate 300 megabytes per second Internal data transfer rate 144.5 megabytes per second
				Dimensions: height 2.62 cm (1.03 in.); width 10.16 cm (4 in.); depth 14.71 cm (5.79 in.)
				Weight: 0.605 kg ¹⁶
				Number of media: 3
Year of production: 2008				
Production CPU (without upstream chain)	2005	World mix	Gate-to-gate; includes production of CPU wafer	Wafer diameter: 300 mm
				Wafer surface area of one wafer: 0.071m ²
				Wafer thickness: 0.75 mm
				Weight of one wafer: ~150 g
				Process yield: 84%
Production unmounted PCB (without upstream chain)	2012-2013	Europe	Gate-to-gate; includes production of PCB and waste water treatment	Number of layers: 6
				Substrate: FR4
				Surface coating: Ni-Au
				Dimensions: Eurocard standard size of 0.016m ²
				Year of production: 2012
				System boundaries: Production and waste water treatment

¹⁶ The weight of the media was adjusted on the basis on the data from the manufacturers (2013) for the Probas data set (see Tabelle 31).

All essential information and material data could be collected for the HDD data set. Consequently, the data represents the technological background of 2008 to 2012. On the whole, the data quality of the data set can be categorised as good. In addition, the data and knowledge obtained in this study provide a basis for the further improvement of the data set and also for the generation of new data sets for hard drives with a form factor of 2.5 inches. The data set for 2.5" hard drives cannot be scaled to a data set for 3.5" hard drives because the material composition is different and the package area for the motor controller chip is not proportional to the weight. However, a scalability within the generated 3.5" data set is indeed possible in regard to the capacity or the number of the media.

The data set regarding the CPU production for a 300-mm wafer and an up-to-date BGA design, which is especially used in notebook CPUs, presents a great challenge. The data situation for the CPU production is still very patchy. Therefore, no complete data set could be created in this project. However, the individual production processes were described in great detail with the help of manufacturers and the Semiconductor Industry Association among others. Admittedly, the discussions with representatives from the industry led at most to an estimation of the data quality and not necessarily to an improvement of the data situation. In this regard, further research is necessary, above all in regard to the back-end processes. In principle, the data set can be scaled for the front-end processes via the chip surface area. By way of an example, it has already been done for the Intel Core i5 Processor with a die size of 0.94 cm². Apart from the die¹⁷ size, the surface of the package and the package design are important for the package. The package described here is predominantly used for notebook CPUs and to some extent also for desktop PCs. Regarding desktop PCs, it is to be noted that the pin grid array package (PGA) is predominately used. The production processes cannot be directly compared with the BGA processes¹⁸. In addition to the fully cased CPU, the socket, in which the finished encapsulated chip is inserted, must be taken into consideration in the PGA design.

The data set for the unmounted PCBs is based on the process of a European PCB producer and is rated as good both in terms of the quality of the data acquisition and the data being up-to-date. However, one European production site does not depict the market average because the majority of the PCBs, primarily for consumer electronics, are produced in Asia. It can be expected that the assumptions about the environmental impact of the production of unmounted PCB for use in computers and notebooks were moderate. With the focus on workplace computers, a six-layer FR4 PCB with nickel-gold coating that corresponds to the established state-of-the-art was selected. The data set can be scaled using the surface area and therefore can be used for the evaluation of different workplace computers with different PCB sizes and formats. In terms of its main features, the data set can be applied to PCBs of the same type (same substrate material and same coating) with a different number of layers. However, no direct scaling is possible as there is only one data set. To do so, there must be at least a second data set for a different number of layers. In this regard, further projects with the collection of primary data on PCBs with different numbers of layers would be desirable.

¹⁷ Unencapsulated individual chips before being encapsulated (bare chips)

¹⁸ Contemporary processors for desktop PCs and notebooks are generally produced in the PGA (Pin Grid Array) or BGA (Ball Grid Array) casing form or package model. The most recent BGA design, which is used particularly for notebook CPUs, is examined for this study. In this design the finished encapsulated chip is not inserted into a socket but is soldered directly on to the mainboard.

Ecological and economical comparative calculations between different types of workplace computers

In the “Eco WPC” project, the ecological and economical impact of three different workplace solutions were compared with each other:

- Computer workplace with desktop PC: Desktop PC + external monitor + external keyboard + mouse
- Computer workplace with notebook: Notebook (with integrated monitor) + external monitor + docking station + external keyboard + mouse
- Computer workplace with mini PC: Mini PC + external monitor + external keyboard + mouse

An observation period of ten years (2014-2023) was chosen for the study in order to have a better overview of the medium-term to long-term effects due to the different service lives of IT devices. Depending on the assumed service lives of the individual models and components, new devices have to be procured at different intervals. Repairs and upgrades could not be included due to the lack of data. They were, however, considered in a sensitivity analysis on the comparison of notebook workplaces with three and six year usage times for notebooks. The minimum useful lives recommended by the IT Council were taken as the service lives (see table below).

Service life of IT devices on the basis of the recommendations from the IT Council in the observation period 2014-2023

IT device	Procurement cycle	Assumed service life
Desktop PC	Procurement cycle 1	5 years
	Procurement cycle 2	5 years
Notebook	Procurement cycle 1	3 years
	Procurement cycle 2	3 years
	Procurement cycle 3	3 years
	Procurement cycle 4	1 year ¹⁹
Mini PC	Procurement cycle 1	5 years
	Procurement cycle 2	5 years
Monitor	Procurement cycle 1	5 years
	Procurement cycle 2	5 years

The greenhouse gas emissions and other environmental impacts in all life phases of the devices, i.e., raw materials extraction, production, transport, usage and recycling or rather disposal, were included in order to study the environmental pollution. The focus of the environmental accounting was placed on greenhouse gas emissions, which are responsible for climate change. Other environmental impacts were also examined this study. They were found to show the same trend as the greenhouse gas emissions. The life cycle costing approach was adopted for the cost comparison between three workplace IT-options.

In the calculation of the life cycle assessment and life cycle costs, it was taken into account that the IT devices are used for different lengths of time. For example, notebooks are replaced after three years and the monitors used with them are only replaced after five years. In the ten-year

¹⁹ Proportional service life that is within the ten-year observation period.

observation period, three notebook procurements were fully accounted for and the fourth procurement was only one third accounted for (including production, transport and disposal). The environmental pollution resulting from the usage phase is accounted for according to the functional unit per year of use. Concerning the life cycle costs, the so-called residual value is considered as a negative share of costs when the service life has only partly been reached at the end of the observation period.

Environmental impact

The cumulative global warming potential (GWP) of all life cycle phases of the respective workplace solutions over the ten-year observation period shows that the highest GWP is caused by a computer workplace equipped with a notebook (1,394 kg CO₂e) (see table below). The reason is the purchase or rather production of the hardware that occurs several times in the observation period. However, in the context of the assumptions made for the usage time, hardware equipment and energy efficiency of the respective device types, it was found that the use of notebooks instead of desktop PCs only causes a marginal increase in the GWP. That is to be attributed to the high amount of energy used to manufacture higher dimensioned desktop PCs and their higher energy consumption when in use. In contrast, a computer workplace with a mini PC shows a GWP that is approximately 31% lower than a computer workplace with a notebook and approximately 28% lower than a computer workplace with a desktop PC. All in all, a computer workplace with a mini PC has the lowest greenhouse gas emissions at 959 kg CO₂e over the ten-year observation period.

GWP of the three workplace solutions (kg CO₂e), cumulated over ten years

	Computer workplace with desktop PC	Computer workplace with notebook	Computer workplace with mini PC
Manufacturing	870.2	1152.96	616.8
Distribution	39.6	33.7	26.8
Usage	423,49	198,82	310,71
Disposal	9.6	8.1	4.8
Total	1343	1394	959

Although notebooks are by and large considerably lighter than desktop PCs, the lower weight is hardly of any consequence in the GWP because the largest contributions to the GWP stem from the active microelectronic components (e.g., DRAM). Together with the motherboard and the SSD, the memory module accounts for more than 84% of a notebook's greenhouse gas emissions caused by manufacturing. The high amount of energy used to manufacture a DRAM memory module and other microelectronic components combined with the shorter service life of notebooks is the main reason that a computer workplace with a notebook fares worse than a computer workplace with a desktop PC despite its comparatively better energy efficiency.

The findings of the life cycle assessment make it clear that the largest proportion of the total greenhouse gas emissions is to be attributed to hardware production. In the case of a computer workplace with a notebook, the production phase accounts for more than 82% of the total greenhouse gas emissions of the workplace solution. Contrary to what is presented in some studies (e.g., EuP 2007), even in the case of a computer workplace with a desktop PC, it is the production phase and not the usage phase that accounts for the highest share (64.80%) of greenhouse gas emissions. Even in the case of the most ecological option of the workplace

solution with a mini PC, the production phase accounts for the largest share of the greenhouse emissions at 64.31%.

From the previously discussed findings of the life cycle assessment, it can be concluded in summary that hardware that is lighter and more efficient in comparison to a desktop PC does not necessarily lead to ecological benefits. The short service life of notebooks even results in higher greenhouse gas emissions in comparison to computer workplaces with desktop PCs. The lowest greenhouse gas emissions of a computer workplace with a mini PC are equally to be attributed to the fact that mini PCs have a comparably long service life of five years.

Life-Cycle Costs

The calculation of the life cycle costs for the studied workplace solutions over an observation period of ten years showed that a computer workplace with a notebook causes the highest costs, which is also attributed to the repeated purchase of notebooks due to their shorter life cycle (see table below). In addition, a notebook has a higher purchase price than a mini PC or a desktop PC. Compared to a computer workplace with a mini PC, a computer workplace with a notebook causes approximately €744 higher costs over ten years. A computer workplace with a mini PC has the lowest life cycle costs out of the three studied workplace solutions. It has marginally lower life cycle costs than a workplace with a desktop PC because a computer workplace with a mini PC has components that are more energy saving, consumes less energy when in use and therefore generates lower energy costs. However, the assumed purchase price is decisive in this case. If the purchase price of a mini PC were even higher, then this option would present higher life cycle costs than a computer workplace with a desktop PC.

Life cycle costs of the three workplace solutions (€), cumulated over ten years

	Computer workplace with desktop PC	Computer workplace with notebook	Computer workplace with mini PC
Acquisition costs (price level 2014)	€1,004	€1,814	€1,028
Energy costs (present value 2014)	€157	€73	€115
Total	€1,161	€1,887	€1,143

Annual energy consumption, annual life-cycle greenhouse gas emissions and annual total costs in the federal administration departments

Within the scope of the ecological and economical comparative calculations, it was investigated how different ratios of the three workplace solutions have an impact on the energy consumption in the usage phase, on the annual life-cycle based greenhouse gas emissions and on the annual total costs²⁰ in the federal administration departments. To do so, the ratios of the workplace computers assumed in the following table was taken as a basis for the calculation of the annual energy consumption in the usage phase, annual life-cycle based greenhouse gas emissions and the annual total costs²¹.

²⁰ Annual total costs consist of the proportional investment costs (including the costs for the replaced components in the case of repairs) and the annual costs for energy and disposal.

²¹ In 2014, there were 548,501 computer workplaces in the federal administration (according to information from the Federal Environment Agency).

Assumed ratio of workplace computers in the public federal administration departments and the corresponding energy consumption in the usage phase, annual life-cycle based greenhouse gas emissions as well as annual total costs

	Desktop PC	Notebook	Mini PC	Annual energy consumption in the usage phase in the federal administration departments (GWh/year)	Annual total costs in the federal administration departments (€ million)	Annual life-cycle based greenhouse gas emissions (t CO ₂ e/year)
Scenario 1	90%	10%	0%	33.08	67.65	73,935.56
Scenario 2	0%	10%	90%	24,70	66.79	54,990.22
Scenario 3	25%	50%	25%	23,34	83.36	69,785.33
Scenario 4	33%	33%	34%	25,65	76.49	67,418.04

It becomes clear that the energy consumption when in use is at its lowest when notebooks account for 50% and mini PCs 25% of the total PC stock (scenario 3). However, if one considers the life cycle costs, i.e., the investment costs and the costs that accrue during usage, this scenario is the one in which the annual total costs are the highest. As far as the life-cycle based annual greenhouse gas emissions are concerned, they were found to be highest in Scenario 1. Here, the production and the use of desktop PCs contribute majorly to the greenhouse gas emissions. In contrast, the table above shows that the most economical scenario is to be achieved with a high percentage of mini PCs (90%) and a small percentage of notebooks (10%) (scenario 2). This is also the scenario with lowest greenhouse gas emissions. It can essentially be recorded that the higher the share of notebooks in the federal administration is, the higher are the life cycle costs. On the other hand, higher the share of mini PCs, lower the greenhouse gas emissions.

For this reason, it is also economically advisable not to equip stationary workplaces with notebooks but rather with mini PCs. At the moment, approximately 90% of all computer workplaces in the federal administration are equipped with desktop PCs and the rest have notebooks (scenario 1). If mini PCs were used in the federal administration departments instead of desktop PCs (scenario 2), then approximately 8.37 GWh, 18,945 t CO₂e and costs amounting to 0.85 million euros could be saved. By contrast, if scenario 3 with 50% notebooks was implemented, then the annual costs would be 16.56 million euros more than in scenario 2. The comparison between scenarios 3 and 4 is possibly more realistic. In scenario 4 (33% notebooks), approximately 6.86 million euros can be saved annually in comparison to scenario 3 (50% notebooks). Admittedly, the annual energy consumption of scenario 4 is approximately 2.31 GWh higher than in scenario 3. If annual life-cycle based greenhouse gas emissions are considered, scenario 4 has lower emissions than scenario 3.

For the studied workplace computer options, scenario 2 is the best solution from the point of view of climate protection and economic efficiency.

Extension of the service life of notebooks

The most important influencing factor for the worsening of the environmental impact and the increase in the total costs of computer workplaces is the reduction in the service life of IT devices, in particular in the case of notebooks. The calculation of the life cycle assessment and the life cycle costs calculation arrive at this conclusion. It was investigated what the effect would be if

the notebooks were used for six years instead of three years. In the model, the service life is extended by upgrading the internal memory from 4 gigabytes to 8 gigabytes, replacing the battery and exchanging the original HDD with SSD on 50% of the notebooks.

The findings clearly show that the extension of the service life of a notebook reduces the greenhouse gas potential by approximately 390 kg CO₂e (≈28%) per computer workplace over a period of ten years (see table below).

GHG potential (kg CO₂e) for a computer workplace with notebook: Comparison of a notebook with a service life of three years vs. a notebook with a service life of six years

(kg CO ₂ e)	Computer workplace with a notebook (three-year service life)	Computer workplace with a notebook (six-year service life)
Manufacturing	1152.96	772.48
Distribution	33.7	20.07
Usage	198,82	203,99
Disposal	8.1	6.26
Total	1394	1003

From an economical point of view, in the same observation period approximately €527 (28%) per computer workplace can be saved if the service life of the deployed notebooks is increased to six years (see table below).

Life cycle costs (€) for a computer workplace with a notebook: Comparison of a notebook with a service life of three years vs. a notebook with a service life of six years

(€)	Computer workplace with a notebook (three-year service life)	Computer workplace with a notebook (six-year service life)
Acquisition costs (price level 2014)	€1,814	€1,286
Energy costs (present value 2014)	€73	€75
Total	€1,887	1,361

In the case of 33% computer workplaces with notebooks in the federal administration, approximately 95 million euros and greenhouse gas emissions of 71,000 tonnes CO₂e could be saved in ten years if the service life of notebooks were extended from three to six years.

Obviously, it is more sensible to use notebooks as long as possible and, if required, to update or repair them rather than to purchase new notebooks at short intervals. In doing so, the repeated burden on the environment and the budget is delayed. As a result, new, where possible more energy-efficient, computer generations are only put into operation later. Admittedly, as a consequence slightly more energy is consumed when in use – over ten years, it amounts to €2 in energy costs and 6 kg CO₂e per device. However, this increase in costs and greenhouse gas emissions is overcompensated by the service life extension of the hardware, as is confirmed in the calculations.

Recommendations

The findings of the “Eco WPC” have clearly shown that a longer minimum service life of IT devices, and in particular of mobile IT devices, has both ecological and economic benefits. The study suggests a six-point plan for the use of computer workplaces in the federal authorities. By way of this six-point plan federal budgetary funds are saved and the announced goals of the German Federal Government in the context of the national Sustainable Development Strategy, the Digital Agenda 2014-2017 and the German Resource Efficiency Programme are supported:

Measure 1: Increasing the recommended minimum service life in the federal administrative departments

All workplace computers, both stationary and mobile, should have a minimum service life of six years.

Measure 2: Quality and durability as key requirement in public procurement

The consideration of environmental criteria during purchasing guarantees the good quality and durability of workplace computers. The procurement manuals of the Federal Environment Agency and the criteria of the Blue Angel label offer sound orientation. As a result, a minimum service life of six years can be achieved, preferably without repairs.

Measure 3: Forward-looking procurement to extend the service life

When making a new purchase, it should always be assessed whether the workplace computer considered for purchase will also satisfy the requirements of the employees as well as the software and operation systems over the next six years.

Measure 4: Need-based installation of the equipment

Mini PCs should be used for purely desktop-oriented workplaces. Notebooks shall only be used for workplaces which require travel.

Measure 5: Cascading usage as a means to extend the service life

Further usage of functional workplace computers after the end of usage in the federal administration departments shall be promoted and regulated in related administration laws.

Measure 6: Procurement of refurbished devices

Used and refurbished devices shall also be included in the procurement process in order to strengthen the demand of the Re-Use markets.

1 Einleitung

Die Informations- und Kommunikationstechnik (IKT) bildet die technische Grundlage für die heutige Informations- und Wissensgesellschaft. Sie schafft ein dynamisches Innovationsfeld und trägt maßgeblich zur wirtschaftlichen Entwicklung bei. Gleichzeitig trägt die IKT mit ihren schnellen Innovationszyklen, kurzlebigeren Produkten und immer intensiv werdender Nutzung zu hohen globalen Umweltbelastungen bei. Aktuelle Berechnungen zeigen, dass der IKT-bedingte Stromverbrauch in den kommenden Jahren deutlich wachsen wird (Prakash et al. 2014, Corcoran & Andrae 2013). Lag dieser in der EU-27²² ohne Berücksichtigung der Herstellung noch bei 214 TWh pro Jahr, soll er bis 2020 voraussichtlich schon 259 TWh pro Jahr betragen (Prakash et al. 2014). Der größte Anteil am Stromverbrauch geht mit 66 Prozent auf privat und beruflich genutzte Produkte zurück (Prakash et al. 2014). Allein in Deutschland war die IKT im Jahr 2007 für einen Stromverbrauch von 55,4 TWh verantwortlich (Stobbe et al. 2009). Eine laufende Studie des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) soll bis Ende 2015 aktuellere Zahlen über den IKT-bedingten Stromverbrauch in Deutschland liefern, wobei davon ausgegangen wird, dass der Stromverbrauchswert vom Jahr 2007 überschritten werden wird.

Die Bundesregierung hatte sich zum Ziel gesetzt, den IKT-bedingten Energieverbrauch in der Bundesverwaltung bis zum Jahr 2013 um 40 Prozent (bezogen auf das Basisjahr 2009) zu reduzieren (BMWi 2010)²³. Dabei geht es u.a. um den Stromverbrauch der vom Bund betriebenen IKT-Infrastruktur und um Empfehlungen für die öffentliche Beschaffung von umweltfreundlichen IKT-Produkten. In diesem Sinne wurde im Rahmen des ersten Green-IT-Tages der Bundesverwaltung das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) im Jahr 2010 neben zwei weiteren Behörden als "Leuchtturmprojekt Green-IT 2010" für den Austausch von Desktop-PCs mit hoher Leistungsaufnahme durch energieeffiziente Notebooks ausgezeichnet. In der Begründung heißt es: *„Die Energieeffizienz von Notebooks ist deutlich besser als bei herkömmlichen Desktop-Arbeitsplatzrechnern. Standard-PCs verbrauchen oftmals bis zu dreimal so viel Strom wie vergleichbare Notebooks. Auch haben Vergleiche von Desktop-PCs und Notebooks gezeigt, dass der Gewichtsvorteil von Notebooks sich zusätzlich in vielfältigen Umweltvorteilen niederschlägt – Stichwort Materialeffizienz“*.

Bemerkenswert ist in diesem Zusammenhang, wie die Bundesregierung in „Deutschland Digital 2015“ Green IT definiert: Unter „Green IT“ sind sämtliche Aktivitäten des umweltschonenden Einsatzes von IKT sowie der Nutzung von IKT zur Umweltschonung zu verstehen. Dies umfasst den gesamten Lebensweg von IKT-Produkten und neben dem Energieverbrauch auch andere Umweltwirkungen, wie z. B. den Verbrauch umweltrelevanter Rohstoffe (BMWi 2010). Der letzte Satz dieser Definition betont den Fokus auf den gesamten Lebensweg sowie die Bedeutung von anderen Umweltauswirkungen über den reinen Energieverbrauch hinaus.

²² Als EU-27 werden die Mitgliedstaaten der Europäischen Union bezeichnet. Seit 01.07.2013 besteht die EU aus 28 Mitgliedsstaaten.

²³ IKT-Strategie der Bundesregierung: „Deutschland Digital 2015“, <http://www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/PDF/Publikationen/ikt-strategie-der-bundesregierung,property=pdf,bereich=bmwi2012,sprache=de,rwb=true.pdf>; Zugriff am 05.08.2015

Notebooks sind in der Nutzung ohne Zweifel deutlich energieeffizienter als vergleichbar ausgestattete Desktop-PCs²⁴. Allerdings haben Prakash et al. (2011) gezeigt, dass es ökologisch nicht sinnvoll ist, Entscheidungen bezüglich der Substitution oder des vorzeitigen Ersatzes der IKT-Geräte ohne Berücksichtigung des Herstellungs-, Distributions- und Entsorgungsaufwands zu treffen. Denn die Herstellung von IKT-Geräten – wie Notebooks – ist sehr energieintensiv und belastend für die Umwelt. Laut Prakash et al. (2011) kann die Herstellungsphase, je nach getroffenen Annahmen, zwischen 56²⁵ und 75%²⁶ der Gesamttreibhausgasemissionen eines Notebooks ausmachen.

Die Entscheidung, Desktop-PCs durch Notebooks zu ersetzen ohne Berücksichtigung des gesamten Lebenswegs der Geräte, der erwarteten sowie realisierten Nutzungsdauer in der Praxis, der spezifischen Anforderungen der Nutzer und der Umweltauswirkungen über den reinen Energieverbrauch in der Nutzung hinaus, könnte im schlimmsten Fall sogar kontraproduktiv wirken. Beispielsweise gibt es bis dato keine ganzheitlichen ökologischen Berechnungen, wie unterschiedliche Nutzungsdauern von bestimmten Arbeitsplatzlösungen den ökologischen Rucksack in der Bundesverwaltung beeinflussen²⁷. Prakash et al. (2011) ziehen die Schlussfolgerung, dass der Umweltaufwand bei der Herstellung eines Notebooks so hoch ist, dass er sich durch eine erhöhte Energieeffizienz in der Nutzung nicht in realisierbaren Zeiträumen amortisiert. Daher ist es unabdingbar, die Betrachtung der Umweltauswirkungen der IKT auf die Aspekte des Materialverbrauchs und der Umweltinanspruchnahme in den vor- und nachgelagerten Produktionslebensphasen auszuweiten. Eine ganzheitliche Betrachtungsweise schafft höhere Richtungssicherheit für politische Entscheidungsträger und öffentliche Beschaffer, wenn es um Entscheidungen zwischen der Verlängerung der Nutzungsdauer und der Neuanschaffung von IKT-Geräten geht. Außerdem könnte mit Hilfe einer solchen lebenszyklusbezogenen Analyse mit höherer Genauigkeit und Richtungssicherheit ermittelt werden, wann und unter welchen Bedingungen es ökologisch sinnvoll ist, ein altes Gerät durch ein neues zu ersetzen.

Ein wichtiger Schritt für die Ermittlung von und Einflussnahme auf Optimierungspotentiale hinsichtlich der Nutzung natürlicher Ressourcen und der Reduzierung der Gesamtumweltauswirkungen ist die Kenntnis über die Stoff- und Energieströme sowie über den Ressourcenverbrauch entlang der globalisierten Herstellungsketten der IKT-Produkte. Allerdings ist die derzeitige Informations- und Datenlage zu den Herstellungsketten und den Stoff- und Energieströmen sowie zum Material- und Ressourcenverbrauch der IKT-Produkte unbefriedigend. Hinzu kommt, dass die bestehenden Datengrundlagen zur Herstellung der IKT-Produkte selten miteinander vergleichbar sind, so dass sich keine richtungssicheren Handlungsoptionen im Hinblick auf eine Reduzierung der Umweltauswirkungen und des Ressourcenverbrauchs ableiten lassen. Neben der mangelnden Datenverfügbarkeit sind extrem kurze Produktlebenszyklen der IKT-Geräte und die hohe Innovationsgeschwindigkeit der Branche weitere Aspekte, die eine regel-

²⁴ Öko-Institut e.V., www.ecotopten.de

²⁵ Lebensdauer 5 Jahre

²⁶ Lebensdauer 2,9 Jahre

²⁷ Hier ist vor allem zu berücksichtigen, dass der Rat der IT-Beauftragten der Bundesverwaltung eine Nutzungsdauer von 3 Jahren für mobile IT-Geräte (z.B. Notebooks) und eine Nutzungsdauer von 5 Jahren für Arbeitsplatz PC empfiehlt (Richtlinie zur Nutzungsdauer, Aussonderung und Verwertung von IT-Geräten und Software, Anlage zum Beschluss Nr. 2013/7 des Rats der IT-Beauftragten der Ressorts vom 6. Dezember 2013).

mäßige Aktualisierung der Datensätze erfordern. Die vorhandenen Daten zur Erstellung von Ökobilanzen im Bereich der IKT-Produkte bedürfen aufgrund der hohen Technologiedynamik bei Produkten und Fertigungsprozessen einer stetigen Überprüfung, Aktualisierung und Ergänzung. Derzeit verfügbare Datensätze können nur bedingt auf moderne Produkte angewendet werden, da sie nicht mehr den heute realisierten Stand der Technik abbilden.

Außerdem sind existierende Konzepte und Standards zur Ermittlung des Nutzungsprofils für IKT-Geräte nicht auf dem aktuellsten Stand und vernachlässigen entscheidende Kenngrößen, wie beispielweise die aktive Nutzung der Rechner²⁸. Die aktive Nutzung eines Rechners umfasst den Zustand, in dem der Rechner a) infolge einer vorherigen oder zeitgleichen Nutzereingabe oder b) infolge eines vorherigen oder zeitgleichen Befehls über das Netz Rechenoperation verrichtet. Dieser Zustand umfasst die aktive Verarbeitung, das Aufsuchen von Daten im Massen- und Arbeitsspeicher einschließlich der Zeit im Leerlauf-Zustand in Erwartung weiterer Nutzereingaben und bis zum Übergang zu Niedrigverbrauchsmodi (siehe Tabelle 1 und Tabelle 2 für die Definition von verschiedenen Betriebszuständen). Der aktive Zustand spielt möglicherweise eine entscheidende Rolle im Bürobereich. Es kann davon ausgegangen werden, dass der durch den Digitalisierungsprozess im Medienbereich ausgelöste Anstieg der Datenmenge und des Datenverkehrs im Netz zu einer deutlich anderen Gewichtung der Betriebszustände führt als bisher angenommen, weil möglicherweise eine permanente Verbindung zum Server gehalten werden muss.

Überlegungen zum vorzeitigen bzw. rechtzeitigen Ersatz von IKT-Geräten aus ökologischen Gesichtspunkten beruhen u.a. auf Annahmen zu Nutzungsdauer, -häufigkeit und -intensität. Daher ist es erforderlich, eine sich an der Praxis sowie an den gegenwärtigen Anforderungen orientierende Berechnungsmethode für die Nutzungsphase zu entwickeln. Die derzeitigen Methoden zu den Nutzungsprofilen und Nutzerverhalten befinden sich noch auf einer sehr allgemeinen Ebene. Beispielweise findet keine Differenzierung zwischen unterschiedlichen Nutzergruppen und -profilen statt. Weiterhin existiert bis dato keine einheitliche Methode zur Berechnung des aktiven Betriebszustandes.

In Deutschland sind im öffentlichen Dienst²⁹ ca. 4,6 Millionen Personen beschäftigt. Hiervon ist ein großer Teil der Beschäftigten an Computerarbeitsplätzen tätig. Öffentliche Verwaltungen haben also einen erheblichen Anteil an dem von der IKT verursachten Energie- und Ressourcenverbrauch. Damit die Bundesverwaltung zur Erreichung der von der Bundesregierung festgelegten Klimaziele im Zusammenhang mit Arbeitsplatzrechnern beitragen können, bedürfen sie

²⁸ Der aktive Betriebszustand ist vom Leerlauf-Zustand zu unterscheiden. Denn im Leerlauf-Zustand sind das Betriebssystem und andere Software vollständig geladen (Start by Default), aber es findet keine aktive Nutzung statt. Der Leerlauf-Zustand ist mit dem im EnergyStar v5.2 verwendeten Idle-Zustand vergleichbar.

²⁹ In den Personalstatistiken umfasst der öffentliche Dienst das Personal aller Kernhaushalte, Sonderrechnungen und der Einrichtungen in öffentlich-rechtlicher Rechtsform. Das Personal der Einrichtungen in privater Rechtsform zählt nicht zum öffentlichen Dienst. Kernhaushalte sind alle Ämter, Behörden, Gerichte und Einrichtungen, für die in den Haushaltsplänen des Bundes, der Länder, der Gemeinden/Gemeindeverbände und der Sozialversicherungsträger die Ausgaben und Einnahmen brutto veranschlagt und Personalausgaben ausgewiesen werden. Sonderrechnungen werden in den Finanz- und Personalstatistiken als Synonym für rechtlich unselbstständige Einheiten in öffentlich-rechtlicher Rechtsform verwendet, die über eine eigene Wirtschafts-/Rechnungsführung verfügen, deren Einnahmen und Ausgaben also nicht im Kernhaushalt enthalten sind. Zu den Sonderrechnungen zählen Bundesbetriebe und Landesbetriebe nach § 26 BHO/LHO, kommunale Eigenbetriebe sowie Sondervermögen (Statistisches Bundesamt, 2013).

einer wissenschaftlich fundierten Entscheidungsgrundlage. Und eine aus Umweltschutzsicht richtungssichere Entscheidung und Empfehlung über die beste Auswahl eines Arbeitsplatzcomputers kann nur dann getroffen werden, wenn der tatsächliche Verbrauch natürlicher Ressourcen in allen Lebensphasen einschließlich der Herstellung bekannt ist.

2 Zielsetzung und Arbeitsweise des Forschungsvorhabens

Das übergeordnete Ziel des Vorhabens ist, die Potentiale zur Ressourceneinsparung im Aktionsfeld Informations- und Kommunikationstechnik (IKT) auszuloten und aufzuzeigen, wie die IKT dazu beitragen kann, die Ressourceninanspruchnahme insgesamt zu senken.

Im Konkreten soll im Rahmen dieses Vorhabens der Energie- und Ressourcenverbrauch von typischen informationstechnikgestützten Arbeitsplätzen in Bundesbehörden und vergleichbaren Einrichtungen untersucht werden. Hierbei sollen die Umweltauswirkungen von typischen Arbeitsplatzcomputern quantifiziert werden, die als Technik für den Büroarbeitsplatz zum Einsatz kommen.

Das Vorhaben gliedert sich in drei inhaltliche Arbeitspakete (AP):

- AP 1 Vorschlag einer geeigneten Methode zur Berechnung der Nutzung von ausgewählten IKT-Produkten als Grundlage für die Bestimmung von deren Umweltwirkungen in der Nutzungsphase (Nutzerprofile)
- AP 2 Erhebung von Lebenszyklusdaten für die ausgewählten Komponenten von Arbeitsplatzcomputern (APC)
- AP 3 Ökologische und ökonomische Vergleichsrechnungen zwischen unterschiedlichen Varianten von Arbeitsplatzcomputern (APC)

Unterstützung durch den Begleitkreis

Zur fachlichen Unterstützung des Projektteams wurde jeweils ein Begleitkreis für AP 1 und 2 ins Leben gerufen.

Der erste Begleitkreis für das AP 1 tagte mit 18 Teilnehmerinnen und Teilnehmern am 08.04.2013 in Berlin und beschäftigte sich mit folgenden Themen:

- Auswertung und Vergleich von Nutzungsmustern in Messstandards,
- Erkenntnisse aus Messungen der Nutzungsphase an Arbeitsplatzcomputern im Umweltbundesamt,
- Vergleich mit typischen Nutzungsmustern in anderen Einrichtungen,
- Entwicklung von Szenarien zur ökonomischen und ökologischen Bewertung verschiedener Handlungsoptionen.

Die Sitzung des zweiten Begleitkreises für das AP 2 fand am 19.06.2013 in Berlin statt und wurde von 15 Teilnehmer/-innen besucht. Dieser Begleitkreis sollte sich mindestens in folgenden Bereichen einbringen:

- Beschaffung von Primärdaten für die ausgewählten Komponenten, Festplatte (HDD), unbestückte Leiterplatte und CPU
- Suche nach aktuellen und verfügbaren Sekundärdaten zu HDD, unbestückter Leiterplatte und CPU
- Kontaktvermittlung mit den in ihren Firmen für die Erhebung der Lebenszyklusdaten zuständigen Personen
- Prüfung der erhobenen Daten im Hinblick auf die Datenlücken, Allokationen usw.
- Qualitätssicherung (Plausibilität, Repräsentativität, Validierung)

Die Protokolle und weitere Unterlagen zu den beiden Begleitkreissitzungen befinden sich in Anhang 2 und 3.

3 Arbeitspaket 1: Vorschlag einer geeigneten Methode zur Berechnung der Nutzung von ausgewählten IKT-Produkten als Grundlage für die Bestimmung deren Umweltwirkungen in der Nutzungsphase

3.1 Einführung

3.1.1 Gegenstand und Zielstellung

Gegenstand dieses Arbeitspaketes ist die vergleichende Gegenüberstellung und systematische Auswertung einerseits von existierenden Methoden zur Berechnung des durchschnittlichen elektrischen Stromverbrauchs von Arbeitsplatzcomputern (APC) und andererseits von realen Nutzungsprofilen, die durch Messungen im Umweltbundesamt ermittelt wurden.

Im methodischen Vorgehen werden zunächst die Terminologie und Definitionen von Betriebszuständen erfasst, wie sie in existierenden Standards und Berechnungsmodellen aktuell zur Anwendung kommen. In diesem Zusammenhang wird auch die zeitliche Verteilung einzelner Betriebszustände im Berechnungsmodell für den Vergleich dokumentiert. Dieser Vergleich beinhaltet sowohl die zeitliche Verteilung einzelner Betriebszustände im Mittel über ein gesamtes Jahr als auch die tagesspezifische Verteilung, d.h. die Verteilung bezogen auf die Nutzung an Arbeitstagen, Sonn- und Feiertagen sowie zu Urlaubszeiten.

Im nächsten Schritt werden die konkreten Ergebnisse der Stromverbrauchsmessungen bei insgesamt 78 Arbeitsplatzcomputern im Umweltbundesamt³⁰ ausgewertet und – als aktueller Referenzwert für die APC-Nutzung in einer Bundesbehörde – in die Analyse mit einbezogen. Die Untersuchung hat das primäre Ziel zu prüfen, ob beispielsweise der vom Energy Star Programm ausgewiesene typische Jahresverbrauch TEC (TEC – Typical Energy Consumption) die am UBA gemessenen Nutzungsprofile realistisch abbildet oder nicht.

Die vergleichende Gegenüberstellung von realen Messwerten und existierenden Berechnungsmethoden soll schlussendlich zeigen, ob spezifische Nutzungsmodelle für die Ermittlung des durchschnittlichen Energieverbrauchs in der Verwaltung nötig sind und inwiefern verschiedene Nutzertypen aufgrund ihrer Nutzungsintensität unterschieden werden sollten. In diesem Zusammenhang wird auch die unterschiedliche Nutzung von stationären Desktop-APCs und mobilen Notebook-APCs berücksichtigt. Die Ergebnisse dieser Analyse werden in die nachfolgenden Arbeitspakete des Vorhabens „Öko-APC“ einschließlich der ökologischen und ökonomischen Vergleichsrechnungen einfließen.

3.1.2 Abgrenzung des Untersuchungsrahmens

Im Kontext der vorliegenden Untersuchung wird der Begriff „Arbeitsplatzcomputer“ wie folgt verwendet. Ein Arbeitsplatzcomputer (APC) ist ein Personal Computer mit Monitor³¹. Dabei kann es sich einerseits um zwei einzelne Geräte handeln, wie ein Desktop-APC mit separatem Monitor, oder andererseits um ein integriertes Produkt, wie ein Notebook-APC (Laptop), das allerdings auch mit einem separaten Monitor am Arbeitsplatz betrieben wird.

³⁰ Sachverständigenvorhaben: „Energiemessung von Arbeitsplatzcomputer (APC) und Erarbeitung von Maßnahmen für deren energieeffiziente Nutzung, 2012“ Auftragnehmer Fa. deZem GmbH.

³¹ Hierbei kann es sich um einen oder mehrere an den Desktop-PC bzw. Notebook angeschlossene Monitore handeln.

Von der Untersuchung ausgenommen sind sowohl mobile Endgeräte wie Tablet-PCs oder Smartphones als auch stationäre Thin Clients bzw. Zero Clients. Ebenso sind Netzwerkgeräte sowie zusätzliche Ein- und Ausgabegeräte wie Scanner und Drucker nicht Gegenstand der Untersuchung.

Thin Clients bzw. Zero Clients, welche reine Endterminals darstellen und kein vollwertiges Betriebssystem besitzen, sind von der Untersuchung ausgenommen, da ihre Funktionalität als Arbeitsplatzcomputer nur in direkter Wechselwirkung mit einer zentralisierten bzw. Cloud-basierten IT, d. h. mittels Server und Speichersystemen in einem oder mehreren Rechenzentren, realisiert wird. Darüber hinaus ist die Datengrundlage für die Ökobilanzberechnung des Anteils des Rechenzentrums und Infrastruktur zum Teil nicht vorhanden oder die Qualität ist sehr unbefriedigend.

Es ist anzumerken, dass diese Abgrenzung nicht ganz unproblematisch ist, da im heutigen Büroalltag immer mehr Anwendungen bereits separat auf Servern laufen und vollwertige Desktop und Notebook-APCs lediglich wie Terminals genutzt werden. Aufgrund der hohen Ende-zu-Ende³² Bandbreite heutiger Netzwerke nehmen Server- bzw. Cloud-basierte IT-Anwendungen kontinuierlich zu.

Aufgrund der Anforderungen an das Ökodesign³³ der IT-Produkte wird heute bereits ein konsequentes, integriertes Energiemanagement implementiert. Um die Auslastung optimal zu steigern, ohne an thermische Grenzen zu stoßen, nimmt die Anzahl dynamisch nutz- und regelbarer Rechenkerne der zentralen Prozessoreinheit (CPU) konstant zu. Die Halbleiterindustrie schafft damit die Voraussetzung nicht nur für eine hohe Performance im aktiven Zustand, sondern auch für eine deutlich reduzierte Leistungsaufnahme im Leerlauf und Ruhezustand. Auch die Reaktivierungszeiten aus energiereduzierten Betriebszuständen werden durch die technische Entwicklung, gerade im Bereich von Speichern und Prozessoren, positiv beeinflusst. Damit kann heute konsequenterweise bereits ein sehr strenges Power Management realisiert werden, was beispielsweise bei Notebooks gut ersichtlich ist.

Dem entgegen wirken aber, wie bereits oben erwähnt, die zunehmenden Server- und Cloud-basierten Anwendungen, die ein strenges Power Management nicht immer zulassen. Es bleibt festzuhalten, dass eine energieeffiziente Einstellung und Nutzung von Arbeitsplatzcomputern sowohl die aktuellen technischen Möglichkeiten, die Geräteparameter als auch die anwendungsspezifischen Gegebenheiten berücksichtigen muss. Vor dem Hintergrund einer dynamischen Technologieentwicklung sind diese Querbezüge auf grundlegende technische und anwendungsspezifische Entwicklungen in Computerbereich sehr wichtig und sollten bei einer periodischen notwendigen Beurteilung von Nutzungsprofilen berücksichtigt werden. Darüber hinaus muss zukünftig die gegenseitige Beeinflussung von Hard- und Software untersucht werden, um geeignete Maßnahmen zu entwickeln, die es ermöglichen, die Inanspruchnahme von natürlichen Ressourcen durch ein IKT-System zu reduzieren.

³² Ende-zu-Ende-Verbindung beschreibt in der Telekommunikation die Direktverbindung zwischen zwei Punkten. Im ISO/OSI-Referenzmodell stellt die Transportschicht eine Ende-zu-Ende Verbindung her.

³³ Richtlinie 2009/125/EG des Europäischen Parlaments und des Rates im Hinblick auf die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung von Computern und Computerservern

Begriffsbestimmung und Spezifikation von Betriebszuständen

Betriebszustände nach ACPI

Aktuelle Definitionen von energiebezogenen Betriebszuständen bzw. Energiesparmodi für Computer orientieren sich überwiegend an dem offenen Industriestandard ACPI (Advanced Configuration and Power Interface). Dieser Standard existiert seit 1996 und wird in der Version 4.0 seit Juni 2009 verwendet.³⁴ Im November 2013 wurde eine Revision 5.0a veröffentlicht. Mit ACPI wurde das Energiemanagement für Computer deutlich modifiziert und ist nun vom Betriebssystem gesteuert. Hierfür werden in ACPI u.a. stromverbrauchsbezogene Betriebszustände als sogenannte „Power States“ definiert. Diese beinhalten auf weiter untergeordneten Ebenen die „Global States“ oder „G-States“, die „Sleep States“ oder „S-States“, sowie die „Device States“ oder „D-States“.

Tabelle 1 zeigt im Überblick die G- und S-States. Der Bezeichnung wurde eine kurze deutsche Erläuterung in Anlehnung an die englische Originalfassung der Version 4.0 hinzugefügt. Auf die entsprechenden deutschen Bezeichnungen wird weiter unten eingegangen.

Diese Terminologie nach ACPI wird beispielsweise vom Energy-Star-Programm und der Europäischen Ökodesign-Verordnung für Computer zur Beschreibung von energiebezogene Betriebszuständen einschließlich der Niedrigverbrauchszustände (engl. Low Power Modes) herangezogen. In diesem Zusammenhang ist anzumerken, dass der Industriestandard ACPI nicht in einer deutschen Übersetzung verfügbar ist und damit keine einheitliche (deutsche) Terminologie beispielsweise für die unterschiedlichen „Sleep States“ existiert.

Dieser Umstand führt in Publikationen und offiziellen Dokumenten zu einer Fülle von deutschen Begriffen und oftmals auch der Nutzung von Anglizismen. So wird beispielsweise in den deutschen Fassungen des Europäischen Energy-Star-Kennzeichnungsprogramms 2009/489 EG (Kennzeichnungsprogramm für stromsparende Bürogeräte – Spezifikationen für Computer) und der Europäischen Verordnung zur Ökodesignrichtlinien 617/2013 EU (Umweltgerechte Gestaltung von Computern und Computerserver) die ACPI Terminologie nicht ganz einheitlich übersetzt. Des Weiteren ist anzumerken, dass die englischen Begriffe „Active“ und „Idle“, welche u.a. vom Energy-Star-Programm verwendet werden, nicht im ACPI als „State“ (Zustand) definiert sind.

Tabelle 1: Energiebezogene Betriebszustände nach ACPI

Power States nach ACPI			
Global State	Sleep State	Beschreibung	Erläuterung
G0		Working	Das System führt Anwendungen aus; Wechsel zum Aktivzustand sehr schnell möglich; Energieverbrauch schwankt und kann vom Nutzer durch Änderung von Leistungs-/Verbrauchseigenschaften beeinflusst werden; Keine sichere Demontage möglich; Systemzustand kann elektronisch gewechselt werden
G1	S1	Sleeping	CPU führt keine Anwendungen aus; Systeminhalte werden komplett gespeichert; Geringe Reaktionszeit des Systems auf Anfragen; Niedriger Energieverbrauch; Kein Neustart nötig für Working State; Keine sichere Demontage möglich; Systemzustand kann elektronisch gewechselt werden
G1	S2	Sleeping	CPU führt keine Anwendungen aus; Systeminhalte werden nicht komplett gespeichert; Inhalte von CPU und System Cache gelöscht; Geringe Reaktionszeit des

³⁴ ACPI <http://www.acpi.info/DOWNLOADS/ACPIspec50.pdf>

Power States nach ACPI			
Global State	Sleep State	Beschreibung	Erläuterung
			Systems auf Anfragen; Niedriger Energieverbrauch; Kein Neustart nötig für Working State; Keine sichere Demontage möglich; Systemzustand kann elektronisch gewechselt werden
G1	S3	Sleeping	CPU führt keine Anwendungen aus; nur Inhalte des RAM werden gespeichert; Geringe Reaktionszeit des Systems auf Anfragen; Niedriger Energieverbrauch; Kein Neustart nötig für Working State; Keine sichere Demontage möglich; Systemzustand kann elektronisch gewechselt werden
G1	S4	Sleeping	CPU führt keine Anwendungen aus; Hardware komplett abgeschaltet; Lange Reaktionszeit des Systems auf Anfragen; Niedrigster Energieverbrauch. Kein Neustart nötig für Working State; Keine sichere Demontage möglich; Systemzustand kann elektronisch gewechselt werden
G2	S5	Soft Off	CPU führt keine Anwendungen aus; Hardware komplett abgeschaltet; Niedrigster Energieverbrauch; Neustart nötig für Working State; Keine sichere Demontage möglich; Systemzustand kann elektronisch gewechselt werden
G3		Mechanical Off	System ist ausgeschaltet; Kein Energieverbrauch - Ausnahme: Systemuhr; Sichere Montage möglich; Systemzustand kann nur mechanisch erreicht bzw. verlassen werden

Betriebszustände nach ECMA 383 und IEC 62623

Die European Computer Manufacturers Association (ECMA) ist eine internationale Industrieorganisation zur Normung von Informations- und Kommunikationssystemen sowie Unterhaltungselektronik.³⁵ Der Standard ECMA 383 (Measuring the Energy Consumption of Personal Computing Products) existiert seit 2003 und wurde im Dezember 2010 in der 3. Edition veröffentlicht. ECMA 383 beinhaltet Begriffe und Definitionen für das gesamte Spektrum der Betriebszustände. Diese umfassen zunächst den „An-Zustand“ (engl. „On-Mode“), den „Schlaf-Zustand“ (engl. „Sleep Mode“) und den „Aus-Zustand“ (engl. „Off-Mode“). Unterteilt ist der „An-Zustand“ in den „Aktivzustand“ (engl. „Active Mode“) und zwei „Leerlaufzustände“ (engl. „Idle Modes“). ECMA 383 bildet die Basis für die aktuelle IEC Norm 62623:2012. Die IEC 62623 wurde 2013 in deutscher Fassung (DIN EN 62623:2013-07) mit dem Titel: „Desktop- und Notebook-Computer – Messung des Energieverbrauchs“ veröffentlicht. In der Übersetzung werden folgende Begriffsbezeichnungen festgelegt:

- Der englische Sammelbegriff „Power Modes“ wird mit Leistungsmodi übersetzt.
- Der Aktivzustand wird gleichzeitig auch mit dem Begriff Arbeitsmodus (engl. „Work Mode“) bezeichnet, dies führt oft zu Verwirrung. Im Aktiv(Arbeits-)Zustand werden Anwendungen und Operation gemäß der Eingaben des Nutzers oder gemäß der Anfragen aus dem Netzwerk ausgeführt. Im Aktiv(Arbeits-)Zustand ist der Bildschirm eingeschaltet.
- Als „Leerlauf“ (engl. Idle) wird ein Zustand bezeichnet, in dem das Betriebssystem und andere Software gestartet sind, aber nur Prozesse entsprechend der Voreinstellungen nach dem Start des Computers laufen. In IEC 62623 werden zwei Leerlaufzustände unterschieden.

³⁵ Ecma International; offizielle Webseite: <http://www.ecma-international.org>

- Der „Short Idle“ ist ein Leerlaufzustand, der unmittelbar nach dem Hochfahren bzw. nach dem Bewältigen einer aktiven Arbeitslast einsetzt. Der Monitor ist im „An-Zustand“ und Energiesparmaßnahmen haben noch nicht begonnen.
- Der „Long Idle“ ist ein Leerlaufzustand, der nach ca. 15 Minuten einsetzt, indem erste Energiesparmaßnahmen (engl. „Power Management Features“) aktiv werden. Dazu zählt zum Beispiel das Dimmen des Monitors ohne ihn abzuschalten und das Herunterfahren einzelner Hardwareelemente, wie der Festplatten. Im „Long Idle“ kann der Computer längere Zeit verbleiben bis entsprechend der Voreinstellung einer der Schlafmodi aktiviert wird.
- Neben dem „An-Zustand“ werden die Betriebszustände, wie der Ruhezustand (engl. „Sleep-Mode“) und der Aus-Zustand (engl. „Off-Mode“), teilweise mit direktem Bezug zum ACPI definiert.

In IEC 62623 existieren zudem zwei Ruhezustände. Beide Betriebszustände haben einen sehr niedrigen Energieverbrauch und werden prinzipiell gemäß ACPI S3 definiert. Unterschieden werden der Ruhemodus „Sleep“ und der Ruhemodus „SleepWoL“ mit „Wake on LAN“ Funktion, der ein Aufwecken über das Netzwerk ermöglicht.

Außerdem existiert ein „Aus-Zustand“. Dieser ist definiert als Zustand des geringsten Energieverbrauchs. Bei bestimmungsgemäßem Betrieb und unter Anschluss an die Stromversorgung kann der Computer für eine unbegrenzte Zeitdauer in diesem Zustand verbleiben.

Deutsche Terminologie für die Betriebszustände

Vor dem geschilderten Hintergrund ergibt sich ein sehr heterogener Sachstand bezüglich der deutschen Terminologie und Definition von funktionspezifischen Betriebszuständen für Computer. Für mehrere englische Begriffe gibt es entweder keine offizielle oder gleich mehrere deutsche Übersetzungen. Im vorliegenden Dokument werden die Begriffe „Betriebszustand“, „Zustand“ und „Modus“ synonym benutzt, obwohl gegenwärtig häufiger der Begriff „Zustand“ Verwendung findet.

Innerhalb der Nutzungsanalyse werden die in Tabelle 2 aufgeführten Definitionen der Betriebszustände eines Computers verwendet. Gegenübergestellt werden sie mit den entsprechenden Definitionen der oben aufgeführten Betriebszustände nach ECMA und ACPI.

Tabelle 2: Definition der Betriebszustände von Computern

Betriebszustand	Definition
Aktiv	Zustand, in dem der Rechner aktiv genutzt wird.
Leerlauf	Zustand, in dem das Betriebssystem und andere Software vollständig geladen sind (Start by Default), aber keine aktive Nutzung stattfindet. Ist mit dem im EnergyStar v5.2 verwendeten Idle-Zustand vergleichbar.
Ruhe	Ein Niedrigverbrauchsstatus, der bei Inaktivität automatisch erreicht oder manuell eingestellt werden kann. Die Aufwachzeit beträgt dabei ≤ 5 Sekunden (ACPI-Zustand S3; Suspend to RAM). Ist mit dem „Sleep Mode“ des EnergyStar v5.2 vergleichbar.
Schein-Aus	Geringster Niedrigverbrauchsstatus, der vom Nutzer ohne Netztrennung erreicht werden kann. Zustand mit der geringsten, vom Nutzer nicht ausschaltbaren (beeinflussbaren) Leistungsaufnahme, der unbegrenzt fortbesteht, solange das Gerät mit dem Stromnetz verbunden ist und entsprechend der Bedienungsanleitung des Herstellers genutzt wird. Im Sinne dieser Spezifikation entspricht der Modus dem ACPI-Zustand S5.
Netzgetrennt	Zustand, in dem das System physisch von der Stromversorgung getrennt ist. Kein Energieverbrauch vorhanden.

Tabelle 3: Übersicht der Terminologie der Betriebszustände

Global State	Sleep State	nach ACPI 5.0a	nach ECMA 383 (Edition 3)	nach Ökodesign-RL EU 617/2013	nach EU Energy Star & RAL UZ 78a	In der Nutzungs-analyse verwendete Terminologie
G0	S0	Working	Active (Work) Mode <i>weitere Bezeichnung</i> On-Mode	Aktiver Betrieb	Aktivzustand	Aktivzustand
G0	S0	Working	Idle Mode (short Idle)			Leerlaufzustand
G0	S0	Working	Idle Mode (long Idle)	Leerlaufzustand	Idle-Modus	Leerlaufzustand
G1	S1	Sleeping	-	-	-	-
G1	S2	Sleeping	-	-	-	-
G1	S3	Sleeping <i>weitere Bezeichnungen.</i> Standby, Sleep, Suspend to RAM	Sleep Mode (inkl.)Wake-on-LAN Sleep Mode	Ruhezustand	Ruhemodus	Ruhezustand
G1	S4	Sleeping <i>weitere Bezeichnungen.</i> Hibernation Suspend to Disk	Sleep Mode (inkl.)Wake-on-LAN Sleep Mode	-	-	-
G2	S5	Soft off	-	Aus-Zustand	Schein-Aus-Zustand	Schein-Aus
G3		Mechanical off	-	Niedrigstverbrauchs-zustand	Niedrigstverbrauchs-zustand	Netzgetrennt

3.1.3 Übersicht existierender Berechnungsmodelle

Für die Analyse werden sechs unterschiedliche Berechnungsmodelle herangezogen. Die Auswahl dieser Berechnungsmodelle basiert auf deren aktueller Nutzung sowohl in Beschaffungs- und Energiekennzeichnungsrichtlinien als auch für lebenszyklusorientierte Umweltbewertungen. Die nachstehende Tabelle 4 zeigt die Berechnungsmodelle im Überblick. Im Anschluss werden die einzelnen Berechnungsmodelle detailliert vorgestellt.

Tabelle 4: Übersicht der untersuchten Berechnungsmodelle

Bezeichnung	Berechnungsformel (in kWh/Jahr)
Energy Star v5.2	Typical Energy Consumption [TEC] für Desktop/Notebook: $E_{TEC}^{36} = (8760/1000) * (P_{off} * T_{off} + P_{sleep} * T_{sleep} + P_{idle} * T_{idle})$
Energy Star v6 (final)	$E_{TEC} = 8760/1000 * (P_{off} * T_{off} + P_{sleep} * T_{sleep} + P_{long_idle} * T_{long_idle} + P_{short_idle} * T_{short_idle})$
ECMA 383	$TEC_{estimate} = 8760/1000 * [P_{off} * T_{off} + P_{sleep} * T_{sleep} + P_{idle} * T_{idle} + P_{side} * (T_{side} + T_{work})]$
Fujitsu (Business Office)	Typical Annual Energy Consumption $AEC = [(T_{on\ mode} * P_{on\ mode}) + (T_{standby} * P_{standby}) + (T_{min\ WoL} * P_{min\ WoL}) * 260\ d + 105\ d * P_{min\ WoL} * 24h]/1000$
Ökodesign-Richtlinien EU 617/2013	$E = (P_{off} * T_{off} + P_{sleep} * T_{sleep} + P_{idle} * T_{idle})/1000$
PG GreenIT	$E = [203,27 * (P_{off} * T_{off} + P_{sleep} * T_{sleep} + P_{idle} * T_{idle} + T_{netzgetrennt} * 0) + 161,73 * (P_{off} * T_{off} + T_{netzgetrennt} * 0)]/1000$

Energy Star

Der Energy Star v5.2 (Version 5.2) für Computer wird erst im Juni 2014 durch den neuen Energy Star v6 (Version 6.0) abgelöst. Aus diesem Grund wird die Version v5.2 in der Untersuchung berücksichtigt. Im Folgenden werden beide Standards vorgestellt und die methodischen Unterschiede erläutert. Die nachfolgende Tabelle 5 listet die in beiden Standards verwendeten Begriffe und Definitionen für die einzelnen Betriebszustände, einschließlich der deutschen Begriffe, auf, die in der vorliegenden Untersuchung entsprechend verwendet werden.

Tabelle 5: Terminologie Betriebszustände in Energy Star v5.2/v6

Verwendet in Version	Terminologie in Energy Star	Terminologie im Projekt	Anmerkungen
v5.2&v6	Off Mode	Schein-Aus	ACPI Zustand S5
v5.2&v6	Sleep Mode	Ruhezustand	ACPI Zustand S3
v5.2	Idle State	Leerlaufzustand	
v5.2&v6	Active State	Aktivzustand	
v5.2&v6	Full Network Connectivity	Ruhezustand	Ruhezustand mit WoL, maximal 10 W

³⁶ TEC = Typical Energy Consumption (“typischer Energiebedarf bzw. Stromverbrauch“) bezeichnet den Stromverbrauch eines Produktes innerhalb bestimmter Zeiträume bei festgelegten Verbrauchsmodi und -zuständen.; P: bezeichnet die Leistungsaufnahme in W und T die Zeit in Stunden, wobei die Zeit in Stunden oder auch als prozentualer Faktor dargestellt ist. P_{off} bezeichnet die Leistungsaufnahme im Schein-Aus-Zustand. T_{work} bezeichnet die Zeit in welcher eine aktive Arbeitslast ausgeführt wurde. Vgl. Abschnitt „ECMA-383“, S. 22.

Verwendet in Version	Terminologie in Energy Star	Terminologie im Projekt	Anmerkungen
v6	Short Idle	Leerlaufzustand (Short Idle)	Leerlaufzustand ohne Energiemanagementfunktionen
v6	Long Idle	Leerlaufzustand (Long Idle)	Leerlaufzustand mit Energiemanagementfunktionen

Energy Star v5.2 Computer

Die Version Energy Star v5.2 wurde im Oktober 2010 veröffentlicht und adressiert die Produktgruppen Desktop PCs, integrierte Desktop-PCs, Notebooks, Workstations, Thin Clients und Small Scale Server, die nicht in Rechenzentren zum Einsatz kommen.³⁷

Für die Bewertung der Geräteausstattung für Desktop-PC und Integrierte Desktop-PCs werden in v5.2 vier Kategorien (A, B, C und D) definiert. Innerhalb dieser Kategorien werden die Leistungsklassen über die Geräteausstattung definiert. Dabei wird u.a. nach der Anzahl der Prozessorkerne, der Größe des Arbeitsspeichers (RAM) und dem verwendeten Grafikchip unterschieden.

Die Klassifizierung der Notebooks ist im Gegensatz zu den Desktop-PCs auf drei Kategorien (A, B und C) reduziert. Die für die Unterscheidung verwendeten Ausstattungsmerkmale sind mit denen für Desktop-PCs aber vergleichbar.

Die Leistungsaufnahme des Computers im Aktivzustand wird in der Berechnung nicht verwendet³⁸. Der aktive Zustand wird ausschließlich über die Gewichtung des „Idle State“, d.h. des Leerlaufs, berücksichtigt.

Für die Berechnung des jährlichen Energieverbrauchs TEC nimmt der Energy Star v5.2 folgende zeitliche Gewichtung der Betriebszustände an.

Tabelle 6: Gewichtung der Betriebszuständen nach EnergyStar v5.2

Desktop and Integrated Desktop Computers					
Mode Weighting	Conventional	Full Network Connectivity			
		Base Capability	Remote Wake	Service Discovery / Name Services	Full Proxying
T _{off}	55%	50%	47%	43%	40%
T _{sleep}	5%	14%	20%	25%	30%
T _{idle}	40%	36%	33%	32%	30%
Notebook Computers					
T _{off}	60%	54%	49%	48%	45%

³⁷ http://www.energystar.gov/ia/partners/product_specs/program_reqs/Computers_Program_Requirements.pdf?7ecf-12a4, 27.09.2013.

³⁸ Energy Star development team, Tom Bolioli: „There was a conscious decision in the committee to allow idle to substitute active by default. Unless someone showed a clear need to model actual active state use (which in some scenarios the case could be made like in workstations and certain knowledge worker applications), the default is to use idle in place of active.“

Desktop and Integrated Desktop Computers					
Mode Weighting	Conventional	Full Network Connectivity			
		Base Capability	Remote Wake	Service Discovery / Name Services	Full Proxying
T _{sleep}	10%	18%	24%	26%	30%
T _{idle}	30%	28%	27%	26%	25%

Innerhalb des Energy Star v5.2 wird allgemein mit 365 Tagen pro Jahr und jeweils 24 Stunden Nutzung pro Tag und damit 8760 Stunden pro Jahr gerechnet.

Der Energy Star v5.2 unterscheidet bei den Betriebszuständen zudem auch verschiedene Produktkonfigurationen bezüglich der Netzwerkverfügbarkeit in den Energiesparzuständen (Low Power Modes). So gibt es die Unterscheidung „Conventional“ und „Full Network Connectivity“, wobei bei der zuletzt genannten Konfiguration weitere vier Sub-Konfigurationen unterschieden werden. Im Energy Star v5.2 wird die Konfiguration „Conventional“ nicht weiter erläutert. Allerdings wird aus der vorhandenen Definition für „Full Network Connectivity“ deutlich, dass der Ruhezustand in der Konfiguration „Conventional“ über keine Netzwerkanbindung verfügt und damit ein Aufwecken über einen aktiven Link (z.B. Wake-on-LAN) nicht möglich ist. Die jeweilige Konfiguration der Netzwerkverfügbarkeit (Full Network Capability) korreliert mit einer unterschiedlichen zeitlichen Gewichtung der Betriebszustände.

Für die weitere Verwendung im Projekt wird die Konfiguration „Full Proxying“ verwendet.³⁹ Es wird angenommen, dass ein APC der in Behörden zum Einsatz kommt, am Netzwerk angeschlossen und somit Wake-on-LAN fähig ist. Dies ist heute nahezu Standard in der Büronutzung von APC und wird von den IT-Administratoren als bevorzugte Einstellung gewählt.

Der typische jährliche Energieverbrauch (TEC) wird mit folgender Formel bestimmt:

$$E_{TEC} = (8760/1000) * (P_{off} * T_{off} + P_{sleep} * T_{sleep} + P_{idle} * T_{idle})$$

Energy Star v6 Computer

Der Energy Star v6 für Computer liegt derzeitig als finale Version vor und ist am 02.06.2014 in Kraft treten.⁴⁰ Da Version v6 in weiten Teilen der Version v5.2 entspricht, wird im Folgenden nur auf Unterschiede und Neuerungen eingegangen.

Die Liste der betrachteten Geräteklassen wurde um „Tablet Computers“ und „Slate Computing Devices“ erweitert.⁴¹ Des Weiteren wurde die Unterteilung der Notebooks erweitert. Notebooks mit integriertem Grafikchip unterscheiden sich jetzt in drei Unterkategorien, bemessen an der

³⁹ In den Energy Star Dokumenten sowohl zum Standard v5.2 als auch v6.0 gibt es Inkonsistenzen zwischen dem Definitionsteil, in dem der Begriff „Full Capability“ verwendet wird und den Übersichtstabellen, in denen der Begriff „Full Proxing“ verwendet wird.

⁴⁰ https://www.energystar.gov/products/specs/computer_specification_version_6_0_pd, 27.09.2013.

⁴¹ Die Produktkategorien Tablet/Slate sind im EnergyStar v6 in den Definitionen als „TBD“, also „to be determined“ aufgeführt. Die Definitionen sind also noch nicht vorhanden.

Prozessorleistung (Anzahl Kerne * Taktrate). In den Ruhezustand-Anforderungen wurden Thin Clients zu den adressierten Geräten hinzugefügt.

Die Definition des Betriebszustands Leerlauf (engl. „Idle State“) wurde modifiziert. Dieser teilt sich nun wie nach ECMA auf in „Short Idle“ und „Long Idle“.

Der „Short Idle“ wird in Energy Star v6 als Leerlaufzustand unmittelbar nach dem Hochfahren aus dem netzgetrennten Zustand oder dem Ruhezustand definiert. Direkt nach Bewältigen einer Arbeitslast befindet sich der Computer nach v6 ebenfalls im „Short Idle“ Leerlaufzustand. Weitere Energiesparmaßnahmen werden in diesem kurzzeitigen Übergangszustand nicht eingeschaltet.

Im „Long Idle“ Leerlaufzustand werden nach Energy Star v6 zusätzlich Energiesparfunktionen aktiviert. Dazu gehören das Abschalten des Monitors oder der Festplatten. Der „Long Idle“ Modus beginnt, wenn ein PC längere Zeit im „Short Idle“ Modus verbleibt, jedoch nicht in den Ruhezustand übergeht. Diese Unterteilung ermöglicht die Berücksichtigung der Verwendung von Energiesparfunktionen und deren Auswirkung auf die Leistungsaufnahme im TEC.

Tabelle 7: Gewichtung der Betriebszustände innerhalb des Energy Star v6

Mode Weight in g	Conventional	Full Network Connectivity			
		Base Capability	Remote Wake	Service Discovery/ Name Services	Full Capability
T _{OFF}	45%	40%	30%	25%	20%
T _{SLEEP}	5%	15%	28%	36%	45%
T _{LONG_IDLE}	15%	12%	10%	8%	5%
T _{SHORT_IDLE}	35%	33%	32%	31%	30%

Folglich wird in der TEC-Formel aus v6 auch „Short Idle State“ und „Long Idle State“ unterschieden und jeweils ein Gewichtungsanteil und Durchschnittsverbrauch verwertet.

$$E_{TEC} = 8760/1000 * (P_{off} * T_{off} + P_{sleep} * T_{sleep} + P_{long_idle} * T_{long_idle} + P_{short_idle} * T_{short_idle})$$

Abschließend ist zu bemerken, dass nach wie vor der Aktivzustand in der Berechnungsformel nicht verwendet wird. In der Gewichtung der Betriebsmodi werden Desktop PCs, integrierte Desktop PCs und Thin Clients nun unter einer Kategorie zusammengefasst.

ECMA-383

Der bereits oben beschriebene ECMA-383-Standard⁴² liegt seit dem Jahr 2010 als dritte Version vor und umfasst die Produktgruppen: Desktop PCs, integrierte Desktop PCs und Notebooks. Die in ECMA-383 verwendeten Definitionen für die Betriebszustände werden in Tabelle 8 mit den in dieser Nutzungsanalyse verwendeten Begriffen für die Betriebszustände gegenübergestellt.

⁴² <http://www.ecma-international.org>, 20.05.2013.

Tabelle 8: Terminologie Betriebszustände in ECMA 383

Terminologie in ECMA-383	Terminologie im Projekt	Anmerkungen
Off Mode	Schein-Aus	
Sleep Mode	Ruhezustand	
Idle State	Leerlaufzustand	
Active (Work) Mode	Aktivzustand	
Wake on LAN (WoL)	Ruhezustand	Ruhezustand mit eingeschalteten Netzwerkfunktionen
Short Idle	Leerlaufzustand (Short Idle)	Leerlaufzustand ohne Energiesparmaßnahmen
Long Idle	Leerlaufzustand (Long Idle)	Leerlaufzustand mit Energiesparmaßnahmen

Für APCs verweist der ECMA-383-Standard auf das vorgegebene Nutzungsszenario „Majority Profile“, welches auf der Basis einer Analyse von Unternehmenscomputern erstellt wurde. In diesem wird folgende zeitliche Gewichtung der Betriebszustände verwendet:

Tabelle 9: Gewichtung der Betriebszustände des ECMA-383 Standard

Modus	Desktop PC	Notebook Computer
T _{off}	45 %	25 %
T _{sleep} + T _{sleepWoL}	5 %	35 %
T _{idle}	15 %	10 %
T _{sidle}	35 %	30 %
T _{work}	0 %	0 %

ECMA-383 geht von einer jährlichen Nutzung von 365 Tagen aus. Die Nutzungsintensität an Arbeitstagen und Wochenenden bzw. Feiertagen wird nicht unterschieden.

Zur Abschätzung des typischen Energiebedarfs pro Jahr (TEC) wird die aktive Nutzungsphase auf Basis der Leistungsaufnahme im Leerlauf berechnet. Dieses Berechnungsmodell verwendet folgende Formel:

$$TEC_{estimate} = (8760/1000) * [P_{off} * T_{off} + P_{sleep} * T_{sleep} + P_{idle} * T_{idle} + P_{sidle} * (T_{sidle} + T_{work})]$$

Wenn der Standardfehler des real gemessen Verbrauchs im Vergleich zum berechneten Verbrauch nach der o.g. Berechnungsmethode bei über 15% liegt, dann soll der Einfluss des Aktivzustands berücksichtigt werden. Somit ist es notwendig, auch die Leistungsaufnahme im Aktivzustand zu bestimmen und mit folgender Formel in die Berechnung des jährlichen Energiebedarfs einzuberechnen:

$$TEC_{actual} = (8760/1000) * (P_{off} * T_{off} + P_{sleep} * T_{sleep} + P_{idle} * T_{idle} + P_{sidle} * T_{sidle} + P_{work} * T_{work})$$

Hinweis: Ein Standardtest zur Bestimmung der Leistungsaufnahme im Aktivzustand existiert derzeit nicht. Um die durchschnittliche Leistungsaufnahme bzw. den elektrischen Stromverbrauch im Aktivzustand vergleichbar bemessen zu können, müsste eine definierte Arbeitslast als „Active Workload“ festgelegt werden. Weder ECMA 383 noch ein anderer Standard beinhaltet derzeit einen Benchmark-Test mit definierter Arbeitslast für Personal Computer. Die Leistungsaufnahme im aktiven Zustand wird grundsätzlich von der Prozessor-, Speicher- und Grafikkartenkonfiguration bestimmt. Auch die Netzwerkkonfiguration sollte berücksichtigt

werden. Je performanter diese Komponenten sind, desto höher ist zumeist die Leistungsaufnahme. Weitere Faktoren der Leistungsaufnahme im Aktivzustand sind das Betriebssystem, die Softwareausstattung und Ressourcenbedarf der realen Anwendungen. Schließlich wirken sich auch die Dimensionierung und der Wirkungsgrad des Netzteils aufgrund der unterschiedlichen Verlustleistung in den Teillastbereichen auf den Stromverbrauch aus.

Ökodesign-Richtlinien EU 617/2013:

Die Verordnung (EU) Nr. 617/2013 der Kommission⁴³ vom 26.06.2013 referenziert den Energy Star v5.2 und betrifft die folgenden Geräteklassen: Desktop-Computer, integrierte Desktop-Computer, Notebook-Computer (einschließlich Tablet-Computern⁴⁴, Slates⁴⁵ und mobiler Thin-Clients⁴⁶), Desktop-Thin-Clients, Workstations⁴⁷, mobile Workstations, Small-Scale-Server und Computerserver⁴⁸.

In der Verordnung werden die folgenden Betriebszustände definiert: „Aus-Zustand“, „Niedrigstenergiezustand“, „Ruhezustand“ „Leerlaufzustand“. Die jeweiligen Spezifikationen können in der oben stehenden Tabelle 5 nachvollzogen werden.

Die Bewertung der Geräte erfolgt nach dem Energy Star v5.2. Je nach Hardwarekonfiguration werden PCs in vier Kategorien A, B, C und D eingeteilt. Die festgelegten Grenzwerte für die Basisausstattung wurden jedoch im Gegensatz zum EnergyStar v5.2 herabgesetzt. Die Verordnung setzt somit höhere Anforderungen an die Energieeffizienz der Computer.

Zur Berechnung des jährlichen Gesamtenergieverbrauchs (TEC) werden im Rahmen der Verordnung die in Tabelle 10 aufgelisteten zeitlichen Gewichtungen für die Betriebszustände verwendet. Die Wahl der Gewichtungsfaktoren basiert dabei auf dem Energy Star v5.2 Nutzungsszenario „Conventional Profile“.

Tabelle 10: Gewichtung der Betriebszustände nach Energy Star v5.2 Conventional Profil

Modus	Gewichtung
T _{off}	55 %
T _{sleep}	5 %
T _{idle}	40 %

⁴³ Text der Verordnung siehe <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2013:175:0013:0033:DE:PDF>

⁴⁴ Tablet Computer werden in der Verordnung 617/2013 als Notebookcomputer mit einem Touch-Display und einer damit verbundenen physischen Tastatur bezeichnet.

⁴⁵ Als Slates werden die in Kapitel 3.1.2 beschriebenen Tablet-Computer bezeichnet. Dieses sind Notebookcomputer mit einem Touch-Display ohne eine physische Tastatur.

⁴⁶ Mobile Thin Clients: Bezeichnet einen Notebook-Computer, welcher eine Verbindung zu einem Remote-Computer benötigt, um die primären Funktionen bereit zu stellen. Diese Produkte enthalten keine Festplatten mit magnetischen Speichermedien.

⁴⁷ Workstation: ist ein Hochperformance-PC für spezifische Anwendungen. Ausgeschlossen sind Spiele-PCs.

⁴⁸ Sämtliche Server sind spezifische Computer, die verschiedene Ressourcen (Dienste, Applikationen, Speicher) anderen Nutzern über ein Netzwerk zur Verfügung stellen.

Zusätzlich werden „funktionsspezifische Anpassungen“ des jährlichen Gesamtenergieverbrauchs vorgenommen, wenn bestimmte Hardwarekriterien erfüllt sind. Zum Beispiel erhöht die Verwendung eines zusätzlichen internen Speichers den jährlichen Gesamtenergieverbrauch um 25 kWh/a. Für Grafikkarten gibt es eine komplexere Unterteilung mit zugeordneten TEC-Toleranzwerten für verschiedene Grafikkartenkonfigurationen.

Die Berechnung des jährlichen Gesamtenergieverbrauchs erfolgt mit folgender Formel:

$$E_{TEC} = (8760 / 1000) * (0,55 * P_{off} + 0,05 * P_{sleep} + 0,40 * P_{idle})$$

Für Geräte, die nicht die Möglichkeit bieten, einen Ruhemodus zu aktivieren und deren Energieverbrauch im Leerlaufzustand ≤ 10 W wird folgende Formel verwendet. Sie ergibt sich aus einer Gleichsetzung von P_{sleep} und P_{idle} .

$$E_{TEC} = (8760/1000) * (0,55 * P_{off} + 0,45 * P_{idle})$$

Fujitsu

Fujitsu Technology Solutions hat in Anlehnung an den Energy Star v5.2 in seinen White Papers eine leicht geänderte Berechnungsmethodik für bestimmte Produkte und den Energiebedarf der einzelnen Produkte vorgestellt (Fujitsu 2011). Dabei werden von Fujitsu folgende Zustände definiert:

Tabelle 11: Terminologie der von Fujitsu verwendeten Betriebszustände

Terminologie Fujitsu	Terminologie im Projekt	Anmerkungen
On-Zustand (Maximal + Idle)	Aktivzustand	Die Leistungsaufnahme wird aus der Summe von Leerlauf und Vollast gebildet
Maximallast	Aktivzustand	100% Auslastung
Idle	Leerlauf	
Standby-Zustand	Ruhezustand	
Minimum WOL	Schein-Aus	

Die Definition des Energieverbrauchs im On-Zustand entspricht dem MEEuP Methodology Report, jener Methode, welche in den Vorstudien zur Ausarbeitung von Durchführungsmaßnahmen im Kontext der Europäischen Ökodesign-Richtlinie seit 2005 Verwendung findet. Die Berechnungsformel lautet:

$$P_{on} = 0,9 * P_{idle} + 0,1 * P_{Maximum};$$

Bei der Berechnung des jährlichen Energieverbrauchs (TEC) geht Fujitsu von 260 Nutzungstagen (Arbeitstagen) und 105 Nicht-Nutzungstagen pro Jahr aus. Für die Nicht-Nutzungstage wird mit einem Energieverbrauch der dem Verbrauch im Schein-Aus-Zustand entspricht, gerechnet. Für die aktiven Nutzungstage wird eine zeitliche Gewichtung aus An-Zustand (P_{on}), Ruhezustand ($P_{standby}$) und Schein-Aus ($P_{Minimum\&WOL}$) verwendet. Die Berechnungsformel von Fujitsu lautet:

$$TEC = ((9 \text{ h} * P_{on} + 2 \text{ h} * P_{standby} + 13 \text{ h} * P_{Minimum\&WOL}) * 260 \text{ d} + (P_{Minimum\&WOL} * 24 \text{ h}) * 105 \text{ d}) / 1000$$

Die insgesamt neun Stunden (9h) An-Zustand entsprechen einem zeitlichen Anteil von 37,5% pro Arbeitstag. Dies ist für einen durchschnittlichen Wert durchaus hoch. Bezogen auf das

gesamte Jahr (Arbeits- und Nicht-Arbeitstage) macht der An-Zustand allerdings nur noch 26,7% der Zeit aus und ist damit im Vergleich deutlich geringer als das Energy Star Programm (35% long + short Idle) und die Europäischen Ökodesign-Richtlinie (40% Idle). Es ist als Zwischenfazit festzustellen, dass eine Unterscheidung von Arbeitstagen und Nicht-Arbeitstagen zur Präzisierung des Berechnungsmodells – bezogen auf eine Nutzung der Geräte in einer Verwaltungsstruktur – beiträgt und die Jahresdurchschnitts-Berechnungsmodelle deutlich relativiert.

PG Green IT

Der Rat der IT-Beauftragten des Bundes hat im Rahmen der Green-IT Initiative durch die Projektgruppe GreenIT (PG GreenIT) eine Handreichung zur Durchführung von Energieverbrauchsmessungen in der Bundesverwaltung (PG GreenIT 2011) entwickelt.⁴⁹ In dieser Handreichung ist unter anderem geregelt, wie der Energieverbrauch der APC ermittelt werden soll, falls keine eigenen kontinuierlichen Messungen des Energieverbrauchs durchgeführt werden.

Tabelle 12: Terminologie der bei PG Green IT verwendeten Betriebszustände

Terminologie PG Green IT	Terminologie im Projekt	Anmerkung
Normalbetrieb (on-mode)	Aktivzustand	Wird bei PG Green IT nur für Monitore angegeben
Betriebsbereit (on-idle)	Leerlaufzustand	
Ruhe-Modus (sleep-mode)	Ruhezustand	Entspricht ACPI S3
Schein-Aus-Zustand (stand-by)	Schein-Aus	Entspricht ACPI S5
Aus-Zustand (netzgetrennt)	Netzgetrennt	Nicht eindeutig

Die Empfehlungen nach PG Green IT beinhalten wie schon bei Fujitsu eine Unterscheidung von Arbeitstagen und Nicht-Arbeitstagen bzw. im Wortlaut der Handreichung eine Unterscheidung von Werktagen und Feiertagen. Hinsichtlich der genauen Verteilung findet sich im Text der Handreichung allerdings eine Inkonsistenz. So wird anfangs im Kapitel Betriebsmodi und Standardnutzungszeiten der Green IT-Handreichung eine sehr präzise Zeitverteilung auf Basis von Untersuchungen des Bundesfinanzministeriums (BMF) hergeleitet, welche zwischen 203,27 Werktagen und insgesamt 161,73 Wochenend- und Feiertagen unterscheidet (siehe Tabelle 13). Die Autoren empfehlen dieses Modell zu verwenden, lassen es aber den Behörden offengestellt welche zeitliche Verteilung eingesetzt werden soll.

Tabelle 13: Verteilung der Werk- und Feiertage nach Handreichung der PG Green IT⁵⁰

Art der Tage	Anzahl der Tage pro Jahr
Werktage	251
Wochenend- bzw. Feiertage	114
Urlaub und ganztägige Dienstbefreiung	32,23
Ausfälle durch Erkrankungen und Kuren	15,5
Angepasste Werktage im Jahr	203,27
Angepassten Wochenend- bzw. Feiertage	161,73

⁴⁹ http://www.cio.bund.de/DE/Innovative-Vorhaben/Green-IT/green_it_node.html

⁵⁰ Siehe http://www.cio.bund.de/Web/DE/Innovative-Vorhaben/Green-IT/Grundlagen/grundlagen_node.html

Im Kapitel Beispielrechnung der Green IT-Handreichung wird diese konkrete Tagesverteilung dann aber nicht verwendet und mit 220 Werktagen und 145 Feiertagen gerechnet. Eine Erläuterung dieses Vorgehens fehlt. Es scheint jedoch, dass man von den angenommenen 251 Werktagen ca. 31 Urlaubstage abgezogen hat und so zu durchschnittlich 220 Werktagen kommt.

Bleibt festzustellen, dass die Anzahl der angenommenen Arbeitstagen in einem Berechnungsmodell einen substantziellen Einfluss auf das Gesamtergebnis hat, da der Energiebedarf eines APCs aufgrund der heute meist sehr niedrigen Leistungsaufnahme im Ruhe-Zustand und Schein-Aus-Zustand maßgeblich durch den aktiven Betriebsmodus bestimmt wird.

Die unmittelbare Zeitverteilung pro Arbeitstag (Werktag) und Nichtarbeitstag (Wochenend- und Feiertag) wurde auf Basis von Untersuchungen des Fraunhofer ISI aus dem Jahr 2005 festgelegt und sind in Tabelle 14 aufgelistet.

Tabelle 14: Durchschnittliche Nutzungszeiten nach Fraunhofer ISI (Fraunhofer ISI 2005)

APC (Computer)	Werktag [h/Tag]	Feiertag [h/Tag]
Leerlaufzustand (Idle)	7	0
Ruhezustand (Sleep)	3	0
Schein-Aus (Standby)	11,2	19,2
Netzgetrennt (Aus)	2,8	4,8
Monitor	Werktag [h/Tag]	Feiertag [h/Tag]
Normalbetrieb (Idle)	7	0
Ruhezustand (Sleep)	4	0
Schein-Aus (Standby)	10,4	19,2
Netzgetrennt (Aus)	2,6	4,8

Im Vergleich zwischen Computer und Monitor sind in diesem Berechnungsmodell einige Unterschiede festzustellen. So sind die Monitore an Arbeitstagen um insgesamt eine Stunde länger im Ruhezustand und dafür etwa eine Stunde weniger im Schein-Aus. Warum diese Verteilung angenommen wurde, ist nicht eindeutig zu klären.

Aus heutiger Sicht erscheint diese Differenzierung nicht erforderlich. Die Leistungsaufnahme von Monitoren wird maßgeblich über die Bildhelligkeitseinstellung, die mittlere Bildhelligkeit der Darstellung (Average Picture Level) sowie der Bildschirmtechnologie bestimmt. Gerade bei adaptiven Rückbeleuchtungen (z.B. LCD mit zweidimensional, dynamisch angepasster LED-Hintergrundbeleuchtung) bzw. auch selbstleuchtenden Bildschirmtechnologien (z.B. OLED) kann dies zu einer geringeren durchschnittlichen Leistungsaufnahme führen. Zu bedenken ist auch, dass im Rahmen des Energy Star Programms oder dem Umweltzeichen Blauer Engel nur zwischen „On“ (Ein-Zustand/Aktiv), „Sleep“ (Ruhezustand) und „Off“ (Schein-Aus-Zustand) unterschieden wird. Ein „Idle“ (Leerlaufzustand) oder beispielsweise ein gedimmter Zustand wird in Datenblättern aktuell nicht ausgewiesen. Damit sollte im Berechnungsmodell ein Leerlaufzustand bezüglich der Leistungsaufnahme mit dem Ruhezustand gleichgesetzt werden.

3.1.4 Zusammenfassung und Auswertung

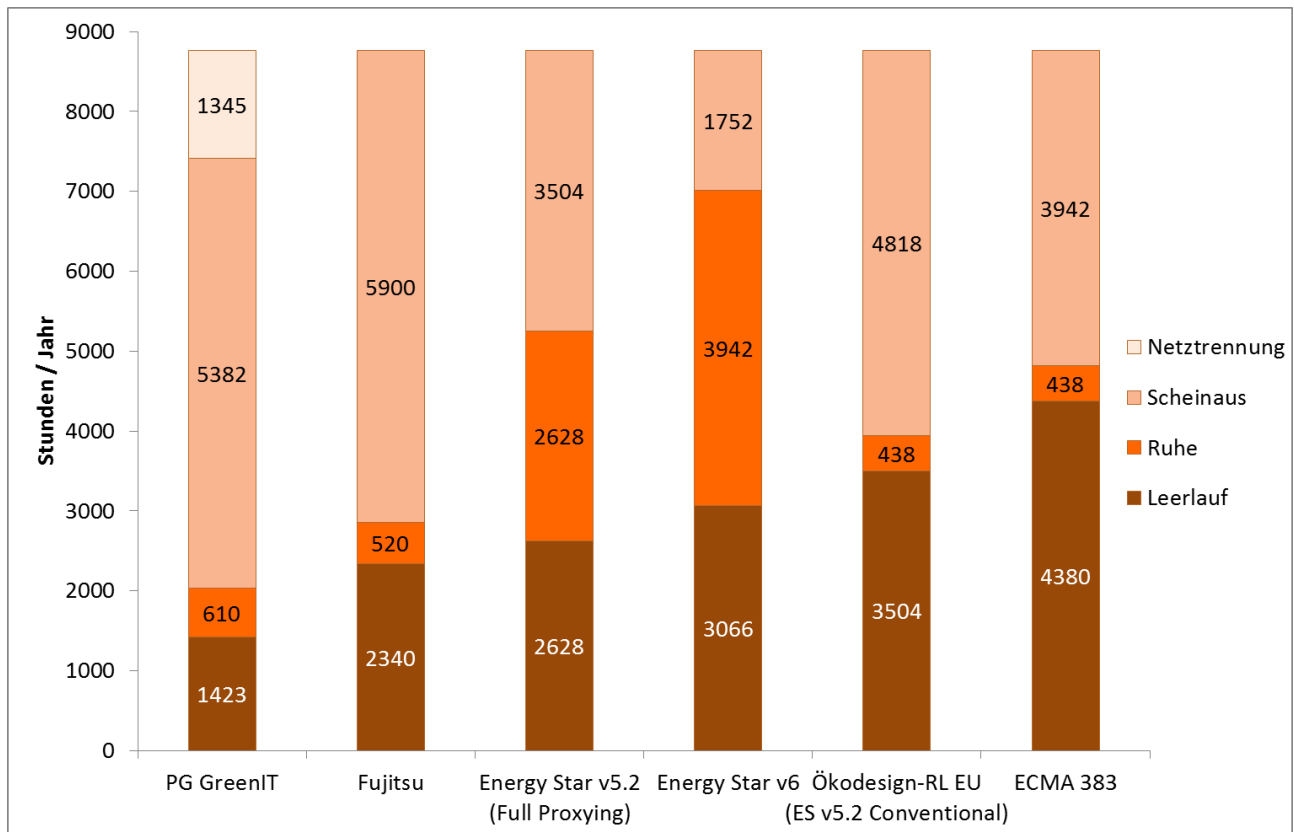
Definition von Betriebszuständen und zeitliche Verteilung der Betriebszustände

Der Industriestandard ACPI bildet die allgemeine Grundlage zur Definition von Betriebszuständen bei Personal Computern. Mit dem Energy Star Programm, aber auch den Standards ECMA-383 und IEC 62623 werden Testmethoden für die genaue Messung die Leistungsaufnahme der einzelnen Betriebszustände definiert. Dies beinhaltet übrigens auch die Messung des Aktiv-Zustandes (Active Workload). Gleichwohl werden in den meisten Berechnungsmodellen nur ein oder zwei Leerlaufzustände, ein Ruhezustand sowie ein Aus-Zustand definiert. Eine direkte Berücksichtigung der Leistungsaufnahme im Aktiv-Zustand wird lediglich von Fujitsu vorgenommen.

Bezüglich der zeitlichen Verteilung sind zwei Aspekte zu unterscheiden, die sich maßgeblich auf die Berechnung des Jahresenergiebedarfs von APCs auswirken. Einerseits gibt es Berechnungsmodelle, wie den Energy Star und die Europäische Ökodesign-Richtlinie, welche die zeitliche Verteilung der einzelnen Betriebszustände auf einen durchschnittlichen Jahrestag beziehen und andererseits Berechnungsmodelle, wie Fujitsu und PG Green IT, welche bewusst zwischen Arbeitstagen und Nichtarbeitstagen unterscheiden. Mit der zuletzt genannten Variante wird das Nutzungsmuster eines Arbeitsplatzcomputers weitaus präziser abgebildet als mit der ersten Variante. Das Energy Star Programm und die Europäische Ökodesign-Richtlinie erheben allerdings auch nicht den Anspruch, die Nutzung als Arbeitsplatzcomputer mit dem Berechnungsmodell abzubilden. Vielmehr sind dies allgemeine Modelle zur Ermittlung des durchschnittlichen Jahresenergiebedarfs (TEC) sowohl für Personal Computer im Arbeitsgebrauch als auch im Privatgebrauch. Folglich sind die Berechnungsmodelle von Fujitsu und PG Green IT für die Zielstellung dieses Projektes zu bevorzugen.

In der folgenden Abbildung 1 wird die zeitliche Verteilung der einzelnen Betriebszustände auf ein ganzes Jahr bezogen dargestellt. Dieser Vergleich zeigt die Gewichtung der Betriebszustände in den Berechnungsmodellen und gibt für die spätere Analyse wertvolle Hinweise, wenn den Betriebszuständen eine spezifische Leistungsaufnahme zugeordnet wird.

Abbildung 1: Vergleich zeitliche Gewichtung der Betriebszustände (Grafik: TU Berlin)



Die Darstellung verdeutlicht die zeitlich insgesamt recht geringe aktive Nutzung des APCs im Berechnungsmodell nach PG Green IT. In diesem Modell wird von rund 203 Arbeitstagen und 162 Nichtarbeitstagen ausgegangen, was die Gesamtstundenzahl der aktiven Nutzung bzw. des Leerlaufzustandes auf 1423 Stunden oder 16,2 Prozent pro Jahr reduziert. Im Vergleich hierzu ist der Aktiv-/Leerlauf-Zustand im Standard ECMA 383 mit 4380 Stunden oder 50 Prozent des Gesamtzeitraums etwa dreimal so stark bewertet.

Ein zweiter Aspekt ist auffällig: Im Energy Star Programm ist die Dauer des Ruhezustandes weitaus stärker ausgeprägt als bei den anderen Berechnungsmodellen. Hierin wird der Annahme Rechnung getragen, dass moderne Computer im Durchschnitt weitaus länger in einem Ruhezustand mit Netzwerkbereitschaft (Wake-on-LAN) verbleiben und damit die Verfügbarkeit und Fernwartungsmöglichkeit (Remote Administration) erhöht wird. Es wäre zu prüfen, inwiefern ein sehr schnelles Absenken der Verfügbarkeit (gemessen an den Optionen und der Zeitdauer für eine Reaktivierung) durch die relativ schnelle Aktivierung des Schein-Aus-Zustandes bzw. sogar eine Netztrennung in der Praxis wirklich erfolgt.

Jährlicher Stromverbrauch basierend auf Energy-Star-Durchschnittswerten

Im Folgenden werden die zeitlichen Berechnungsmodelle (siehe Abbildung 1) mit einheitlichen Annahmen für die Leistungsaufnahme in den einzelnen Betriebszuständen parametrisiert, um eine Vergleichbarkeit zu schaffen. Hierbei wird der Desktop-PC unabhängig vom Monitor betrachtet, da nur das Berechnungskonzept nach PG Green IT unmittelbar Monitore berücksichtigt und somit eine einheitliche Bewertung mit Monitor über alle Berechnungsmodelle nicht möglich ist.

Für die Berechnung des jährlichen Stromverbrauchs werden durchschnittliche Werte für die Leistungsaufnahme einzelner Betriebszustände auf Basis der Energy-Star-Online-Datenbank herangezogen.⁵¹

Die nachstehende Tabelle 15 zeigt die ermittelten Durchschnittswerte für die Leistungsaufnahme im Leerlaufzustand, Ruhezustand und Schein-Aus-Zustand für die Desktop PC-Kategorien B, C und D. Die Werte basieren auf dem Durchschnitt aller gelisteten Geräte der Jahre 2010 bis einschließlich 2013.⁵²

Tabelle 15: Vergleich durchschnittliche Leistungsaufnahme Betriebszustände für PC-Geräte Kategorien nach Energy Star (Energy Star 2013)

Mode	Energy Star 5.2 Ø Leistung [W]		
	Kategorie B	Kategorie C	Kategorie D
Leerlaufzustand	32,0	46,0	50,0
Ruhezustand (S3)	2,2	2,3	2,2
Schein-Aus-Zustand (S5)	0,9	1,0	1,0

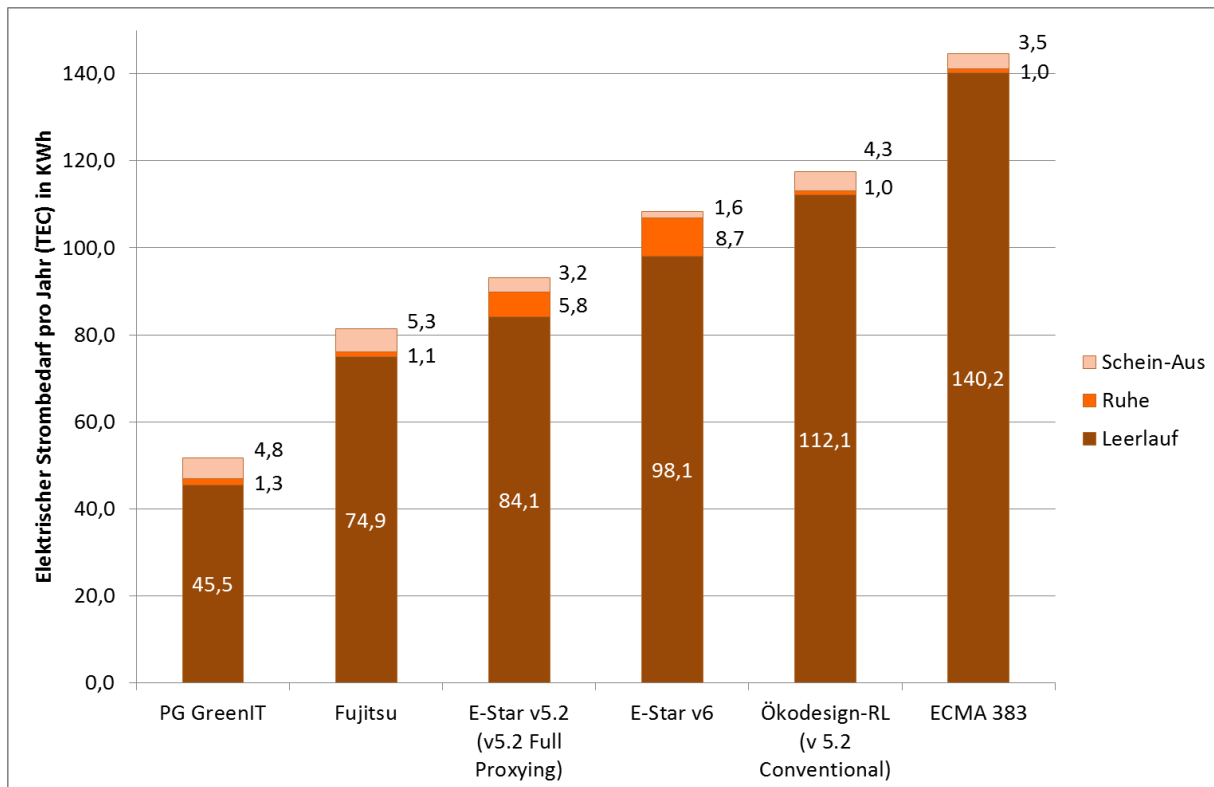
Das Umweltbundesamt (UBA) hat im Jahr 2012 die Messung der Energieverbräuche an exemplarischen Arbeitsplatzcomputer (APC) mit dem Ziel in Auftrag gegeben, um Effizienzpotenziale zu ermitteln, die eine Reduzierung des Energieverbrauchs ermöglichen. Der im UBA eingesetzte APC entspricht einer Kategorie B des Energy Star, somit werden die Werte der Kategorie B für den Vergleich genutzt.

In Abbildung 2 werden die auf Basis der Durchschnittswerte für die Leistungsaufnahme der Kategorie B (vgl. Tabelle 15) die jährlichen elektrischen Stromverbräuche pro Betriebszustand und Berechnungsmodell dargestellt.

⁵¹ Energy Star Computers Product List: <http://www.energystar.gov/productfinder/product/certified-computers/results>, abgerufen am 15.03.2013.

⁵² Die Kategorie C des Energy Star hat insbesondere im Leerlaufzustand eine deutlich höhere Leistungsaufnahme, welche auf die leistungsstärkere Hardwareausstattung zurückzuführen ist. Es ist davon auszugehen, dass die PCs der Kategorie D eher selten als APC-Lösungen eingesetzt werden, da deren Hardwareausstattung deutlich in Richtung High-Performance-PC tendiert.

Abbildung 2: Berechneter jährlicher Stromverbrauch auf Basis der Desktop ohne Monitor, Kategorie B nach Energy Star (Graphik: TU Berlin)

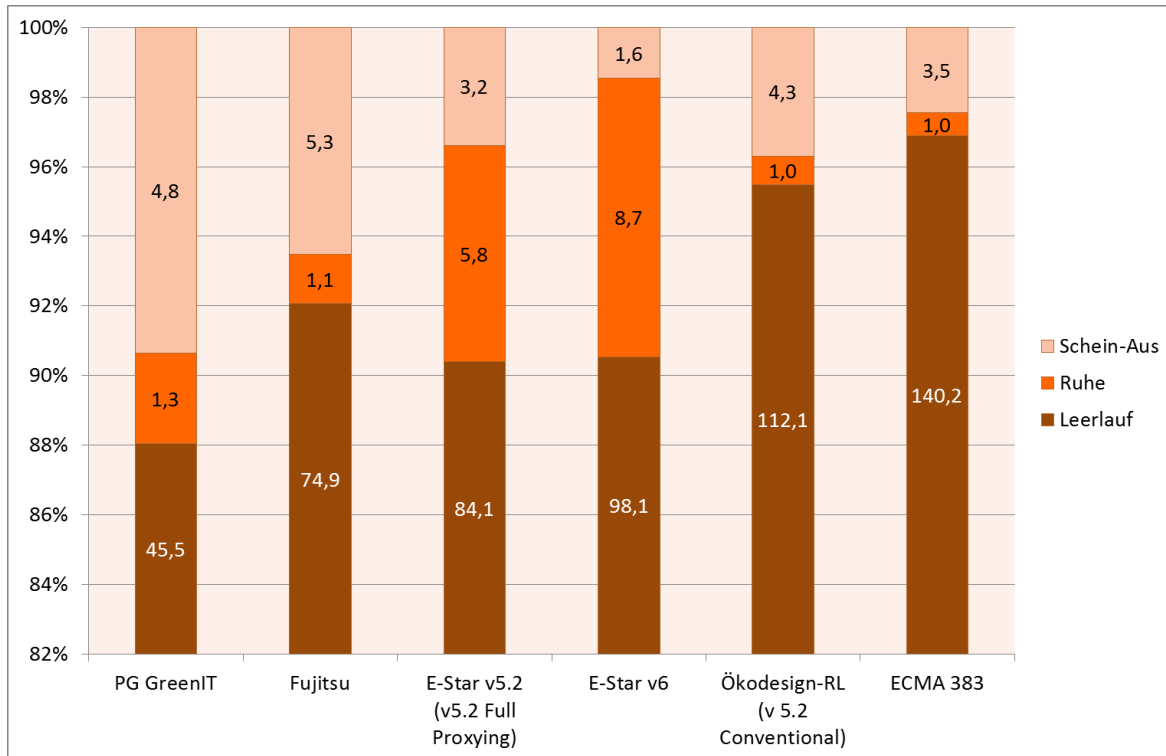


Die Parametrisierung der unterschiedlichen Berechnungsmodelle zeigt deutliche Unterschiede im jährlichen Gesamtstromverbrauch. Der Stromverbrauch entsprechend der Berechnung nach PG Green IT ist mit 51,7 kWh substantiell geringer als der nächsthöhere Berechnungswert nach Fujitsu mit 81,3 kWh pro Jahr. Die Berechnung nach ECMA 383 ist mit 144,7 kWh um Faktor 2,8 größer als der Wert nach PG Green IT.

Betrachtet man nun die Binnengliederung des jährlichen Gesamtstromverbrauches der einzelnen Berechnungsmodelle, so wird deutlich, dass dieser primär vom Aktiv/Leerlauf bestimmt wird. Im Berechnungsmodell nach PG Green IT nimmt der Leerlauf mit 45,5 kWh pro Jahr etwa 88% des Gesamtstromverbrauches ein. Noch höher liegen die Anteile bei den anderen Berechnungsmodellen wobei der Leerlauf bei ECMA 383 mit 140,2 kWh sogar 97% des Gesamtstromverbrauches beträgt (siehe Abbildung 3).

Die resultierenden Stromverbräuche der Betriebszustände „Ruhe“ und „Schein-Aus“ sind vergleichsweise gering, was in der heute bereits sehr niedrige Leistungsaufnahme von weit unter 3 Watt in diesen Stromsparszuständen begründet liegt. Betrachtet man beispielsweise das Berechnungsmodell nach Energy Star v6 bei dem der Ruhezustand sogar 45% der Gesamtzeit pro Jahr ausmacht und den daraus resultierenden Stromverbrauch von 8,7 kWh pro Jahr, so entspricht dies gerade mal 8% des Jahresstromverbrauchs.

Abbildung 3: Vergleich prozentualer Anteile der jeweiligen Betriebszustände am Gesamtenergiebedarf eines PCs (Grafik: TU Berlin)



Zwischenfazit

Aus dem oben stehenden Vergleich können als Zwischenfazit folgende drei Aspekte für die weitere Untersuchung festgehalten werden:

- Die Unterscheidung von Arbeitstagen und Nichtarbeitstagen sowie die gewählte unmittelbare Tagesverteilung pro Jahr haben einen signifikanten Einfluss sowohl auf das Berechnungsmodell als auch auf den resultierenden Jahresstromverbrauch. Wird beispielsweise, wie beim Energy Star TEC, keine Unterscheidung von Arbeitstagen und Nichtarbeitstagen vorgenommen, so spiegelt dies ein Mischszenario von betrieblicher und privater Nutzung wieder, mit einer daraus resultierenden längeren Aktiv-/Leerlauf-Dauer im Jahresmittel.
- Aufgrund der heute im Marktdurchschnitt sehr niedrigen Leistungsaufnahme in den Niedrigenergiezuständen „Ruhe“ und „Schein-Aus“ ist der resultierende Stromverbrauch dieser Betriebszustände vergleichsweise gering. Umso mehr fällt die Aktiv- und Leerlaufphase energiebezogen ins Gewicht. Entsprechend zeitlich genau sollte daher die reale Nutzung im Berechnungsmodell abgebildet werden.
- Eine präzise Unterscheidung von Aktiv- und Leerlauf-Phasen erhöht aufgrund der unterschiedlichen durchschnittlichen Leistungsaufnahme beider Betriebszustände die Genauigkeit der Berechnung. Zu berücksichtigen ist aber in diesem Zusammenhang, dass es aktuell keinen allgemeingültigen Teststandard für die Bestimmung der durchschnittlichen Leistungsaufnahme im aktiven Zustand gibt.

In diesem Kapitel wurden existierende Berechnungsmodelle erläutert und miteinander verglichen. Hierzu wurden die unterschiedlichen Berechnungsmodelle mit Durchschnittswerten parametrisiert und die Jahresstromverbräuche ermittelt. Im weiteren Vorgehen werden diese Ergebnisse mit realen Messergebnissen aus dem Umweltbundesamt verglichen. Die anschließende Analyse zielt auf die Ableitung eines neuen Berechnungsmodells, welches den realen Verbrauch in deutschen Behörden abbilden kann.

3.2 Messung der Arbeitsplatzcomputer im Umweltbundesamt

3.2.1 Bereitgestellte Datensätze

Messdurchführung und Ergebnisse

Eine umfangreiche Messung der elektrischen Leistungsaufnahme von insgesamt 78 APCs bildet die ursprüngliche Datenbasis der vorliegenden Untersuchung. Diese Messkampagne wurde von der deZem GmbH vom 17.10.2012 bis 24.01.2013 im Umweltbundesamt durchgeführt. Im Detail umfasste die Messung 60 Desktop-PCs mit Monitoren sowie 18 Notebook-PCs.

Aufgrund vieler Messfehler in der Anfangsphase wurde in Abstimmung mit dem UBA und der deZem GmbH alle Messdaten vom 17.10.2012 bis 30.11.2012 verworfen. Somit werden für die Auswertung lediglich die Messungen vom 01.12.2012 bis 24.01.2013 herangezogen, da bei diesen die anfangs aufgetretenen Fehler behoben wurden.

Nach dieser grundsätzlichen Reduktion des Datensatzes wurden die verbleibenden Messergebnisse genauer geprüft. Hierbei zeigten sich weitere Fehler sowohl bei den Desktop-PCs als auch bei den Notebook-PCs. Fehlerhafte Messungen, die zum Ausschluss eines APCs führten, beinhalteten beispielsweise:

- Vergleichsweise hohe Lastspitzen von über 800W, welche darauf zurückzuführen waren, dass bei dieser Messung nicht nur der APC sondern auch Drucker oder Kopierer erfasst wurden.
- Dauerhafter Verbleib eines APC im Leerlauf-Zustand. Das Gerät wurde also scheinbar weder nachts noch an Wochenenden abgeschaltet, was bei der im UBA üblichen zentralen gesteuerten Netztrennung nicht verständlich ist.
- Messreihen mit vielen Null-Werten sowohl bei Desktop-PCs als auch bei Monitoren. Dieser Umstand deutete auf Übertragungsfehler bei der drahtlosen Datenübertragung hin.
- Wurde beispielsweise ein Notebook nicht ordnungsgemäß heruntergefahren oder im laufenden Betrieb aus der Dockingstation herausgenommen, verweilte die Messung beim letzten gemessenen Wert der Leistungsaufnahme, bis das Gerät wieder ordnungsgemäß am System angemeldet wurde. Dadurch wurde ein Verbrauch gemessen, obwohl das Gerät vom Stromnetz entkoppelt war.
- Ein weiteres Problem bei der Erfassung des Energiebedarfs von Notebooks stellt die mobile Nutzung dar. Da die Messtechnik stationär, also ortsgebunden, angebracht war, konnte die Leistungsaufnahme während der mobilen Nutzung oder am Heimarbeitsplatz nicht erfasst werden.

Vor diesem Hintergrund wurden in Abstimmung mit dem UBA die Anzahl der verwendbaren Datensätze nochmals reduziert. Vor den ursprünglich 78 APCs werden in der vorliegenden

Auswertung lediglich 41 Desktop-PCs und 37 Monitore berücksichtigt. Des Weiteren wurde beschlossen, aufgrund der oben genannten Aspekte auf eine Auswertung der 18 Notebooks gänzlich zu verzichten. Nichtsdestotrotz werden in den folgenden Ausführungen vereinzelt auf die Notebooks bezuggenommen.

Technische Daten und Voreinstellung der APCs

Die Modellpalette der im Umweltbundesamt zu Einsatz kommenden Desktop-PCs, Monitore und Notebook-PCs beschränken sich auf wenige Produkte. An dieser Stelle werden einige technische Leistungsdaten sowie Besonderheiten der Konfiguration und Betriebseinstellung erläutert.

Tabelle 16: Modellpalette der im UBA verwendeten APCs

Anzahl	Geräteart	Modell
41	Desktop-PC	Fujitsu ESPRIMO E7936 (Intel® Core™2 Duo E8600)
31	LCD-Monitor (22 Zoll)	Fujitsu P22 W-5 ECO (IPS Display)
6	LCD-Monitor (24 Zoll)	Fujitsu P24 W-5 ECO (IPS Display)
16	Notebook-PC (14 Zoll)	Fujitsu Lifebook S710
1	Notebook-PC	Fujitsu Lifebook S782
1	Notebook-PC	Fujitsu Lifebook E780

Die im UBA verwendeten APC sind sehr energiesparend. Sie erfüllen die Kriterien des Blauen Engels für Computer und Monitore⁵³. Die Desktop-PCs sind darüber hinaus mit Null-Watt-Netzteilen ausgestattet. Die Monitore verfügen über einen Eco-Mode der die Rückbeleuchtung entsprechend der Umgebungshelligkeit regelt. Eine Besonderheit im UBA sind die voreingestellten Energieeinstellungen und die zentrale Nachsteuerung. Folgende Einstellungen sind zentral für alle APC vorgeben:

- Monitor aus nach 10 Min. ohne Input
- Festplatte ausschalten nach 15 Min.
- Ruhe-Zustand nach 75 Min.
- Schein-Aus-Zustand nach 90 Min.
- Alle Desktop-PCs werden von 18:00 bis 08:00 Uhr zentral gesteuert in einen Betriebsmodus versetzt, bei dem die PCs keinen Strom verbrauchen (Netztrennung).

Die Wahl dieser Einstellungen hat einen deutlichen Einfluss auf den resultierenden Stromverbrauch der Geräte. Wie im Weiteren noch zu sehen ist, wirken sich die zentrale Netztrennung in der Nachtperiode sehr positiv und die lange Verzögerung des Übergangs in den Ruhezustand (75 Min.) eher negativ auf den Gesamtstromverbrauch aus. Es ist abschließend festzustellen, dass diese Konfiguration der Geräte recht speziell ist und nicht zwingend vergleichbar mit anderen Behörden.

⁵³ Siehe www.blauer-engel.de; RAL-UZ 78a Computer (Ausgabe November 2014) und RAL-UZ 78c Computerbildschirme (Ausgabe 2014)

Die Datenblattangaben für die Leistungsaufnahme des Desktop-PCs und des 22-Zoll-Monitors in den einzelnen Betriebszuständen sind in Tabelle 17 aufgelistet. Für die Notebooks sind lediglich Angaben zur Batteriekapazität unterschiedlicher Modelle verfügbar.

Tabelle 17: Angaben zur Leistungsaufnahme laut Datenblatt

Betriebszustand	Leistungsaufnahme Desktop PC	Leistungsaufnahme Notebook PC	Leistungsaufnahme 22-Zoll-Monitor
Maximallast	79,0W	45,2 W	80,0 W
Aktivzustand	Keine Angaben vorhanden	Keine Angaben vorhanden	47,0W (EPA-Einstellung / Eco-Mode)
Leerlaufzustand	35,0W	9,65 W	0 W
Ruhezustand	1,9 W	1,84 W	0 W
Schein-Aus-Zustand	1,6 W	0,85 W	0 W

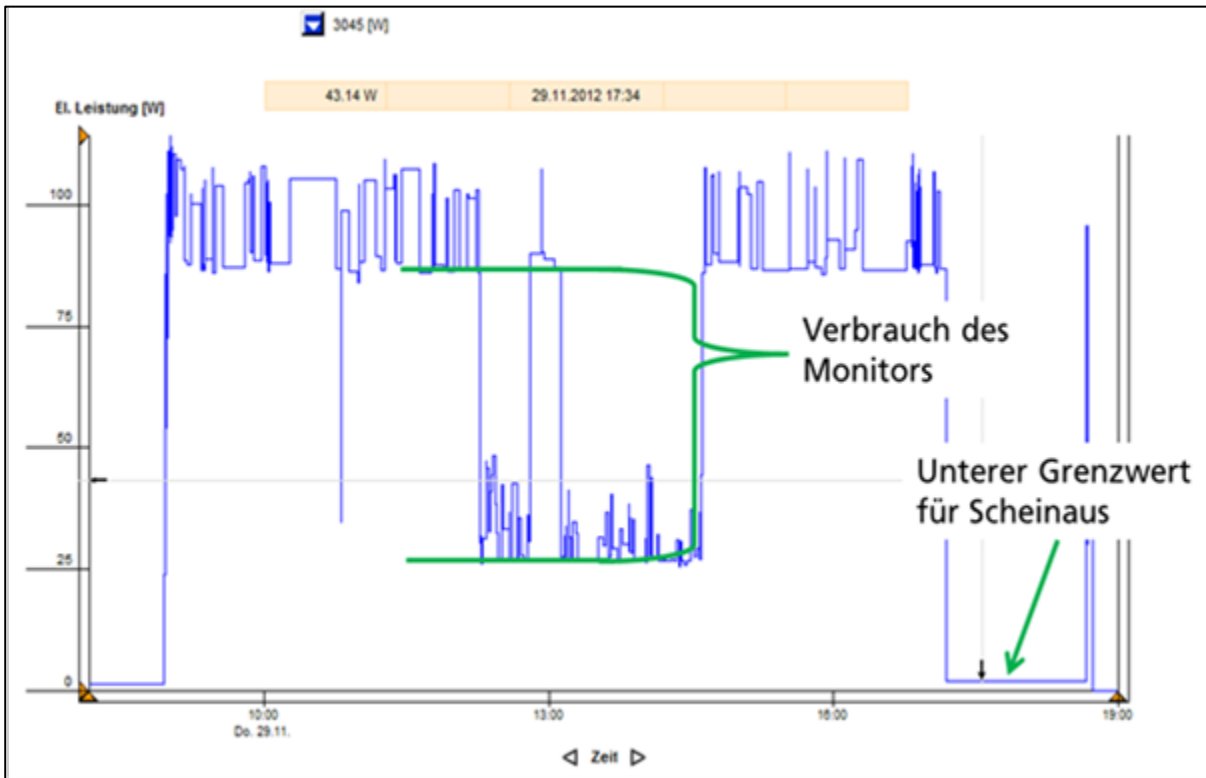
Differenzierung von Geräten und Betriebszuständen

Eine Besonderheit der von deZem bereitgestellten Datensätze besteht darin, dass die Messungen den Gesamtverbrauch eines APCs, d.h. Desktop-PC und Monitor, in Summe erfassen. In Auswertung der Messdaten und für die Ableitung der Berechnungsmodelle werden zunächst der Verbrauch des Monitors und des Desktop-PCs einzeln bestimmt.

Im methodischen Vorgehen musste hierzu anhand des Lastprofils das Zu- und Abschalten des einzelnen Monitors identifiziert werden. Da die Leistungsaufnahme des Monitors laut Datenblatt etwa 47 Watt entspricht (Abweichungen ergeben sich beispielsweise durch Deaktivierung des Eco-Modes) ist dieser Lastwechsel im Tagesprofil meist deutlich identifizierbar und konnte in den von deZem gelieferten Messdaten abgelesen werden.

In der nachstehenden Abbildung 4 ist diese deutliche Verringerung der Leistungsaufnahme im Zeitraum von etwa 12:00 Uhr bis kurz vor 13:00 Uhr und von kurz nach 13:00 Uhr bis etwa 14:30 Uhr gut zu erkennen. Die grünen Linien zeigen das jeweils niedrigste Niveau der Leistungsaufnahme pro Betriebszustand. Zudem sind die Schein-Aus-, Leerlauf- und aktiven Lastphasen des Desktop-PCs vom zentralen Einschalten um 08:00 Uhr, der Aktivierung um etwa 09:00 Uhr, der schon benannten Leerlaufphase zur Mittagszeit bis zum Runterfahren in den Schein-Aus-Zustand gegen 17:30 Uhr und schließlich das zentrale Ausschalten (Netztrennung) um 18:00 Uhr sehr deutlich zu erkennen.

Abbildung 4: Typisches Tagesprofil eines APC mit Unterscheidung einzelner Betriebszustände (Graphik: DeZem, bearbeitet von TU Berlin)



Unterscheidung von Arbeitstagen und Nichtarbeitstagen

Neben Sonn- und Feiertagen, die anhand des Datums bestimmt werden konnten, wurden die Messergebnisse in Arbeits- und Nicht-Arbeitstage unterteilt. In Abstimmung mit dem UBA wurde ein Tag als Nicht-Arbeitstag eingestuft, wenn der Desktop PC weniger als eine Stunde am Tag in einem Leerlauf-/ Aktivzustand lief, also der Schwellwert Leerlauf/Aktiv für weniger als eine Stunde erreicht oder überschritten wurde.

Hinsichtlich der genauen Verteilung von Arbeitstagen und Nichtarbeitstagen pro Jahr konnten die Messergebnisse keine statistisch belastbaren Aussagen beisteuern, da der real gemessene Zeitraum weniger als zwei Monate betrug.

3.2.2 Durchschnittliche Leistungsaufnahme und Nutzungsdauer

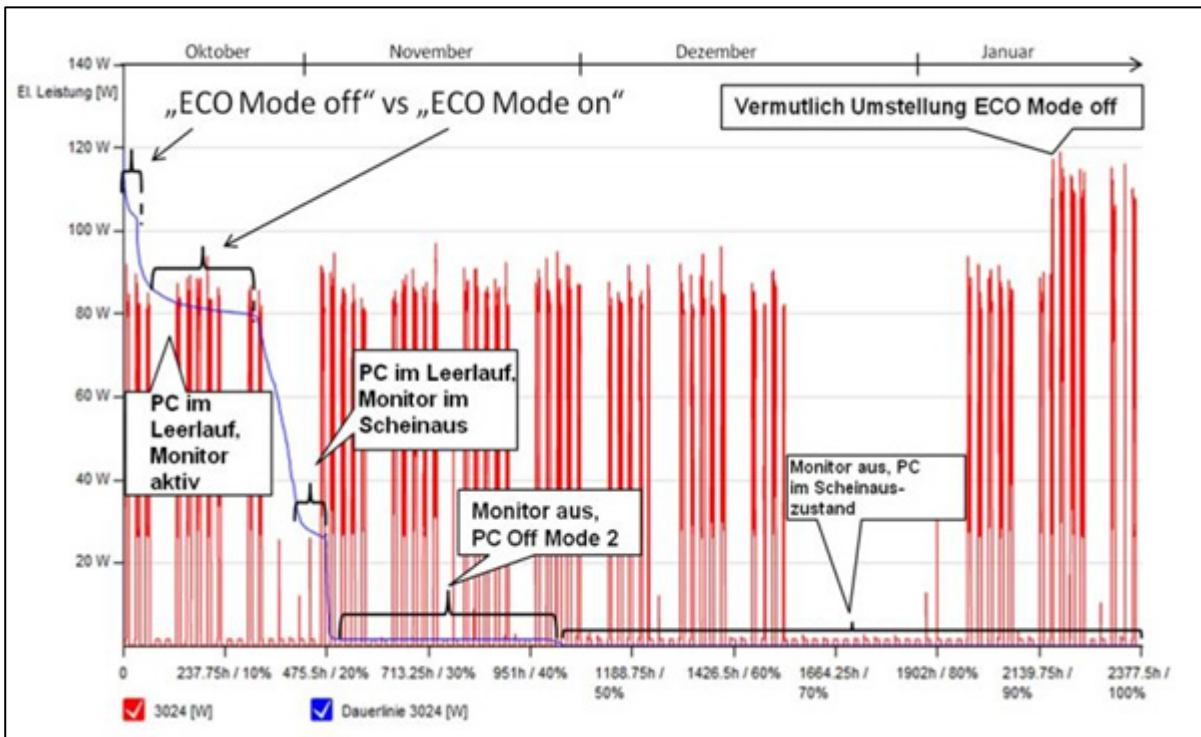
Analyse der Messergebnisse für die Monitore

Der Zeitpunkt des Zu- und Abschaltens als auch die Leistungsaufnahme des individuellen Monitors wurde entsprechend des jeweils niedrigsten Wertes der Leistungsaufnahme für jeden APC sowohl im Aktivzustand als auch im Leerlaufzustand einzeln erfasst. Im darauf folgenden Schritt wurden die Durchschnittswerte für die Dauer des Aktivzustandes in Stunden pro Arbeitstag und die durchschnittliche Leistungsaufnahme über alle 37 Monitore berechnet.

Laut der vorliegenden Messergebnisse betrug die durchschnittliche Leistungsaufnahme des Monitors in Aktivzustand 53,7 Watt. Die Standardabweichung war mit 14,2 Watt, insbesondere im Vergleich zur Herstellerangabe, von 47 Watt im Eco-Mode recht groß, was aber auf ein offensichtliches Abschalten der Eco-Mode-Einstellung bei insgesamt 11 Monitoren zurück-

zuführen ist. Es kann festgestellt werden, dass die Aktivierung des Eco-Mode einen teilweise deutlichen Einfluss auf den Energieverbrauch in der täglichen Nutzung hat (vgl. Abbildung 5). Einen weiteren Einfluss auf die Leistungsaufnahme des Monitors hat die eingestellte Helligkeitsautomatik des Monitors, welche bei starkem Umgebungslicht die Helligkeit nach oben nachsteuert bzw. bei dunklerem Umgebungslicht die Rückbeleuchtung runterregelt. Stichproben ergaben eine darauf bezogene Schwankung der Leistungsaufnahme von 2 bis 6 Watt.

Abbildung 5: Auswirkungen des ECO-Mode für die Leistungsaufnahme des Monitors (DeZem. 2013)



Bezüglich der zeitlichen Dauer der Aktivphase des Monitors pro Arbeitstag betrug der Durchschnittswert genau 5,2 Stunden mit einer Standardabweichung von 1,3 Stunden. Diese Dauer reflektiert die reale Nutzung des APCs und wird daher als ein wesentlicher Anhaltspunkt für die Definition eines neuen Berechnungsmodells verwendet.

Analyse der Messergebnisse für die Desktop-PCs

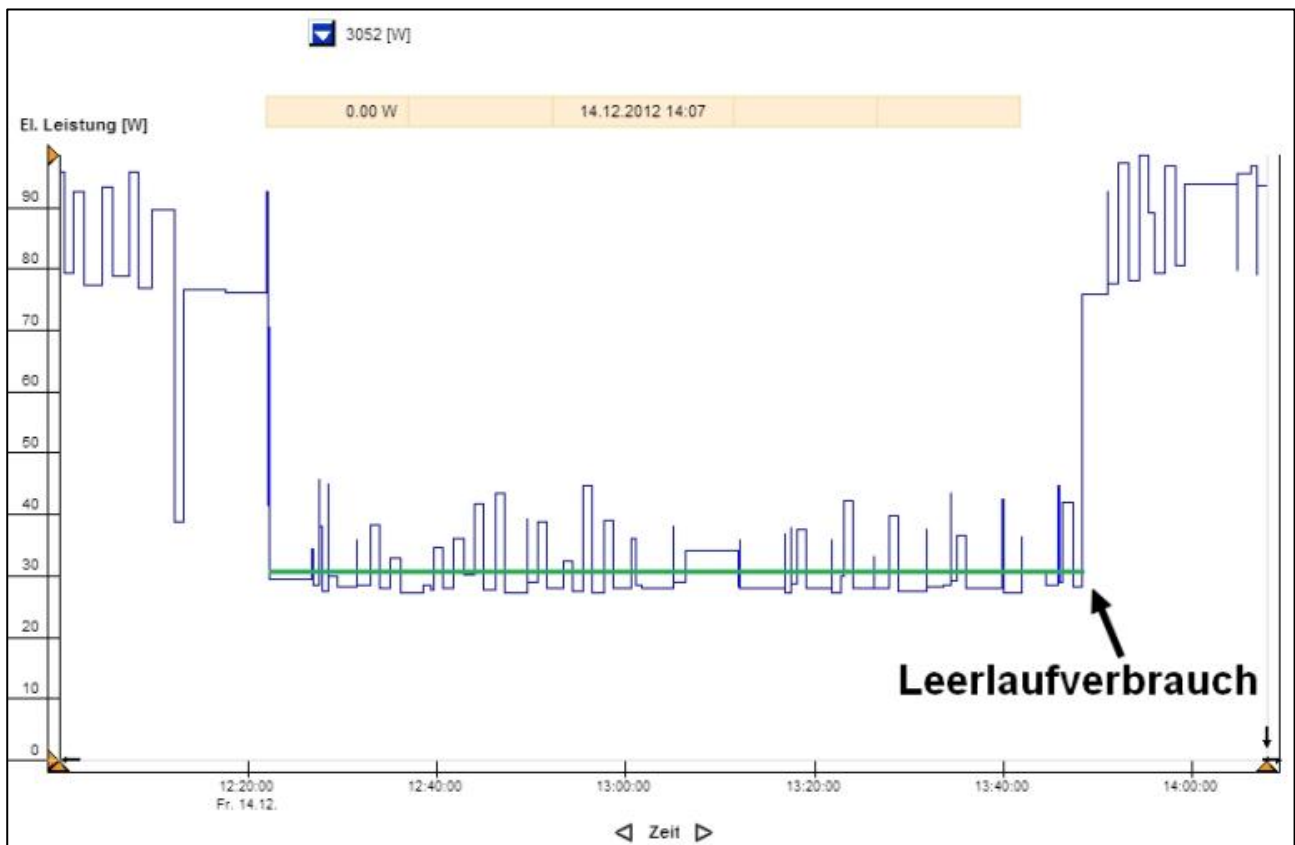
Die Messungen im UBA verifizierten, dass die Netztrennung der Desktop-PCs im Zeitraum von 18:00 Uhr bis 08:00 Uhr am nächsten Tag stattfindet. In diesem Zeitfenster von 14 Stunden pro Arbeitstag nimmt der Computer keine Leistung auf (0 Watt). Da allerdings einige Nutzer ab und zu doch länger arbeiteten oder früher zur Arbeit erschienen, war der gemessene Durchschnittswert für den Netzgetrennt-Zustand 11,7 Stunden pro Arbeitstag.

Aufgrund der sehr ähnlichen Werte für die Leistungsaufnahmen in den Betriebszuständen „Ruhe“ und „Schein-Aus“ konnten diese in der Messdaten nicht eindeutig voneinander abgegrenzt werden. Daher wurden zunächst in einem pragmatischen Ansatz alle Messwerte ≤ 4 W unter dem Begriff „Niedrigenergiezustand“ zusammengefasst, da sie potentiell entweder den Ruhezustand oder den Schein-Aus-Zustand repräsentieren. Mit Hilfe einer Häufigkeitsverteilung wurde ein durchschnittlicher „Niedrigenergiezustand“ von 1,9 Watt für die Desktop-PCs ermittelt. Dieser Wert entspricht dem Wert des Ruhe-Zustands laut Datenblatt des Herstellers. Bezüg-

lich der zeitlichen Dauer dieses zusammengefassten Niedrigenergiezustandes betrug der durchschnittliche Wert 4,9 Stunden pro Arbeitstag. Die Standardabweichung war mit 5,1 Stunden sehr groß und ist der schwierigen Unterscheidung von Ruhe-Zustand und Schein-Ausgeschuldet.

Für die Ermittlung der durchschnittlichen Leistungsaufnahme der Desktop-PCs im Leerlaufzustand wurden pro Datensatz mehrere Zeiträume an verschiedenen Arbeitstagen von etwa 30 bis 90 Minuten nach einem eindeutigen Abschalten des Monitors analysiert. Typischerweise konnte die Mittagspause als geeigneter Zeitraum herangezogen werden. Dieser Zeitraum lässt sich aufgrund des deutlichen Abfalls der Leistungsaufnahme (bedingt durch das Abschalten des Monitors) eindeutig identifizieren. In Abbildung 6 ist erkennbar, dass sich die Leistungsaufnahme im Leerlaufzustand bei diesem spezifischen APC in einem Bereich von etwa 25 Watt bis maximal 45 Watt bewegt.

Abbildung 6: Festlegung des Leerlauf-Schwellenwertes (Graphik: DeZem, bearbeitet durch TU Berlin)



Hinsichtlich der 41 erfassten Desktop-PCs betrug die durchschnittliche Leistungsaufnahme im Leerlauf 29,7 Watt. Dieser Wert liegt deutlich unter dem Wert des vom Hersteller im Datenblatt angegeben Wertes von 35 Watt. Der Unterschied lässt sich aber auf die recht minimal konfigurierte Komponentenausstattung des im UBA eingesetzten Desktop-PCs zurückführen. Die Dauer des Leerlauf-Zustandes betrug im Durchschnitt 3,8 Stunden pro Arbeitstag mit einer Standardabweichung von 1,3 Stunden.

Zur Bestimmung des durchschnittlichen Verbrauchs im Aktivzustand wurde angenommen, dass Messwerte oberhalb des Leerlauf-Wertes eine aktive Nutzung darstellen. Die über alle 41 Desktop-PCs gemessene, durchschnittliche Leistungsaufnahme im Aktiv-Zustand betrug

37,7 Watt. Die Dauer betrug 3,6 Stunden pro Arbeitstag mit einer Standardabweichung von 1,4 Stunden. Diese Standardabweichung vermittelt indirekt eine Größenordnung für eine intensivere (längere) bzw. geringere (kürzere) Nutzung pro Arbeitstag.

3.2.3 Zusammenfassung der Messwerte

Die Auswertung der Messergebnisse hatte das primäre Ziel, die durchschnittliche Dauer und Leistungsaufnahme der Monitore und Desktop-PCs zu ermitteln. Insbesondere die genaue Dauer der einzelnen Betriebszustände ist von Interesse für den Vergleich mit existierenden Berechnungsmodellen bzw. die Erstellung eines neuen Modells. Tabelle 18 zeigt im Überblick die ermittelten Werte für Arbeitstage. Während der Nichtarbeitstage bestand an Sonn- und Feiertagen eine durchgängige Netztrennung bzw. im Zeitraum von 08:00 Uhr bis 18:00 Uhr ein Betrieb im Schein-Aus-Zustand.

Tabelle 18: Durchschnittliche Leistungsaufnahme und Nutzungsdauer pro Arbeitstag

Betriebszustand (Ø)	Leistungsaufnahme laut Messergebnis	Dauer pro Arbeitstag	Standardabweichung der Dauer in Stunden
Desktop-PC (Aktiv)	37,7 W	3,6 h	1,4 h
Desktop-PC (Leerlauf)	29,7 W	3,8 h	1,3 h
PC (Ruhe/Schein-Aus)	1,9 W	4,9 h	5,1 h
PC (Netzgetrennt)	0 W	11,7 h	3,9 h
Monitore (Aktiv)	53,7 W	5,2 h	1,3 h

Die Dauer der aktiven Nutzung (APC in Aktiv oder Leerlauf) wird anhand der Nutzung des Monitors gut ersichtlich. Im Durchschnitt war der Monitor an Arbeitstagen 5,2 Stunden angeschaltet, sodass man davon ausgehen kann dass der APC aktiv (z.B. Bearbeitung eines Dokumentes) oder passiv (z.B. Lesen eines Dokumentes) genutzt wurde. Die aktive Nutzung des Desktop-PCs konnte anhand der Leistungsaufnahme festgestellt werden und betrug im Durchschnitt lediglich 3,6 Stunden pro Arbeitstag. Berücksichtigt man die Standardabweichung als Indikator für eine durchschnittlich lange bzw. kurze Nutzung, so liegt die aktive Rechnernutzung bei 5,0 Stunden bzw. 2,2 Stunden. Diese Werte erscheinen im Tagesdurchschnitt zunächst eher klein. Die Gesamtdauer im Leerlauf-Zustand und Aktiv-Zustand wurde mit durchschnittlich 7,4 Stunden gemessen. Im Vergleich mit den 5,2 Stunden des Monitors ergibt sich zunächst ein Unterschied von 2,2 Stunden. Die längere Leerlaufphase des Desktop-PCs erklärt sich prinzipiell aus der Voreinstellung der Desktop-PCs im UBA, welche gewöhnlich erst nach 90 Minuten in den Ruhe-Zustand wechseln. Bleibt festzuhalten, dass die aktive Nutzungsphase des APC im UBA durchschnittlich zwischen 3,6 Stunden (Desktop-PC aktiv) und 5,2 Stunden (Monitor aktiv) beträgt und damit die Leerlaufphase des Desktop-PCs theoretisch um etwa 2 Stunden durch eine andere Voreinstellung (Power Management) reduziert werden könnte.

Die Leistungsaufnahme in Aktiv und Leerlauf zeigte keine überraschenden Ergebnisse. Der Monitor lag aufgrund teilweise deaktivierter Eco-Mode-Einstellungen mit durchschnittlich 53,7 Watt leicht über der Angabe aus dem Datenblatt, welche das Gerät im Eco-Mode mit durchschnittlich 47 Watt ausweist. Dennoch wird deutlich, dass der Monitor im Gesamtsystem APC einen ebenso hohen Anteil am Stromverbrauch hat wie der Desktop-PC. Die durchschnittliche Leistungsaufnahme der 41 gemessenen Desktop-PCs lag im Aktiv- und Leerlauf-Zustand unter den Datenblattangaben (35 Watt Leerlauf) und variierte in den einzelnen Betriebszuständen nur

sehr leicht (Standardabweichung etwa 3 Watt). Die durchschnittliche Leistungsaufnahme im Aktiv-Zustand beträgt beim UBA-Desktop-PC 37,7 Watt und im Leerlauf-Zustand 29,7 Watt. Setzt man beide Werte ins Verhältnis so entspricht die durchschnittliche Leistungsaufnahme im Aktiv-Zustand einem Faktor 1,27 des Leerlaufwerts. Die aktive Phase kann man daher nicht prinzipiell mit dem Leerlauf gleichsetzen. Es besteht die begründete Annahme, dass die durchschnittliche Leistungsaufnahme im Aktiv-Zustand mit steigender Rechenleistung⁵⁴ im Verhältnis zum Leerlauf noch etwas höher ausfällt und daher eine generelle Unterscheidung von Aktiv- und Leerlauf-Zustand in einem Berechnungsmodell die Genauigkeit des Ergebnisses erhöht.

Der Ruhe-Zustand und Schein-Aus-Zustand ließen sich in den Messergebnissen nur schwer unterscheiden. Die gemessenen Werte entsprachen aber durchaus den Datenblattangaben von 1,9 Watt bzw. 1,6 Watt. Im Vergleich liegen diese Werte über dem heutigen Durchschnitt, insbesondere beim Schein-Aus-Zustand. Aktuelle Technologien erreichen einen Wert unter ein Watt. Vor diesem Hintergrund macht ein Runterfahren aus dem Ruhe-Zustand in den Schein-Aus-Zustand noch immer Sinn. Eine weitere Reduktion durch Netztrennung, wie sie im UBA praktiziert wird, spart bei neuester Technik nur noch geringste Mengen Energie und erzeugt eher negative Spannungsspitzen beim harten Einschalten. Beim APC im UBA spart die Netztrennung aufgrund der relativ hohen Leistungsaufnahme von 1,6 bis 1,9 Watt aber immer noch deutlich Strom ein. Bei durchschnittlich 14 Stunden Netztrennung entspricht dies circa 0,022 kWh pro Arbeitstag und an Nichtarbeitstagen mit durchgängiger Netztrennung sogar 0,038 kWh.

Der durchschnittlich über alle 41 Desktop-PCs im UBA gemessene Energiebedarf pro Arbeitstag betrug 0,237 kWh und pro Nichtarbeitstag 0,018 kWh. Der durchschnittlich gemessene Energiebedarf der 37 Monitore betrug 0,306 kWh pro Arbeitstag.

3.3 Ableitung eines neue Berechnungsmodells APC

3.3.1 Grundstruktur

Anforderungen an das Berechnungsmodell für Desktop-PC und Monitor

Die vorangestellten Untersuchungen haben einerseits mehrere Defizite existierender Berechnungsmodelle für die Abbildung der APC-Nutzung in deutschen Behörden aufgezeigt und andererseits Anhaltspunkte für Verbesserungen geliefert. Die Entwicklung eines neuen Berechnungsmodells hat zum Ziel, die reale, durchschnittliche Arbeitszeit am APC so präzise wie möglich zeitlich abzubilden und dabei das gesamte Spektrum von Betriebszuständen adäquat zu nutzen. In diesem Zusammenhang sollen Arbeitstage und Nichtarbeitstage klar unterschieden werden und das Verhältnis variabel anpassbar sein. Für ein realistisches Verhältnis soll eine Empfehlung gegeben werden. Des Weiteren soll das Berechnungsmodell sowohl mit gewöhnlichen Datenblattangaben als auch mit spezifischen Messwerten parametrisierbar sein. Die Bezugsgröße für das Berechnungsmodell ist die APC-Nutzung mit Standardsoftware im

⁵⁴ Zu berücksichtigen sind die Art der zentralen Prozessoreinheit (CPU), die Anzahl der Rechenkerne, Takt-Frequenz, Grafikprozessor, Speicherkapazität (RAM) und Netzteilauslegung.

Bürobetrieb über ein Kalenderjahr. Abschließend ist anzumerken, dass das Berechnungsmodell die Nutzung traditioneller APCs in Sinne eines stationären Desktop-PC mit einem oder mehreren Monitoren beschreibt.

Unterscheidung von Arbeitstagen und Nichtarbeitstagen

In der Untersuchung existierender Berechnungsmodelle wurde nur bei Fujitsu und PG Green-IT eine prinzipielle Unterscheidung von Arbeitstagen und Nichtarbeitstagen festgestellt (siehe Tabelle 19).

Tabelle 19: Verteilung von Arbeitstagen und Nichtarbeitstagen in existierenden Berechnungsmodellen

Berechnungsmodell	Arbeitstage	Nichtarbeitstage
Fujitsu	260	105
PG Green IT (Empfehlung des Fraunhofer ISI entsprechend von Untersuchungen im BMF)	203	162
PG Green IT (genutztes Berechnungsmodell)	220	145

Wie bereits ausgeführt wurde, war die ursprüngliche Empfehlung im Rahmen der PG Green-IT Handreichung sehr präzise und basierte auf statistischen Daten aus dem Bundesministerium für Finanzen (BMF). Herauszustellen ist hierbei, dass neben den Urlaubstagen auch 15,5 krankheits- und kurbedingte Fehltag berücksichtigt wurden (siehe Tabelle 13). Durch diesen Ansatz wird die Anzahl der relevanten Arbeitstage nochmals substantiell reduziert. Dass dieses Vorgehen gerechtfertigt ist, zeigen folgende Informationen.

Die Anzahl der Werktage (Montag bis einschließlich Samstag) variiert in Deutschland je nach Bundesland aufgrund unterschiedlicher Feiertagsregelungen zwischen typischerweise 300 und 304 Tagen pro Jahr. Würde man nun die 52 Samstage als Nichtarbeitstage noch abziehen, ergeben sich 248 bis 252 Büroarbeitstage. Subtrahiert man nun noch etwa 30 Urlaubstage, die in Deutschland typisch sind, so ergeben sich durchschnittlich 220 Arbeitstage. Da Ausfälle durch Krankmeldungen die reale Arbeitssituation konkretisieren, ist es zielführend, entsprechende Arbeitsausfalltage zu berücksichtigen. Eine im Auftrag des Bundesministeriums für Arbeit und Soziales (BMAS) in 2013 erstellte Studie kommt zu dem Ergebnis, dass in 2011 die statistische Anzahl von krankheitsbedingten Arbeitsfällen 11,3 Tage betrug und in 2012 auf 12,6 Tage anstieg.⁵⁵ Bei durchschnittlich 12 Krankentagen ergibt sich im Mittel eine Anzahl von 208 Arbeitstagen. Diese Beispielrechnung zeigt den Spielraum der Plausibilität der ursprünglichen Empfehlung der PG Green IT.

Für das Berechnungsmodell wird eine Unterscheidung von Arbeitstagen und Nichtarbeitstagen mit entsprechend unterschiedlichen Tagesprofilen (zeitliche Verteilung von Betriebszuständen) empfohlen. Die Parametrisierung, d.h. die genaue Angabe wie viele Arbeitstage und Nichtarbeitstage berücksichtigt werden, kann individuell vom Nutzer des Berechnungsmodells gewählt werden. Es wird allerdings für die Angabe der Arbeitstage empfohlen, eine durchschnittliche Anzahl von Urlaubs- und Krankheitstagen von der typischen Anzahl der Werktage

⁵⁵ Siehe: <http://www.dgfp.de/aktuelles/dgfp-news/aktuelle-studie-arbeitnehmer-durchschnittlich-rund-13-tage-krank-3998>

abzuziehen. In der vorliegenden Studie wird die Empfehlung der PG GreenIT aufgegriffen und das Berechnungsmodell mit 203 Arbeitstagen bzw. 162 Nichtarbeitstagen parametrisiert.

Zeitliche Verteilung der Betriebszustände

Die Grundlage für das zeitliche Tagesprofil eines Arbeitstages bildet die Messung im UBA. Es werden insgesamt vier Betriebszustände einschließlich Aktiv, Leerlauf, Ruhe und Schein-Aus berücksichtigt. Der Zustand „Netztrennung“ kann alternativ zum „Schein-Aus“ verwendet werden.

Für die Bestimmung der Aktivphase und Leerlaufphase wird zunächst die Gesamtdauer beider Betriebszustände aus der Messung des Monitors abgeleitet, da dieser das aktive und passive Arbeiten am APC abbildet. Der Grundgedanke dabei ist, dass der APC ungenutzt ist (und damit in den Ruhe-Zustand gehen kann), wenn der Bildschirm aus ist. Der Monitor war laut Messung durchschnittliche 5,2 Stunden pro Arbeitstag an. Dieser Wert bildet eine mittlere Nutzungsdauer ab. Für das Berechnungsmodell wird dieser Wert auf insgesamt 6 Stunden Aktiv/Leerlauf leicht aufrundet, da wir in der Praxis meist eine zeitlich leicht versetzte Energiespareinstellung vorfinden. In typischen Energiespareinstellungen eines Desktop-PCs wird der Monitor schneller in den Ruhezustand versetzt als der PC selbst. Eine typische Energiespareinstellung ist für den Monitor „Ausschalten nach 10 Minuten“ und für den Desktop-PC „Ruhezustand nach 20 Minuten“ im Leerlauf. Sicherlich gibt es aber auch noch konsequentere Einstellungen, aber in der Regel läuft der Desktop-PC etwas länger im Leerlauf als der Monitor.

Um nun neben der mittleren Nutzung auch eine hohe bzw. geringe Nutzungsintensität zeitlich zu bestimmen, nutzen wir die ermittelte Standardabweichung und die Messwerte. Diese betrug für die Monitornutzung 1,3 Stunden. Für das Berechnungsmodell wird dieser Wert ebenfalls wieder leicht aufgerundet. Die resultierende Gesamtzeit für die Aktiv- und Leerlaufphase beträgt dementsprechend:

- Hohe Nutzungsintensität: 7,5 h
- Mittlere Nutzungsintensität: 6,0 h
- Geringe Nutzungsintensität: 4,5 h

Für die Unterscheidung von Aktiv und Leerlauf wird auf die im UBA gemessene Dauer des Desktop-PCs im Aktivzustand zurückgegriffen. Dieser Wert beträgt über alle 41 APC gemittelt 3,6 Stunden mit einer Standardabweichung von 1,4 Stunden. Der gemessene durchschnittliche Aktivzustand ist die Basis für die Unterscheidung der Nutzungsintensität. Der Leerlaufzustand wird für die jeweilige Nutzungsintensität so gewählt, dass in Summe die oben beschriebenen Gesamtzeiten für die Aktiv- und Leerlaufphasen erreicht werden. Auf Basis dieser Messdaten und Annahmen wird folgendes Berechnungsmodell abgeleitet:⁵⁶

- Hohe Nutzungsintensität: 5,0 h (Aktiv) + 2,5 h (Leerlauf) = 7,5 h (Gesamt)
- Mittlere Nutzungsintensität: 3,5 h (Aktiv) + 2,5 h (Leerlauf) = 6,0 h (Gesamt)
- Geringe Nutzungsintensität: 2,0 h (Aktiv) + 2,5 h (Leerlauf) = 4,5 h (Gesamt)

⁵⁶ Die Zeiten wurden hierbei auf halbe Stunden gerundet.

Die verbleibende Zeit wird aus Ruhe und Schein-Aus (alternativ Netzgetrennt) definiert. Hierzu wird von einer grundsätzlichen Regelarbeitszeit zwischen 08:00 Uhr und 18:00 Uhr ausgegangen, in welcher der APC grundsätzlich nicht aktiv genutzt wird. In den verbleibenden 14 Stunden (gewöhnlich keine Anwesenheit von 18:00 Uhr bis 08:00 Uhr) wird der APC in den Schein-Aus oder Netzgetrennt versetzt. An Nichtarbeitstagen verbleibt der APC durchgängig im Schein-Aus bzw. alternativ im Netzgetrennt-Zustand.

Tabelle 20 zeigt die Dauer der einzelnen Betriebszustände an Arbeitstagen und Nichtarbeitstagen für den Desktop-PC im neuen Berechnungsmodell.

Tabelle 20: Neues Berechnungsmodell - Zeitliche Verteilung der Betriebszustände für den Desktop-PC

Desktop-PC	Arbeitstage				Nichtarbeitstage
	Aktiv	Leerlauf	Ruhe	Schein-Aus (Netzgetrennt)	Schein-Aus (Netzgetrennt)
Hohe Nutzung	5,0 h	2,5 h	2,5 h	14,0 h	24,0 h
Mittlere Nutzung	3,5 h	2,5 h	4,0 h	14,0 h	24,0 h
Geringe Nutzung	2,0 h	2,5 h	5,5 h	14,0 h	24,0 h

Tabelle 21 zeigt die Dauer der einzelnen Betriebszustände an Arbeitstagen und Nichtarbeitstagen für den Monitor im neuen Berechnungsmodell.

Tabelle 21: Neues Berechnungsmodell - Zeitliche Verteilung der Betriebszustände für den Monitor

Monitor	Arbeitstage				Nichtarbeitstage
	Aktiv	Leerlauf	Ruhe	Schein-Aus (Netzgetrennt)	Schein-Aus (Netzgetrennt)
Hohe Nutzung	7,0 h	0,5 h	2,5 h	14,0 h	24,0 h
Mittlere Nutzung	5,5 h	0,5 h	4,0 h	14,0 h	24,0 h
Geringe Nutzung	4,0 h	0,5 h	5,5 h	14,0 h	24,0 h

Die Aktiv-Phase des Monitors orientiert sich stärker an den real gemessenen Wert von 5,2 Stunden und der Standardabweichung von 1,4 Stunden und beinhaltet nur eine leichte Aufrundung. Zudem wird die oben dargestellte Praxis, dass der Monitor meist zeitlich etwas vor dem Desktop-PC in den Ruhezustand geht, hier ebenfalls reflektiert. Auch wird eine Leerlauf-Phase im zeitlichen Profil berücksichtigt, gleichwohl ein solcher Betriebszustand heute kaum existiert. Der Grund hierfür liegt in dem Gedanken, dass mit fortschreitender Technologieentwicklung einerseits bei den Desktop-PCs (z.B. variabel getaktete CPU-Kerne und nicht-flüchtige Speicher für große Datenmengen) die Leerlauf-Phase weiter verkürzt wird und sich der realen Monitor-nutzung stärker anpasst. Gleichzeitig werden auch stationäre Monitore, ähnlich wie bei Notebooks, vermehrt Dimm-Technologien implementieren. Dies ist gerade bei Arbeitsplätzen mit mehreren Monitoren ein plausibles Szenario.

3.3.2 Parametrisierung

Leistungsaufnahme der Betriebszustände

Die Parametrisierung des neuen Berechnungsmodells mit Werten für die Leistungsaufnahme pro Betriebszustand kann auf Basis von eigens erhobenen Messdaten oder Datenblattangaben erfolgen.

Bei der Parametrisierung des Modells mit Datenblattangaben ergibt sich eine Besonderheit. Da in den meisten Fällen im Produktdatenblatt von Desktop-PCs keine Angabe über die durchschnittliche Leistungsaufnahme im Aktiv-Zustand vorliegt, wird vorgeschlagen, diesen Wert nach der gleichen Methode zu berechnen, die Fujitsu angewandt hat. Diese Berechnungsformel lautet:

$$\text{Leistungsaufnahme P (Aktiv)} = 0.1 \cdot P(\text{Max}) + 0.9 \cdot P(\text{Leerlauf}) = P(\text{Aktiv})$$

Basierend auf den Datenblattangaben des im UBA verwendeten Desktop-PCs ergibt sich folgende Berechnung:

$$\text{Leistungsaufnahme P (Aktiv)} = 0.1 \cdot 79,0\text{W} + 0.9 \cdot 35,0\text{W} = 39,4\text{W}$$

Zum Vergleich, der im UBA gemessene Durchschnittswert für die Leistungsaufnahme (Aktiv) beträgt 37,7 Watt. Dieser Wert entspricht zwar nicht genau dem aus den Datenblattangaben ermittelten Wert von 39,4 Watt, erscheint aber doch hinreichend genau zu sein, wenn man bedenkt, dass der UBA-Desktop-PC etwas weniger leistungsstark ausgestattet ist und im Leerlauf durchschnittlich etwa 5,0 Watt weniger Leistung aufnimmt.

Parametrisierung und Vergleich des neuen Berechnungsmodells mit UBA-Messdaten

Um nun die Plausibilität des neuen Berechnungsmodells zu demonstrieren, parametrisieren wir das Modell zunächst mit den gemessenen Durchschnittswerten für die Leistungsaufnahme in den einzelnen Betriebszuständen (vgl. Tabelle 18). Tabelle 22 beinhaltet die entsprechenden Werte und resultierenden Stromverbräuche pro Betriebszustand für den Desktop-PC. Es wurde mit 203 Arbeitstagen und 162 Nichtarbeitstage sowie ohne Netztrennung gerechnet.

Tabelle 22: Berechnungsmodell für Desktop-PC parametrisiert mit Daten aus der UBA-Messung

Desktop-PC mittlere Nutzung	Arbeitstage (203 Tage)				Nichtarbeitstage (162 Tage)
	Aktiv	Leerlauf	Ruhe	Schein-Aus	Schein-Aus
Leistungsaufnahme	37,7 W	29,7 W	1,9 W	1,6 W	1,6W
Dauer pro Tag	3,5 h	2,5 h	4,0 h	14,0 h	24,0 h
Jahresstrombedarf	26,8 kWh	15,1 kWh	1,5 kWh	4,5 kWh	6,2 kWh

Im Gesamtergebnis ergibt sich auf Basis dieses Berechnungsmodells für den Desktop-PC ein jährlicher elektrischer Stromverbrauch von 54,2 kWh. Würde man annehmen, dass wie im UBA praktiziert, an Arbeitstagen von 18:00 Uhr bis 08:00 Uhr eine Netztrennung besteht und diese Netztrennung auch an Nichtarbeitstagen über 14 Stunden, würde sich der Wert auf 46,0 kWh reduzieren.

Zum Vergleich werden die real gemessenen, durchschnittlichen Stromverbräuche des Desktop-PCs aus der UBA-Messung herangezogen (vgl. Kapitel 3.2.3). Der durchschnittlich über alle 41 Desktop-PCs im UBA gemessene Energiebedarf pro Arbeitstag betrug 0,237 kWh und pro Nichtarbeitstag 0,018 kWh. Berechnet man auf dieser Basis und mittels der gleichen Anzahl von Arbeitstagen (203) und Nichtarbeitstagen (162) den jährlichen Stromverbrauch, so ergibt sich ein Wert von genau 51,0 kWh.

Dieser Vergleich zeigt eine relativ gute Übereinstimmung des auf Basis von Tagesmesswerten hochgerechneten Jahresstromverbrauchs (51,0 kWh) und der Berechnung mit dem neuen Modell 46,0 kWh. Die Leerlauf-Phase könnte zu Ungunsten der Ruhe-Phase sogar etwas länger sein, um eine noch bessere Übereinstimmung mit dem gemessenen Wert zu erreichen. Unter der Annahme, dass im mittleren Szenario die Leerlaufphase 3,5 Stunden und die Ruhe-Phase lediglich 3,0 Stunden beträgt und alle anderen Annahmen, einschließlich der Netztrennung, beibehalten werden, dann ergäbe sich eine fast perfekte Übereinstimmung mit 51,6 kWh pro Jahr. Diese Vergleichsrechnung belegt die Tatsache, dass im UBA die Leerphase-Phase des Desktop-PCs aufgrund der Voreinstellungen deutlich länger ausfällt und zu einem etwas höheren Stromverbrauch führt.

In der gleichen Weise werden die UBA-Messergebnisse mit dem Berechnungsmodell des Monitors verglichen. Der durchschnittlich gemessene Energiebedarf der 37 Monitore betrug 0,306 kWh pro Arbeitstag. Dieser Wert ergibt bei 203 Arbeitstagen einen elektrischen Stromverbrauch von 62,1 kWh pro Jahr, da an Nichtarbeitstagen die Leistungsaufnahme durchgängig 0 Watt beträgt. Im Berechnungsmodell für eine mittlere Nutzungsintensität wird für die Aktiv-Phase eine Gesamtzahl von 5,5 Stunden pro Arbeitstag angenommen. Die durchschnittlich gemessene Leistungsaufnahme ist 53,7 Watt. Zum Vergleich, Fujitsu gibt laut Datenblatt eine Leistungsaufnahme von 47 Watt für die Nutzung an. Da der im UBA verwendete Monitor weder über einen spezifischen Stromverbrauch im Leerlauf noch im Ruhezustand oder Schein-Aus verfügt, wird an dieser Stelle keine Leistungsaufnahme angenommen. Der aus diesem Berechnungsmodell resultierende Jahresstromverbrauch beträgt 59,9 kWh.

Der Vergleich zwischen dem auf Basis von gemessenen Tagesstromverbräuchen hochgerechneten Jahresstromverbrauch von 62,1 kWh mit dem Wert von 59,9 kWh aus dem Berechnungsmodell zeigt eine gute Übereinstimmung. Würde man alternativ annehmen, dass der Monitor eben solange „An“ ist wie der Desktop-PC im Aktiv- und Leerlauf-Zustand zusammengenommen (6 Stunden), dann würde sich der errechnete Jahresstromverbrauch auf 65,4 kWh erhöhen. Eine absolut präzise Übereinstimmung mit dem Messergebnis zeigt sich bei der Annahme, dass die aktive Phase des Monitors 5,7 Stunden beträgt. Dann wird der identische Stromverbrauch von 62,1 kWh pro Jahr erzielt.

Parametrisierung und Vergleich des Berechnungsmodells mit Datenblattwerten

In einem zweiten Schritt wird das neue Berechnungsmodell auf Basis der Datenblattwerte (vgl. Tabelle 23) parametrisiert und mit den existierenden, ebenfalls mit den gleichen Datenblattwerten parametrisierten Berechnungsmodellen, verglichen.

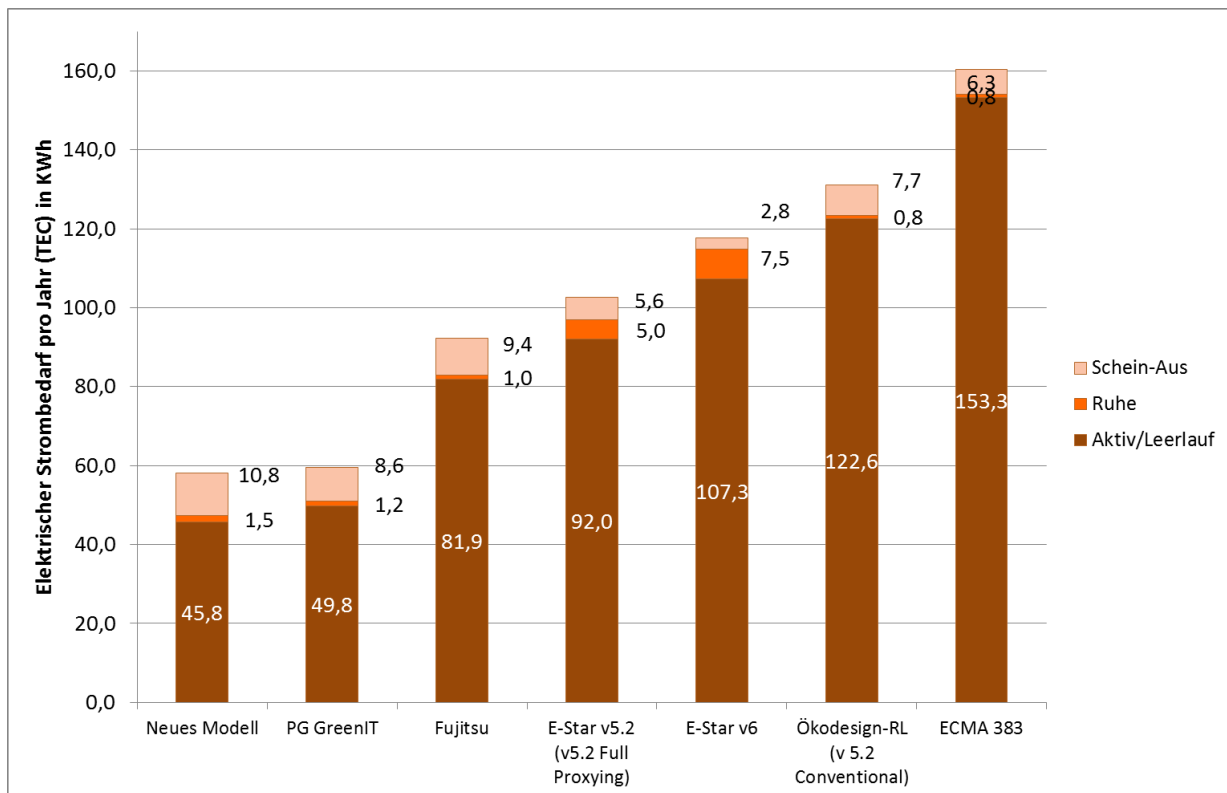
Tabelle 23: Berechnungsmodell für Desktop-PC mit mittlerer Nutzung parametrisiert mit Datenblattangaben

Desktop-PC mittlere Nutzung	Arbeitstage (203 Tage)				Nichtarbeitstage (162 Tage)
	Aktiv _{berechnet}	Leerlauf	Ruhe	Schein-Aus	Schein-Aus
Leistungsaufnahme	39,4 W	35,0 W	1,9 W	1,6 W	1,6W
Dauer pro Tag	3,5 h	2,5 h	4,0 h	14,0 h	24,0 h
Jahresstrombedarf	28,0 kWh	17,8 kWh	1,5 kWh	4,5 kWh	6,2 kWh

Im Gegensatz zur vorangestellten Parametrisierung mit den UBA-Messdaten steigt bei diesem Vorgehen der resultierende Jahresstromverbrauch des Desktop-PCs von 54,2 kWh pro Jahr auf insgesamt 58,1 kWh pro Jahr an. Dies ist auf die höhere Leistungsaufnahme im Aktiv und im Leerlaufzustand zurückzuführen.

Der jährliche Stromverbrauch des Monitors ergibt sich aus einer Leistungsaufnahme laut Datenblatt von 47 Watt und eine Aktiv-/Leerlauf-Dauer von 5,5 Stunden pro Arbeitstage für 203 Tage pro Jahr. Der resultierende elektrische Stromverbrauch beträgt 52,5 kWh.

Abbildung 7: Jahresstromverbrauch auf Basis von mit Datenblattangaben parametrisierten Berechnungsmodellen



Im direkten Vergleich mit den anderen Berechnungsmodellen (siehe Abbildung 7) fällt die sehr gute Übereinstimmung mit der Berechnung nach PG Green-IT auf, gleichwohl die Binnenstruktur, d.h. der resultierende Stromverbrauch der Aktiv-/Leerlauf-Phase, nicht identisch ist. PG Green-IT geht von einer etwas längeren Aktiv-/Leerlauf-Phase von 7,0 Stunden aus, unterscheidet aber nicht direkt zwischen Aktiv und Leerlauf wie es im neuen Berechnungsmodell praktiziert wird. Im Vergleich zu den anderen Berechnungsmodellen fällt die hohe Dauer der Leerlaufphase deutlich ins Gewicht. Im Berechnungsmodell würde selbst bei einer hohen

Nutzungsintensität von 5,0 Stunden Aktiv pro Arbeitstag nur ein Jahresstromverbrauch von 69,5 kWh sich berechnen (vgl. Tabelle 24).

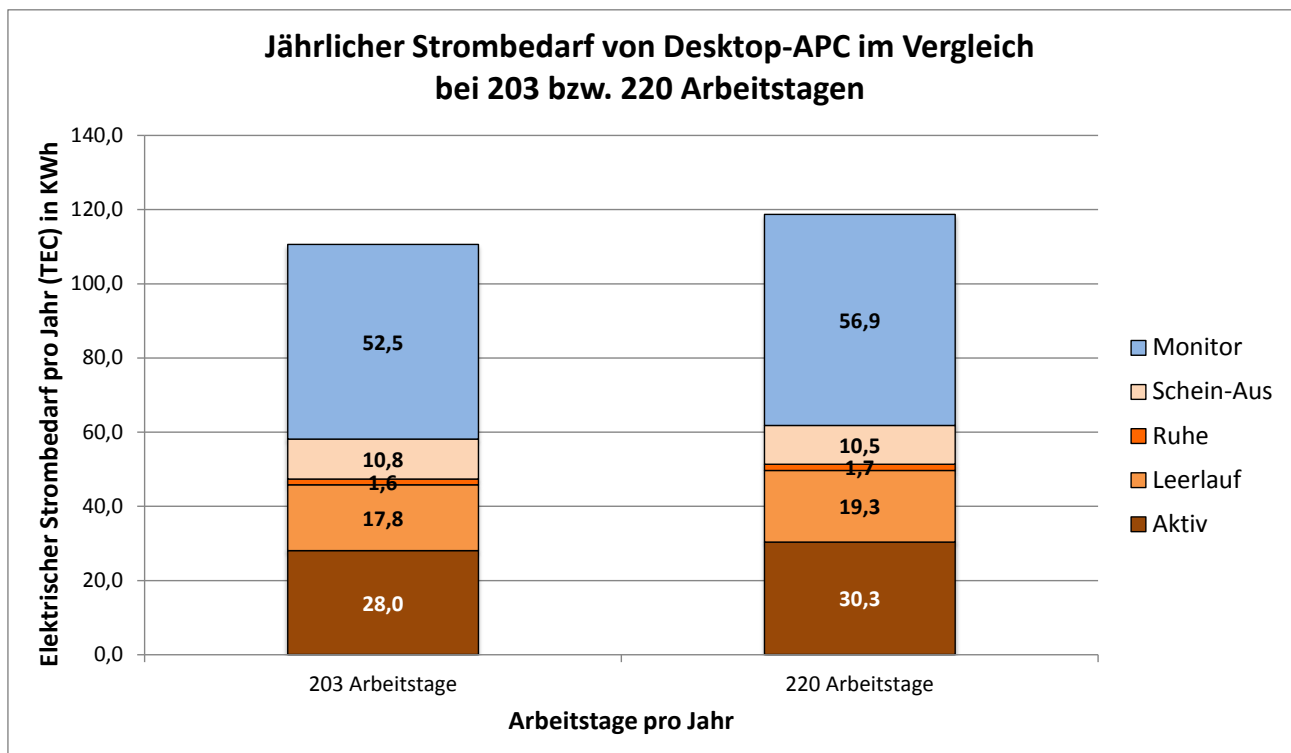
Tabelle 24: Berechnungsmodell für Desktop-PC mit hoher Nutzung parametrisiert mit Datenblattangaben

Desktop-PC hohe Nutzung	Arbeitstage (203 Tage)				Nichtarbeitstage (162 Tage)
	Aktiv	Leerlauf	Ruhe	Schein-Aus	Schein-Aus
Betriebszustand	Aktiv	Leerlauf	Ruhe	Schein-Aus	Schein-Aus
Leistungsaufnahme	39,4 W	35,0 W	1,9 W	1,6 W	1,6W
Dauer pro Tag	5,0 h	2,5 h	2,5 h	14,0 h	24,0 h
Jahresstrombedarf	40,0 kWh	17,8 kWh	0,96 kWh	4,5 kWh	6,2 kWh

Parametrisierung und Vergleich des Berechnungsmodells mit verschiedenen Arbeitstagannahmen

In einem weiteren Vergleich wird die Auswirkung einer höheren Anzahl von Arbeitstagen untersucht. In diesem Fall wurde das mittlere Nutzungsszenario abermals mit Werten aus dem Produktdatenblatt (vgl. Tabelle 23) jedoch einmal mit 203 Arbeitstagen und 162 Nichtarbeitstagen sowie das andere Mal mit 220 Arbeitstagen und 145 Nichtarbeitstagen parametrisiert. Zusätzlich wurde der Monitor berechnet und in der Abbildung 8 mit dargestellt.

Abbildung 8: Vergleich des neuen Berechnungsmodells mit unterschiedlichen Arbeitstagannahmen



Die Gegenüberstellung illustriert die Auswirkung der über ein Jahr gerechneten längeren Aktiv- und Leerlaufphase auf den Gesamtstromverbrauch (110,57 kWh zu 118,63 kWh). Die insgesamt 17 Arbeitstage Unterschied führen zu einem um 8,06 kWh pro Jahr höheren Stromverbrauch des Desktop-APC. Der elektrische Strombedarf des Desktop-PCs überwiegt den Strombedarf des Monitors um lediglich Faktor 1,1.

3.3.3 Ableitung eines Berechnungsmodells für Notebooks

Unterscheidung einer stationären und mobilen Nutzung von Notebooks

Im Gegensatz zum methodischen Vorgehen bei der Ableitung eines neuen Berechnungsmodells für Desktop-APCs kann im Fall der Notebook-APCs nicht auf konkrete Messergebnisse aus dem Umweltbundesamt zurückgegriffen werden. Um dennoch eine modellbasierte Berechnung des potentiellen Stromverbrauchs von Notebooks in deutschen Behörden zu ermöglichen, wird auf Basis des Desktop-Berechnungsmodells und in Kombination mit Daten aus anderen Projekten begründete Annahmen getroffen und damit die Berechnungsgrundlage hergeleitet.

Das Berechnungsmodell für Notebooks unterscheidet im Gegensatz zum Desktop-APC zunächst grundsätzlich sowohl eine stationäre als auch eine mobile Nutzung:

- Stationäre Nutzung: Das Notebook wird im Büro (ggf. über eine Dockingstation) im Netzbetrieb und zugeklappten Zustand mit externem Monitor betrieben.
- Mobile Nutzung: Das Notebook wird außerhalb des Büros im Akkubetrieb und aufgeklappten Zustand ohne externen Monitor betrieben.

Eine mögliche private Nutzung außerhalb der Arbeitszeit wird in dem Berechnungsmodell bewusst ausgeschlossen, um eine Vergleichbarkeit mit den Desktop-APCs zu ermöglichen.

Bei den Betriebszuständen werden wie bei den Desktop-APCs alle Betriebszustände einschließlich „Aktiv“, „Leerlauf“, „Ruhe“, „Schein-Aus“ und „Netzgetrennt“ unterschieden. Dieses Vorgehen erlaubt eine Parametrisierung des Berechnungsmodells auf Grundlage von Datenblattangaben (zumindest immer ausgewiesen bei Geräten mit Umweltzeichen Blauer Engel) oder auch konkreten Messungen.

Es ist in diesem Zusammenhang anzumerken, dass sich die Leistungsaufnahme der Betriebszustände „Aktiv“ und „Leerlauf“ in der mobilen Nutzung, trotz der zusätzlichen Leistungsaufnahme des integrierten Monitors, von etwa 4 Watt kaum gegenüber der stationären Nutzung unterscheidet. Das ist dem Umstand geschuldet, dass in der mobilen Nutzung automatisch ein Energiesparmanagement zum Tragen kommt, welches insbesondere durch Spannungsanpassung die Taktung der CPU und sparsameren Betrieb anderer Komponenten adressiert. Die eigene Praxis zeigt aber auch, dass der Nutzer häufig die Helligkeit des integrierten Monitors und andere Einstellungen, z.B. bezüglich der Netzwerkfähigkeit, manuell korrigiert und damit auch energieintensivere Einstellung wählt.

Bei der Parametrisierung des Berechnungsmodells wird jedoch von einer identischen Leistungsaufnahme sowohl in der stationären wie auch in der mobilen Nutzung ausgegangen. Bei Vorhandensein von spezifischen Daten für die durchschnittliche Leistungsaufnahme im stationären und mobilen Betrieb kann aber optional eine Unterscheidung und damit Präzisierung des Modells erfolgen.

Für eine weitere Präzisierung der Berechnung könnte die Leistungsaufnahme einer vorhandenen Dockingstation bzw. auch des Verlustleistung des Netzteils Berücksichtigung finden. Bei eigenen Messungen an zwei Dockingstationen konnte eine Leistungsaufnahme von etwa 1 W im Aktiv/Leerlauf und etwa 0,5 W im Ruhezustand ermittelt werden.

Ähnlich wie eine Dockingstation kann das externe Netzteil während der gesamten Nutzung, auch während das Notebook nicht angeschlossen ist, Leerlaufverluste erzeugen. In der Durch-

führungsmaßnahme zur Ökodesign-Richtlinie EU-Verordnung Nr. 278/2009 wird eine Mindesteffizienz von 87% für externe Netzteile vorgeschrieben. Für ein typisches Netzteil von 65 W entspricht dies etwa 0,5 W, für die Leerlaufverluste wenn das Notebook nicht angeschlossen ist. Im Fall, dass das Notebook angeschlossen ist, werden die Wandlungsverluste des externen Netzteils über die Leistungsaufnahme der verschiedenen Betriebszustände berücksichtigt.

Zeitliche Verteilung der Betriebszustände für Notebooks

Bezüglich der zeitlichen Struktur und damit der Dauer der Betriebszustände an Arbeitstagen und Nichtarbeitstagen orientiert sich das Berechnungsmodell ebenfalls an der Desktop-Nutzung. So werden auch in der Grundstruktur zwischen 203 Arbeitstage und 162 Nichtarbeitstage unterschieden.

Die Dauer der Betriebszustände „Aktiv“ und „Leerlauf“ ändert sich nicht gegenüber dem Desktop-Berechnungsmodell, was bedeutet, dass im mittleren Nutzungsszenario die Summe der Aktiv- und Leerlaufphase für die stationäre und mobile Nutzung zusammengenommen genau wie bei den Desktops auch 6 Stunden beträgt. Die Ableitung einer plausiblen Binnengliederung dieser 6 Stunden, insbesondere mit Bezug auf die Unterscheidung der stationären und mobilen Phase, wird durch die fehlenden Daten aus der unmittelbaren Messung im Umweltbundesamt erschwert.

Um einen Orientierungswert für die Dauer der mobilen Nutzung pro Jahr und Tag zu erhalten, wurde auf die Auswertung von jährlichen Batterieladezyklen von über 300 Business-Notebooks zurückgegriffen (Clemm et al. 2015). Die Auswertung dieser Daten kommt zu dem Ergebnis, dass ein betrieblich genutztes Notebook durchschnittlich 73 vollständige Ladezyklen pro Jahr erfährt⁵⁷. Diese Ladezyklen-Anzahl kann in Wechselwirkung mit der bekannten Batteriekapazität für das im Umweltbundesamt verwendete Notebook (Fujitsu Lifebook S710) zur Berechnung der durchschnittlichen Nutzung pro Tag wie folgt benutzt werden.

Da das Fujitsu Lifebook S710 über einen Akku mit 56 Wh verfügt und laut Datenblatt 9,65 W im Leerlauf und 45,2 W maximal aufnimmt, nehmen wir eine durchschnittliche aktive Leistungsaufnahme von $0.1 \cdot 45,2 \text{ W} + 0.9 \cdot 9,65 \text{ W} = 13,2 \text{ W}$ an. Es wird in diesem Fall die aktive Nutzung entsprechend der von Fujitsu genutzten Berechnungsformel von 10% Aktiv und 90% Leerlauf angewendet. Bei 56 Wh ergibt sich eine durchschnittliche aktive Nutzungsdauer von 4,2 Stunden pro Ladezyklus. Zum Vergleich, bei einer etwas höher angenommen aktiven

⁵⁷ Die 73 Ladezyklen waren Ergebnisse nach Kenntnisstand der Berichtslegung im Juni 2014. Mit Abschluss des Projektes „Umweltwirkungen von wieder aufladbaren Lithium-Ionen-Batterien für den Einsatz in mobilen Endgeräten der Informations- und Kommunikationstechnik“ (FKZ 3713 95 316) des Umweltbundesamtes wurde dieser Wert nochmals auf den Prüfstand gestellt und deutlich nach unten korrigiert auf durchschnittlich 31 Ladezyklen pro Jahr. Diesem Wert liegt eine Auswertung von über 800 Datensätzen zu Grunde. Diese Verringerung der Ladezyklen pro Jahr hat eine ca. Halbierung der realen mobilen Nutzungsdauer der Notebooks zur Folge. Damit verändert sich jedoch nicht die Gesamtnutzungsdauer des Notebooks, sondern lediglich die zeitliche Verteilung von stationärer und mobiler Nutzung. Der resultierende Strombedarf der Notebooks bleibt gleich. Allerdings erhöht sich der elektrische Strombedarf des separaten Monitors durch die Umlage auf die nun verlängerte stationäre Nutzungsdauer. Im mittleren Nutzungsszenario steigt durch diese Änderung der Energiebedarf des separaten Monitors von jährlich 38,2 kWh auf 42,9 kWh leicht an. In Summe erhöht sich der jährliche Strombedarf um Faktor 1,08.

Nutzung von 20% und lediglich 80% Leerlauf ergibt sich eine durchschnittliche Leistungsaufnahme von 16,8 W und respektive 3,3 Stunden pro Ladezyklus.

Um nun eine konkrete Dauer für die Aktiv- und Leerlaufphase pro Tag zu bestimmen, werden die 73 Ladezyklen auf die 203 Arbeitstage bezogen. Auf Basis dieser Annahmen wird ein Notebook folglich knapp alle 3 Arbeitstage (2,78) vollständig geladen. Bei einer durchschnittlichen mobile Nutzung von 4,2 Stunden pro Akkuladung ergibt sich eine tägliche Nutzung von 1,5 Stunden ($4,2h / 2,8d = 1,5h/d$). Zum Vergleich bei 3,3 Stunden pro Akkuladung ergibt sich eine durchschnittliche mobile Nutzung von 1,2 Stunden pro Arbeitstag.

Aus diesen Berechnungen werden für die mobile Nutzung im mittleren Nutzungsszenario eine einstündige Aktivphase und eine halbstündige Leerlaufphase abgeleitet. Die entsprechenden Zeitannahmen für eine hohe und geringe Nutzung werden identisch zur Standardabweichung der Desktop-APCs festgelegt.

Die aktive Nutzungsdauer des Monitors orientiert sich an der stationären Nutzung des Notebooks und berücksichtigt, dass auch der Monitor im Leerlauf des Notebooks an ist und erst nach längere Verweildauer des Notebooks im Leerlauf abschaltet. Die Aktivphase des Monitors ist im mittleren Nutzungsszenario nur um eine halbe Stunde kürzer als die Aktiv- und Leerlaufphase des Notebooks zusammengenommen.

Die zeitliche Verteilung der einzelnen Betriebszustände bezüglich der stationären und mobilen Nutzung von Notebook-APCs, einschließlich des externen Monitors, wird in den nachstehenden Tabellen aufgelistet.

Tabelle 25: Berechnungsmodell für das Notebook bei stationärer Nutzung im Netzbetrieb

Notebook (stationäre Nutzung)	Arbeitstage (203 Tage)				Nichtarbeitstage (162 Tage)
	Aktiv	Leerlauf	Ruhe	Scheinaus (Netzgetrennt)	Scheinaus (Netzgetrennt)
Hohe Nutzung	3,5 h	2,0 h	2,5 h	14,0 h	24,0 h
Mittlere Nutzung	2,5 h	2,0 h	4,0 h	14,0 h	24,0 h
Geringe Nutzung	1,5 h	2,0 h	5,5 h	14,0 h	24,0 h

Tabelle 26: Berechnungsmodell für den separaten Monitor bei stationärer Nutzung des Notebooks

Monitor [NB] (stationäre Nutzung)	Arbeitstage				Nichtarbeitstage
	Aktiv	Leerlauf	Ruhe	Scheinaus (Netzgetrennt)	Scheinaus (Netzgetrennt)
Hohe Nutzung	5,0 h	0,5 h	4,5 h	14,0 h	24,0 h
Mittlere Nutzung	4,0 h	0,5 h	5,5 h	14,0 h	24,0 h
Geringe Nutzung	3,0 h	0,5 h	6,5 h	14,0 h	24,0 h

Tabelle 27: Berechnungsmodell für das Notebook bei mobiler Nutzung im Akkubetrieb

Notebook (mobile Nutzung)	Arbeitstage				Nichtarbeitstage
	Aktiv	Leerlauf	Ruhe	Scheinaus (Netzgetrennt)	Scheinaus (Netzgetrennt)
Hohe Nutzung	1,5 h	0,5 h	0,0 h	0,0 h	0,0 h
Mittlere Nutzung	1,0 h	0,5 h	0,0 h	0,0 h	0,0 h
Geringe Nutzung	0,5 h	0,5 h	0,0 h	0,0 h	0,0 h

Parametrisierung und Vergleich des Berechnungsmodells mit Datenblattwerten

Um nun die Plausibilität des neuen Berechnungsmodells zu demonstrieren, parametrisieren wir das Modell auf Basis von existierenden Datenblattwerten für das im Umweltbundesamt zum Einsatz kommende Notebook Fujitsu Lifebook S710. Tabelle 28 zeigt die zeitliche Verteilung im mittleren Nutzungsszenario, die entsprechenden Werte für die Leistungsaufnahme dieses Notebooks in den einzelnen Betriebszuständen sowie den berechneten elektrischen Strombedarf pro Jahr in Kilowattstunden.

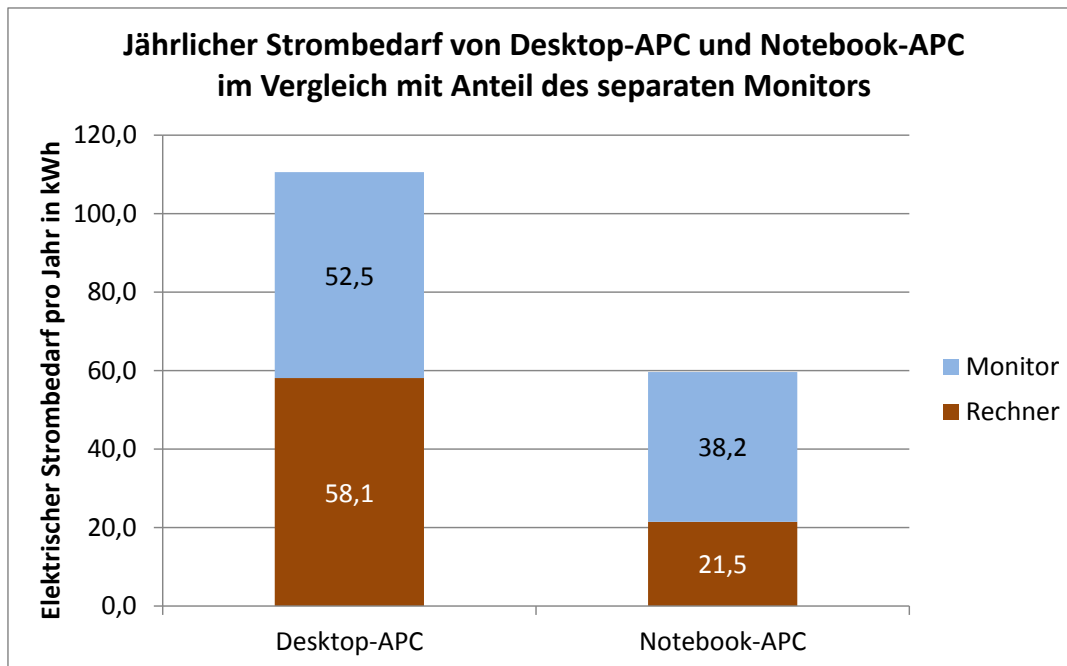
Tabelle 28: Berechnungsmodell für Notebooks mit mittlerer Nutzung parametrisiert mit Datenblattangaben

Notebook mittlere Nutzung	Arbeitstage (203 Tage)				Nichtarbeitstage (162 Tage)
	Aktiv _{berechnet}	Leerlauf	Ruhe	Schein-Aus	Schein-Aus
Leistungsaufnahme des Notebooks	13,20 W	9,65 W	1,84 W	0,85 W	0,85 W
Dauer stationäre Nutzung pro Tag	2,5 h	2,0 h	4,0 h	14,0 h	24,0 h
Dauer mobile Nutzung pro Tag	1,0 h	0,5 h	0,0 h	0,0 h	0,0 h
Jahresstrombedarf	9,38 kWh/a	4,89 kWh/a	1,49 kWh/a	2,42 kWh/a	3,30 kWh/a

Der mit dem Modell im mittleren Nutzungsszenario berechnete Stromverbrauch für das Fujitsu-Notebook liegt bei 21,48 kWh pro Jahr. Hinzu kommt der separate Monitor während der stationären Nutzung, der insgesamt 4,0 Stunden lang über 203 Arbeitstage eine elektrische Leistung von 47 Watt aufnimmt und in Summe pro Jahr 38,16 kWh pro Jahr benötigt.

Die folgende Abbildung 9 zeigt im direkten Vergleich die auf Basis von Datenblattwerten im mittleren Nutzungsszenario berechneten Jahresverbräuche von Desktop-APC und Notebook-APC mit Ausweisung des Monitors.

Abbildung 9: Jährlicher Strombedarf von Desktop-APC und Notebook-APC im Vergleich



Bei der Gegenüberstellung in Abbildung 9 wird die Verlustleistung einer Dockingstation berücksichtigt, so steigt der Gesamtstromverbrauch des Notebook-APC von 59,70 kWh/a auf 64,18 kWh/a an. Der elektrische Strombedarf des Desktop-APC überwiegt den Strombedarf des Notebook-APC damit um den Faktor 1,7.

Wird an Stelle der Dockingstation nur das externe Netzteil des Notebooks genutzt und werden dessen Leerlaufverluste in der mobilen Nutzung berücksichtigt, so steigt der Gesamtstromverbrauch des Notebook-APC auf von 59,7 kWh/a minimal auf 60,0 kWh/a an. Der elektrische Strombedarf des Desktop-APC überwiegt den Strombedarf des Notebook-APC damit um den Faktor 1,8.

Zusammenfassung

Im Ergebnis zeigt sich, dass Notebook-APC mit separaten Monitor deutlich energiesparender als eine Desktop-APC. Der geringere Energiebedarf resultiert insbesondere aus der geringeren Leistungsaufnahme des Notebooks. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass das Notebook ggf. eine geringere Performance hat als ein vergleichbarer Desktop-PC (Formfaktor). Unter der Annahme, dass das Notebook teilweise mobil genutzt wird, reduziert sich auch der Stromverbrauch des separaten (stationären) Monitors. Des Weiteren kommt hinzu, dass Notebooks auf eine mobile Nutzung hin optimiert sind und ein strengeres Power Management voreingestellt haben als Desktop-PCs.

In Hinsicht auf die Faktoren des Nutzungsprofils, welche den Energieverbrauch maßgeblich beeinflussen, ist zunächst die Verteilung der Arbeitstage zu Nichtarbeitstagen zu nennen. Im Abschnitt „Unterscheidung von Arbeitstagen und Nichtarbeitstagen“ (S. 67) wurden unterschiedliche Ansätze vorgestellt. In Abbildung 8 wurde gezeigt, dass eine Erhöhung von 203 Arbeitstagen auf 220 Arbeitstage in einer längeren Aktiv- und Leerlaufphase mit einem um 8,5 kWh pro Jahr höheren Stromverbrauch des Desktop-APCs resultiert. Der um den Faktor 1,8 höhere Jahresenergiebedarf des Desktop-PC aus dem Berechnungsmodell des Energy Star v5.2 ist insbesondere auf die fehlende Berücksichtigung von Arbeits- und Nichtarbeitstagen zurück-

zuführen (vgl. Abbildung 7). Dabei ist ersichtlich, dass mehr als 70% des gesamten Jahresenergieverbrauchs des Desktop-PC durch die Aktiv-/Leerlauf-Phase bestimmt wird.

Die Dauer des Leerlauf-Zustands wird maßgeblich durch die Einstellung des Power Managements bestimmt. Ein strengeres Power Management reduziert die Leerlaufphase deutlich und führt damit auch zu einem geringeren Gesamtenergiebedarf.

Neben der zeitlichen Dauer wird die Aktiv-/Leerlauf-Phase auch über die Leistungsaufnahme im Aktiv- und Leerlauf-Zustand bestimmt. Die geringere Leistungsaufnahme des Notebooks im Aktiv- und Leerlaufzustand resultiert damit auch in einem deutlich geringeren Jahresenergiebedarf gegenüber dem Desktop-PC (vgl. Tabelle 23 und Tabelle 28).

Einen wichtigen Anteil am Gesamtprofil eines APC hat der Monitor. Beim Desktop-APC hat der Monitor einen Anteil von ca. 50 % und beim Notebook-APC einen Anteil von 66,6% am gesamten Jahresenergiebedarf.

4 Arbeitspaket 2: Erhebung von Lebenszyklusdaten für die Untersuchungen der Umweltauswirkungen von Arbeitsplatzcomputern (APC)

4.1 Einführung

Wie im Kapitel 1 bereits erwähnt, ist es zwingend erforderlich, die Datengrundlagen zur Berechnung des Herstellungsaufwandes der IKT-Produkte zu verbessern und auf den aktuellsten Stand zu bringen, denn es wird festgestellt, dass die derzeit verfügbaren Datensätze, die auch im Rahmen europäischer produktpolitischen Instrumente (z.B. Ökodesign-Richtlinie) für die Modellierung des Herstellungsaufwandes der IKT-Produkte eingesetzt werden, nicht den heutigen Stand der Technik abbilden. Vor allem sind verfügbare Daten zum Material- und Ressourcenverbrauch sowie zur Umweltinanspruchnahme in den vor- und nachgelagerten Produktlebensphasen extrem veraltet und unterschätzen bei weitem die tatsächlichen Umweltbelastungen. Aus diesem Grund besteht die Gefahr, dass die heute getroffenen produktpolitischen Entscheidungen unausgewogen sind und die Umweltauswirkungen der Herstellungsphase systematisch unterschätzen, wie einige Studien auch gezeigt haben (siehe Prakash et al. 2016; Prakash et al. 2012; Ciroth & Franze 2011).

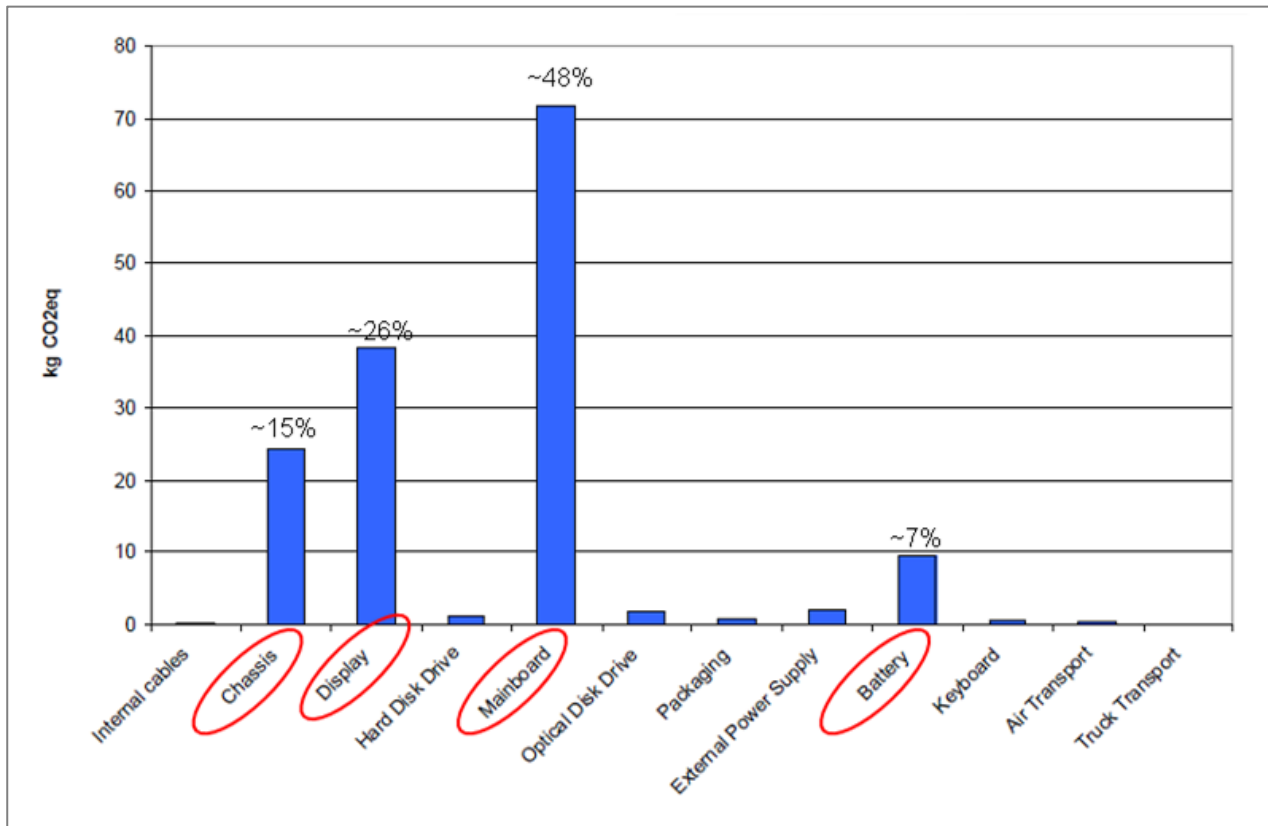
Um richtungssichere Handlungsoptionen und produktpolitische Entscheidungen im Hinblick auf eine Reduzierung der Umweltauswirkungen und des Ressourcenverbrauchs der Computerarbeitsplätze in der Bundesverwaltung identifizieren zu können, sind robustere und aktuelle Datensätze zu IKT-Produkten und Komponenten notwendig. Außerdem können Entscheidungen für oder gegen den Ersatz alter durch neue Geräte oder über eine Verlängerung der Nutzungsdauer der bestehenden Geräte aus Sicht des Umweltschutzes nur dann sinnvoll getroffen werden, wenn die Berechnungen auf der Grundlage von robusten Daten durchgeführt worden sind.

Da die Erhebung der Lebenszyklusdaten zu IKT-Produkten und Komponenten aufgrund der komplexen und weltweiten Lieferkettenstruktur sowie der technologiebedingten kurzen Innovationszyklen eine große Herausforderung darstellt, wird in diesem Arbeitspaket eine Konzentration der Untersuchung auf relevante, zur Bestimmung der Umweltwirkungen wichtige Baugruppen/Komponenten, vorgenommen. Sinnvoll erscheint, die Auswahl der Komponenten/Baugruppen anhand zweier Kernkriterien festzulegen:

- Hohe Umweltrelevanz (z.B. basierend auf dem Anteil am Gesamt-Carbon-Footprint des Produktes)
- Hoher Anteil an wichtigen Rohstoffen (insbesondere seltener bzw. begrenzt verfügbarer Rohstoffe wie ausgewählte Metalle und Mineralien)

Aus vorliegenden Studien ist bekannt, dass nur wenige Komponenten einen großen Anteil an den Gesamttreibhausgasemissionen eines Computergeräts haben. Beispielsweise zeigt die Abbildung 10, dass komplexe Baugruppen, wie Mainboard, Display, Akku und Chassis, bei der Herstellung zu 96% der Gesamttreibhausgasemissionen (CO₂e) der Herstellung eines Notebooks beitragen. Außerdem enthalten das Mainboard (inkl. Prozessoren, Mikrokontroller, Grafikkarte, Speicher und das Leiterplattensubstrat), das Display und der Akku eine Vielzahl von seltenen Metallen, wie Gold, Silber, Palladium, Indium, Kobalt usw., deren Primärgewinnung mit großen Umweltauswirkungen verbunden sind.

Abbildung 10: Beitrag einzelner Baugruppen zu Gesamttreibhausgasemissionen der Herstellung eines Notebooks (Quelle: O'Connell & Stutz 2010)⁵⁸



Die Datenerhebung zu Notebookdisplays hat bereits im Rahmen des UFOPLAN-Vorhabens „Ressourcenschonung im Aktionsfeld Informations- und Kommunikationstechnik (IKT)“ (FKZ 3709 95 308) stattgefunden (Prakash et al. 2013). Die Datenerhebung zu den Notebook-Akkus findet in einem UFOPLAN-Vorhaben „Umweltwirkungen von wiederaufladbaren Lithium-Ionen-Batterien für den Einsatz in mobilen Endgeräten der Informations- und Kommunikationstechnik (IKT)“ (FKZ 3713 95 316) statt (Clemm et al. 2015). Daher muss für die Komponente Akku keine Aktualisierung des Datensatzes vorgenommen werden.

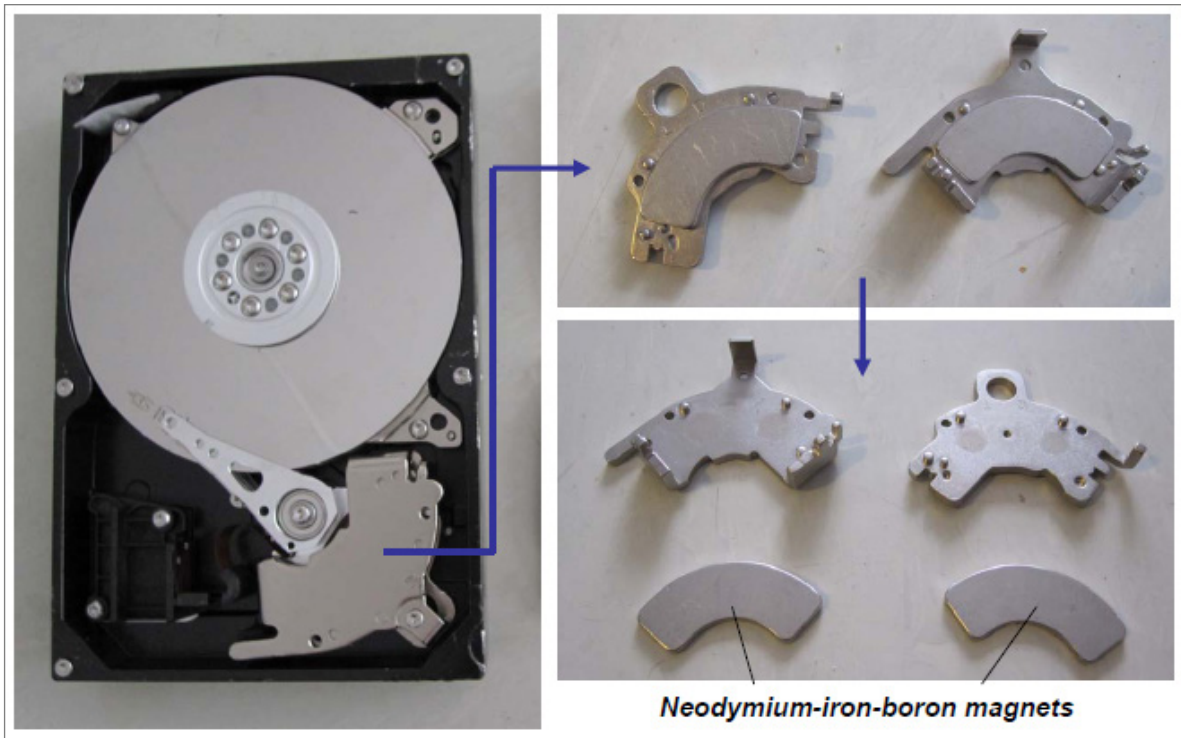
Die Treibhausgasemissionen eines Chassis sind zum größten Teil auf die energieintensiven Prozesse der Magnesiumlegierung sowie auf Aluminium (Kühlkörper) und energiereichen Kunststoff (interner Rahmen) zurückzuführen. Allerdings trägt das Chassis im Verhältnis zu seiner Gesamtmasse sehr wenig zu Gesamttreibhausgasemissionen eines Notebooks bei (O'Connell & Stutz 2010).

Allerdings gibt es noch weitere Baugruppen, die aus Ressourcengesichtspunkten interessant sein könnten, wie zum Beispiel integrierte Festplatte (oder Solid-State-Drive), optisches Laufwerk und externe Netzteile. Beispielsweise enthalten integrierte Festplatten hochwertige Edel- und Sondermetalle mit hohem Materialwert, außerdem Neodym, ein Element der 17 seltenen Erden und ein wichtiges Funktionsmaterial in der Magnetproduktion (Abbildung 11). Zudem enthal-

⁵⁸ O'Connell und Stutz 2010: Product Carbon Footprint (PCF) Assessment of Dell Laptop – Results and Recommendations, 2009; Sustainable Systems and Technology (ISSST), 2010 IEEE, ISBN 978-1-4244-7094-5

ten die Festplatten noch hochreine Anteile von Kupfer in der Leiterplatte, Aluminium im Lese/Schreib-Kopf sowie Edelstahl im inneren Deckel. Zu beachten ist, dass die Scheiben nicht ausschließlich aus Aluminium bestehen, da sie auf der Oberfläche noch mit einer dünnen Schicht Ruthenium (Ru) überzogen sind (Liu et al. 2012)⁵⁹.

Abbildung 11: Seltene Erden Magnete des Schwingspulenbetätigers (Buchert et al. 2012)

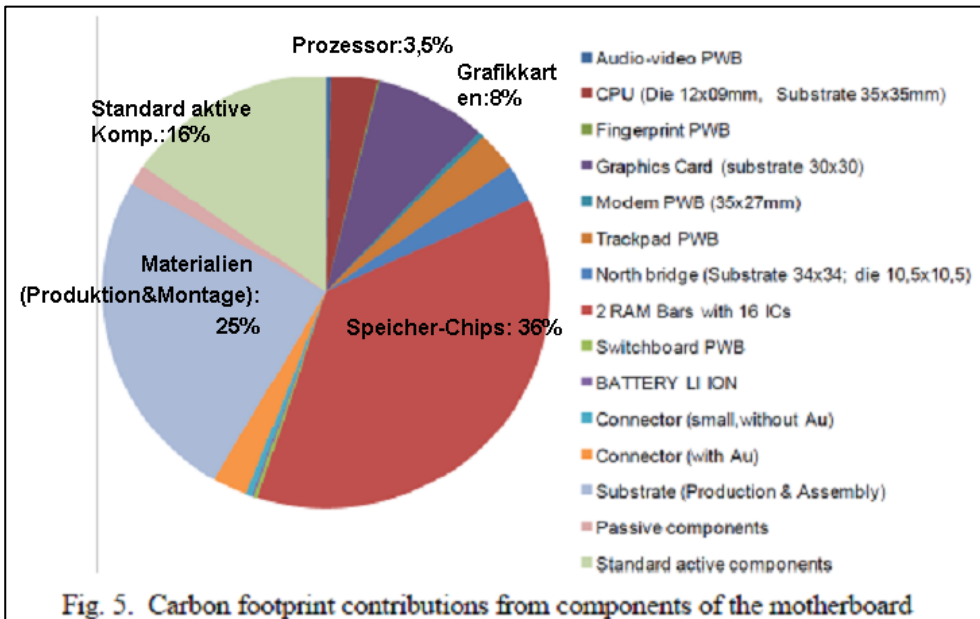


Außerdem enthält der Spindelmotor eines optischen Laufwerks eines Notebooks ebenfalls seltene Erden, wie Neodym (Buchert et al. 2012).

Das Mainboard hat mit ca. 48% den größten Anteil der Gesamttreibhausgasemissionen der Herstellung eines Notebooks. Auf einem Mainboard befinden sich wiederum viele unterschiedliche Komponenten, die in der folgenden Abbildung 12 beispielhaft zeigt, welche Komponenten bei der Herstellung wesentlich zu den Gesamttreibhausgasemissionen eines Mainboards beitragen.

⁵⁹ Liu et al. (2012); Top 100: PROSA – Externe Festplatten, Entwicklung der Vergabekriterien für ein klimaschutzbezogenes Umweltzeichen, Studie im Rahmen des Projektes "Top 100 – Umweltzeichen für klimarelevante Produkte", Gefördert durch: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), Berlin / Projektträger Jülich

Abbildung 12: Beitrag einzelner Subkomponenten zu Gesamttreibhausgasemissionen eines Mainboards (Quelle: O'Connell & Stutz 2010)



Wie Abbildung 12 veranschaulicht, tragen Speicherchips (36%), Herstellung und Bestückung des Substrats (25%), aktive Komponenten (16%), Grafikkarte (8%) und Prozessor (3,5%) wesentlich zu den Gesamttreibhausgasemissionen bei der Herstellung eines Mainboards bei. Die Datenerhebung zu Speicherchips hat bereits im Rahmen des UFOPLAN-Vorhabens „Ressourcenschonung im Aktionsfeld Informations- und Kommunikationstechnik (IKT)“ (FKZ 3709 95 308) stattgefunden (Prakash et al. 2013). Eine Aktualisierung des Speicherchips ist somit nicht notwendig.

Aus den oben genannten Gründen kommen folgende Baugruppen/ Komponenten für eine Datenerhebung in Frage:

- Interne Festplatte (HDD)
- Zentrale Prozessoreinheit (CPU) als gehäuseter (Package) Mehrkernprozessor ohne Sockel.
- Unbestückte Leiterplatte als mehrlagiges Substrat (Multilayer) mit Kupferleiterbahnen, Durchkontaktierungen (Via) und Oberflächenbehandlung (Finishes).

4.2 Datensatz für interne Festplatte (HDD)

4.2.1 Beschreibung des Produktes und Vorgehensweise zur Datenerhebung

Eine Festplatte (Englisch: hard disk drive=HDD), auch als Festplattenlaufwerk bezeichnet, ist ein Speichermedium, bei dem die Daten auf der Oberfläche der rotierenden, magnetisierbaren Scheiben⁶⁰ gelesen oder geschrieben werden. Der Untersuchungsgegenstand der vorliegenden Studie ist eine interne Festplatte⁶¹, ein Bauteil in IKT-Geräten (z.B. Notebooks, Desktop-PCs oder Server).

Derzeit gibt es am Markt Festplatten mit den Formfaktoren 3,5“ und 2,5“. Wegen ihres sehr kleinen Marktanteils sind 1,8“-Festplatten nicht relevant. 2,5“-Festplatten werden in Notebooks eingesetzt und dort allmählich durch halbleiterbasierende SSDs (Solid-State Drives) ersetzt, die durch eine flashbasierte, also nicht-flüchtige Speichertechnik und entsprechend hohe Übertragungsgeschwindigkeiten charakterisiert sind. Laut Auskunft eines Herstellers gibt es trotz dieser Entwicklung sowie des zunehmenden Angebots an Onlinespeicherdiensten im Internet bislang keinen nennenswerten abnehmenden Trend, was die Verkaufszahlen von Festplatten (HDD)⁶² angeht. Allerdings ist eine Verschiebung innerhalb der Segmente festzustellen:

- Der Anteil mobiler/ externer Festplatten nimmt zu; der Markt für Desktop-Festplatten stagniert und
- sogenannte Enterprise-Festplatten (für Server) nehmen zu.

3,5“-Festplatten werden in Desktop-PCs oder Rechenzentren weiterhin eingesetzt, weshalb in dieser Studie der Fokus auf Festplatten mit diesem Formfaktor gelegt wird.

Die Vorgehensweise zur Erhebung von Sachbilanzdaten zur Herstellung der Festplatte ist in folgender Abbildung dargestellt. Zuerst wurden die typischen technischen Parameter für eine typische Festplatte recherchiert, z.B. Speicherkapazität, Spindelgeschwindigkeit, Anschlussmöglichkeiten etc. Auf der Grundlage dieser Parameter wurde im Gebrauchthandel eine entsprechende Festplatte angeschafft und manuell demontiert. Die einzelnen Komponenten wurden gewogen, fotografiert und in einer Stückliste dargestellt. In einem weiteren Schritt wurden die Komponenten dieser Stückliste einzelnen Materialgruppen zugeordnet.

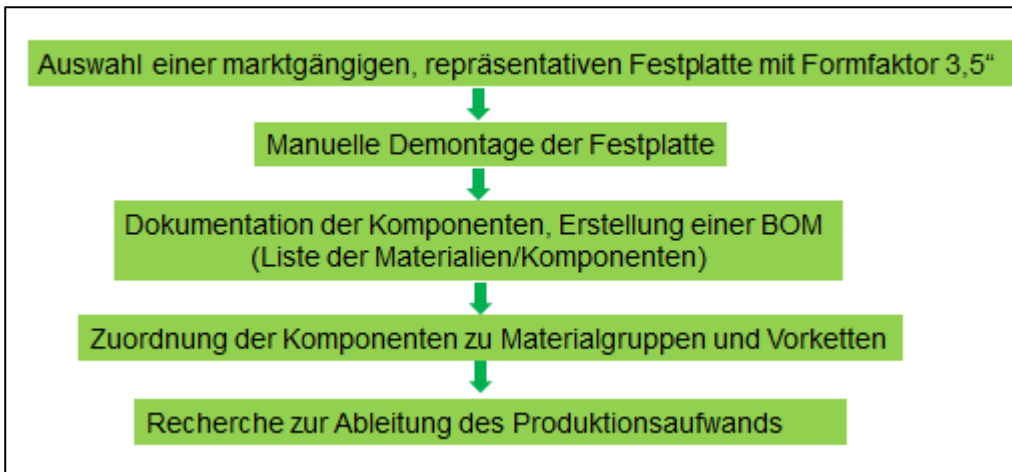
Der eigentliche Produktionsaufwand für die Festplatten und ihre Schlüsselkomponenten wurden auf der Grundlage von Produktionsdaten separat recherchiert. Die Gewichtsangaben der mikroelektronischen Komponenten wurden ebenfalls recherchiert und anschließend mit ecoinvent-Datensätzen modelliert. Die Vorketten für die Herstellung der Materialien bzw. der weiteren Komponenten wurden ebenfalls mit ecoinvent bilanziert.

⁶⁰ Laut Expertenauskunft werden hierfür synonym die Begriffe „Platter“, „Medium“ oder „Scheibe“ verwendet. Im Rahmen dieser Studie und bei der Beschreibung des Datensatzes wird generell von Medium bzw. Medien (im Falle von mehreren magnetisierbaren Scheiben) gesprochen.

⁶¹ Die für externe Festplatten verwendeten Laufwerke sind baugleich mit internen Festplatten; sie werden allerdings in Gehäuse mit einer Konverter-Elektronik verbaut und verfügen dadurch über Anschlüsse an gängige Schnittstellen.

⁶² Beinhaltet Serverfestplatten sowie interne und externe Festplatten für PCs.

Abbildung 13: Vorgehensweise zur Datenerhebung



Im Rahmen dieser Studie wurde ein Produkt der Firma Western Digital ausgesucht, da die Produkte dieses Unternehmens zurzeit ca. die Hälfte des weltweiten Marktes ausmachen. Die Top-5 der weltweiten Festplatten-Hersteller waren 2010 Western Digital, Seagate, Hitachi, Toshiba/Fujitsu und Samsung (iSuppli, zitiert in Heise 2010). 2010 befand sich allerdings der Markt für Festplatten in einem Konsolidierungsprozess. Hitachi wurde von Western Digital aufgekauft. Damit erreichte der Konzern auf einen Schlag einen Marktanteil von etwa 49%. Seagate hat Samsungs HDD-Geschäft übernommen und hält damit einen Marktanteil von ca. 40%. Toshiba und Fujitsu haben insgesamt ca. 10% der Marktanteile. Daher haben wir bei den Produktionsdaten auf Western Digital und Seagate fokussiert, um möglichst repräsentative Daten zu erhalten.

Abbildung 14 zeigt die im Gebrauchthandel erworbene Festplatte von oben, unten und von innen.

Abbildung 14: Festplatte: Western Digital Modell Caviar Green (Fotos: Öko-Institut)

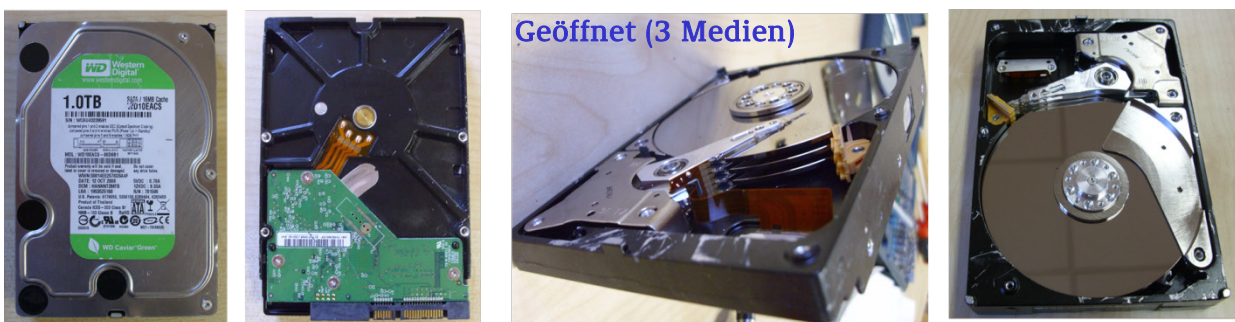


Tabelle 29 gibt eine Übersicht über die grundlegenden technischen Merkmale der untersuchten Festplatte. Das Produkt wurde 2008 produziert und entspricht dem damaligen Stand der Technik. Laut eines Festplattenherstellers hat sich zwischen 2008 und heute in der Produktionstechnik der Festplatten nicht viel getan.

Tabelle 29: Merkmale des Referenzproduktes

Hersteller	Western Digital
Typ	Interne Festplatte
Modellname	Caviar Green MPN WD10EACSEAN2008265978957, 683728124120
Formfaktor	3,5 Zoll
Kapazität	1 TB
Puffergröße	16 MB
Spindelgeschwindigkeit	5400 RPM
Schnittstelle	SATA II
Technische Merkmale	PC externe Datenübertragungsrate 300 Megabyte pro Sekunde Interne Datenübertragungsrate 144,5 Megabyte pro Sekunde
Abmessungen	Höhe 2,62 cm (1,03 in.); Breite 10,16 cm (4 in.); Tiefe 14,71 cm (5,79 in.)
Gewicht	0,63 kg
Anzahl der Medien (Scheiben)	3
Produktionsjahr	2008
Produktionsstandort	Thailand

4.2.2 Festlegung des Untersuchungsrahmens

In dieser Studie wird ein Sachbilanz-Datensatz für die Fertigung einer 3,5“ Festplatte für den Import in ProBas erstellt. Bei diesem Datensatz werden ausschließlich direkte Prozesse dargestellt, die im Kontext dieses Arbeitspakets untersucht werden konnten. Die für eine vollständige Bilanzierung erforderlichen Vorketten können von ProBas-Nutzern eigenständig mit geeigneten Datensätzen ergänzt und mit den direkten Prozess-Modulen in Verbindung gesetzt werden.

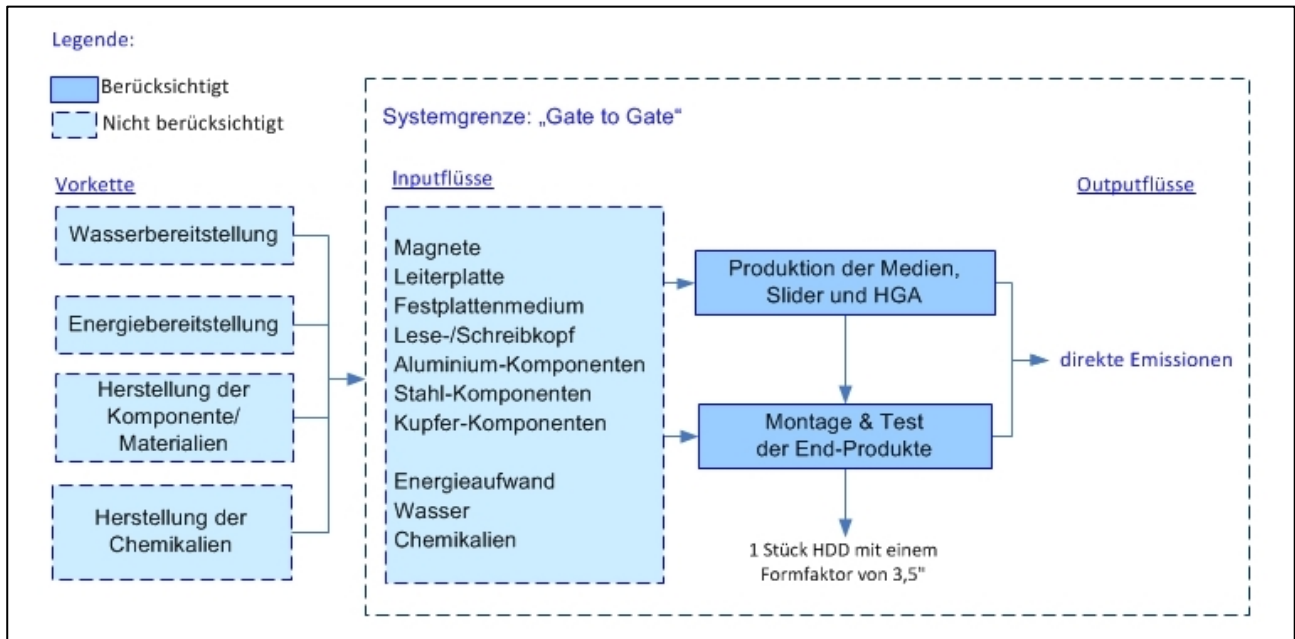
Bezugsgröße

Die Bezugsgröße des Datensatzes ist eine Festplatte mit einem Formfaktor von 3,5 Zoll und den in Tabelle 74 dargestellten technischen Parametern.

Festlegung der Systemgrenze

Abbildung 15 stellt die Systemgrenze der Sachbilanz für die Fertigung der Festplatte dar. Die Systemgrenze für die Herstellung der Festplatte umfasst die Erfassung der Sachbilanzdaten auf der Komponentenebene und für die Produktion (Gate-to-Gate).

Abbildung 15: Systemgrenze des ProBas-Datensatzes für die Fertigung der Festplatte im Rahmen dieses Arbeitspakets⁶³



Die Berechnung der Aufwände für die Herstellung der Inputmaterialien (z.B. Magnet, Leiterplatte, Chemikalien usw.) ist Gegenstand des nächsten Arbeitspakets. Der in diesem Kapitel beschriebene Datensatz umfasst die Fertigung einer Festplatte bei HDD-Herstellern (Gate-to-Gate). Das heißt, der Datensatz beinhaltet die Produktion der Medien, Slider und HGA sowie die Montage & der Test der Endprodukte in der Fertigungsfabrik.

Repräsentativität des Datensatzes

Die Repräsentativität des Festplatten-Datensatzes ist in Tabelle 30 zusammengefasst:

Tabelle 30: Repräsentativität des Festplatten-Datensatzes (Ohne Vorkette)

Datensatz in ProBas	Zeitlicher Bezug	Geografischer Bezug	Technologischer Bezug
Fertigung/ interne Festplatte	2008-2013	Weltmix	Formfaktor: 3,5 Zoll
			Kapazität: 1 TB
			Puffergröße: 16 MB
			Spindelgeschwindigkeit: 5400 RPM
			Schnittstelle: SATA II
			Technische Merkmale: PC Externe Datenübertragungsrate 300 Megabyte pro Sekunde Interne Datenübertragungsrate 144,5 Megabyte pro Sekunde

⁶³ Begrifflichkeit über HGAs und Slider s. Abschnitt „Detaillierte Zusammensetzung einzelner Komponenten“

Datensatz in ProBas	Zeitlicher Bezug	Geografischer Bezug	Technologischer Bezug
			Abmessungen: Höhe 2,62 cm (1,03 in.); Breite 10,16 cm (4 in.); Tiefe 14,71 cm (5,79 in.)
			Gewicht: 0,605 kg ⁶⁴
			Anzahl der Medien: 3
			Produktionsjahr: 2008

4.2.3 Ergebnis und Auswertung des Datensatzes für die Fertigung der HDD





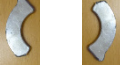

Die Auswertung des Datensatzes zur Fertigung der HDD erfolgt ausgehend von der Material- bzw. Komponentenzusammensetzung und dem Energieaufwand bei der Produktion.

Komponentenzusammensetzung







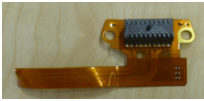
Zuerst wurde die Festplatte demontiert und die Komponenten wurden gewogen, um eine Stückliste (Bill of Materials, „BOM“) zu erstellen. Anschließend wurden die Komponenten durch Sichtprüfung und Expertenbewertung den Materialgruppen zugeordnet und/oder als Bauteile identifiziert, die anhand von externen Daten zu Vorketten modelliert werden können. In Tabelle 31 sind die Fotos der Komponenten und ihr entsprechendes Gewicht sowie die Zuordnung nach Materialien aufgeführt. Die Tabelle ist absteigend nach dem Gewicht der Komponenten sortiert. Es ist ersichtlich, dass bei manchen Komponenten das Material einfach zu identifizieren ist, wie z.B. beim Gehäuse. Aber es gibt auch Bauteile, bei denen die Komponenten noch tiefergehend aufgeschlüsselt werden müssen. Beispielsweise gibt es auf einer Leiterplatte diverse mikroelektronische Komponenten. Bei den Magneten ist die Identifizierung von den eingesetzten Seltenen Erden wie Neodym ebenfalls wichtig, denn obwohl die verwendete Menge klein ist, ist die Umweltwirkung dieses Metalls jedoch sehr groß. Die weitere Aufschlüsselung der Komponenten bzw. der Materialien basiert auf Literaturangaben und Auskunft von Fachleuten beim Expertenworkshop bzw. auf Herstellerangaben. Es gibt sehr kleine Komponenten, wie Schutzfolien und Gummiringe, die nicht berücksichtigt wurden. Diese Bestandteile betragen allerdings weniger als 1% des Gesamtgewichts der Festplatte. Es wird davon ausgegangen, dass sie für die Ergebnisse eine minimale Rolle spielen.

⁶⁴ Das Gewicht der Medien wurde auf Basis der Daten von Herstellern (2013) für den Probas-Datensatz adjustiert (s. Tabelle 31).

Tabelle 31: Ermittlung des Gewichts der Komponenten der untersuchten Festplatte

Komponente	Bild	Gewicht (Gramm)	Anteil (%)	Material
Gehäuse: Unterer Deckel		271	44,8%	Aluminium
Festplattenmedien (3 Stück) ⁶⁵		69	11,4%	Aluminium-basiert, diverse Edelmetalle
Gehäuse: Oberer Deckel		87	14,4%	Stahl
Schwingspulenbetätiger für Neodym-Magnete		54	8,9%	Stahl
Motor		21	3,5%	Stahl
Bestückte Leiterplatte (42,1cm ²)		21	3,5%	Epoxidharz; Kupfer; sowie diverse elektronische Komponenten
Neodym-Magnete (2 Stück)		16	2,6%	Neodym-Eisen-Bor (NIB) Magnet
Aluminium-Teile zwischen Platten		14	2,3%	Aluminium
Lese-/Schreibköpfe		8	1,3%	Aluminium
Motorringe		7	1,2%	Aluminium
Spulenring vom Motor (Grün)		6	1,0%	Stahl

⁶⁵ Anzumerken ist, dass das Gewicht der Medien auf Basis der Daten von Herstellern (2013) für den Probas-Datensatz adjustiert wurde. Das Gewicht pro Medium für eine 3,5“-Festplatte beträgt 23 g (s. Tabelle 35). Diese Gewichtsangabe weicht vom Gewicht der Medien des Referenzproduktes ab (31 g/Medium). Dies lässt sich dadurch erklären, dass das Referenzprodukt 2008 produziert wurde und die Dicke und Größe des Mediums im Vergleich zu den Angaben von 2013 vermutlich unterschiedlich sind. Für den Probas-Datensatz wird die Materialienzusammensetzung laut aktuellen Herstellerangaben von 2013 zugrunde gelegt. Daher wird das gesamte Gewicht des Referenzproduktes entsprechend adjustiert.

Komponente	Bild	Gewicht (Gramm)	Anteil (%)	Material
Schrauben (23 Stück)		6	1,0%	Stahl
Kugellagerzylinder		5	0,8%	Stahl
Metallring des Spindelmotors		5	0,8%	Stahl
Kupferdrähte		3	0,5%	Kupfer
Kupferspule		3	0,5%	Kupfer
Magnetschicht (Magnetring) des Spindelmotors		2	0,3%	Sintermetallmagnet
Flexible Leiterplatte mit Stecker (9,88cm ²)		1,7	0,3%	Diverse
Schutzfolie; Anti-Staub; Gummi-Ringe; Plastik-Teil zur Befestigung; Schutzschicht; Klebstoffe; etc.		5	0,8%	Cut-off
Summe		605	100,0%	

Detaillierte Zusammensetzung einzelner Komponenten

Die einzelnen Komponenten werden in Kategorien gruppiert. Außer vier konkreten Komponenten, die aus diversen Materialien zusammengesetzt sind, werden alle anderen Komponenten, die aus Stahl, Aluminium oder Kupfer bestehen, jeweils zusammen in einer Gruppe erfasst.

- Magnete
- Bestückte Leiterplatte
- Festplattenmedium
- Lese-/Schreibkopf
- Aluminium-Komponenten
- Stahl-Komponenten
- Kupfer-Komponenten

Magnete

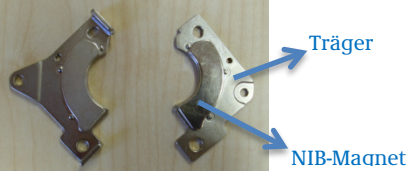

In Festplatten gibt es zwei Bereiche, in denen Magnete zum Einsatz kommen (s. Tabelle 32): Im Schwingspulenbetätiger kommt ein Neodym-Eisen-Bor-Magnet⁶⁶(NIB), und im Motor ein gesintertes⁶⁷ Ring-Magnet zum Einsatz. Zur Bestimmung des Anteils von Seltenen Erden in diesen Komponenten wird auf eine Studie von Buchert et al. (2012) zurückgegriffen, in der die Menge der Seltenen Erden in Notebooks untersucht wurde. Die Angaben der Konzentration Seltener Erden von Magneten in Notebooks stammen aus VAC (2011) (zitiert in Buchert et al. 2012).

Die Magnetmasse des Schwingspulenbetätigers besteht zu 68% aus Eisen, zu 29% aus Neodym (Nd) und Praseodym (Pr) und zu 2% aus Dysprosium (Dy) sowie zu 1% aus Bor. Bei den Ringmagneten des Spindelmotors hat Neodym einen Anteil von 29%, Pr und Dy sind darin nicht enthalten (Eisenanteil: 71%).

Buchert et al. (2012) diskutierten, dass Neodym von manchen Herstellern aus ökonomischen Gründen teilweise durch das etwas günstigere Praseodym substituiert wird. Dies ist aber laut Hatch (2011) nur bis zu einem Mischverhältnis von maximal 3:1 (Nd zu Pr) sinnvoll, da bei höheren Praseodym-Gehalten die Eigenschaften der Magnete leiden würden. In der Studie von Buchert et al. (2012) wurde das durchschnittliche Verhältnis von Neodym zu Praseodym mit 5:1 angenommen. Für die folgende Berechnung der Mengen von Nd und Pr wird dieses Verhältnis zugrunde gelegt.

Der gesinterte Magnet wird dazu vom Außenring getrennt (s. das Bild Ringmagnet in Tabelle 32).

Tabelle 32: Materialienzusammensetzung der Magnete⁶⁸

Komponenten	Bild für Magnet-Teile	Menge (g)	Material der Magnet	Menge (g)
Schwingspulenbetätiger 		16	Eisen (Fe)	10,9 Gramm
			Neodym (Nd)	$16 \times 29\% \times \frac{5}{6} = 3,87$ Gramm
			Praseodym (Pr)	$16 \times 29\% \times \frac{1}{6} = 0,77$ Gramm
			Dysprosium (Dy)	$16 \times 2\% = 0,32$ Gramm
			Bor (B)	$16 \times 1\% = 0,16$ Gramm

⁶⁶ Neodym-Eisen-Bor-Magnete haben die höchste derzeit bekannteste magnetische Energiedichte.

⁶⁷ Im Sinterverfahren werden die pulverförmigen Ausgangsmaterialien unter hohem Druck und erhöhter Temperatur zu Werkstoffen geformt.

⁶⁸ Der Stahl-Anteil wird in Abschnitt „Stahl-Komponenten“ erfasst.

Komponenten	Bild für Magnet-Teile	Menge (g)	Material der Magnet	Menge (g)
Ring des Spindelmotors 	Ringmagnet 	2	Eisen (Fe)	1,4 Gramm
			Neodym (Nd)	2x29%=0,58 Gramm
			Bor (B)	2x1%=0,02 Gramm

Bestückte Leiterplatte

Nach Herstellerangaben⁶⁹ sind für 2,5“-Festplatten 4-Lagen-Leiterplatten und für 3,5“-Festplatten 4- bis 6-lagige Leiterplatten möglich. Die Typen der anderen mikroelektronischen Komponenten, z.B. Dioden und Widerstände, werden identifiziert und in Stückzahlen den jeweiligen Komponentengruppen zugeordnet. Bei den verschiedenen Komponentengruppen spielen verschiedene Parameter für den Produktionsaufwand eine Rolle. Beispielsweise ist die Die-Fläche bei Mikrochips ein entscheidender Parameter (für eine detaillierte Erklärung über Die-Fläche s. Prakash et al. 2013). Für die Die-Fläche der ICs des Referenzproduktes liegen die vom Fraunhofer-IZM gemessenen Werte zugrunde. Das Fraunhofer-IZM hat 2013 in einer Studie im Rahmen des “LCA to go“-Projektes die Die-Fläche für 3 Mikrochips (Prozessor, Motor-Kontroller, Speicherchips) einer 2,5“-Festplatte gemessen. Gemäß diesen Angaben sind die Die-Flächen für Prozessor und Speicherchips identisch mit denen einer 3,5“-Festplatte. Allerdings ist die Packaging-Fläche des Mikrochips für den Motor-Kontroller der 2,5“-Festplatte und der 3,5“-Festplatte unterschiedlich. Die Die-Fläche der 2,5“-Festplatte liegt bei 11,3% der Packaging-Fläche. Mit dieser prozentuellen Angabe wird die Die-Fläche des Motor-Kontrollers für die 3,5“-Festplatte berechnet.

Die genauen Angaben für alle Komponenten sind in Tabelle 33 aufgeführt. Die Gewichte der anderen Komponenten wurden anhand eigener empirischer Daten geschätzt.

Tabelle 33: Die mikroelektronischen Komponenten auf der Hauptleiterplatte mit ihrer wichtigen Parametern

Gruppe	Komponente ⁷⁰	Stück	Parameter	Menge	Summe
Leiterplatte	unbestückte Leiterplatte	1	Lagenanzahl: 4-6	Fläche: 42,1 cm ²	Fläche: 42,1 cm ²
Mikrochips	Prozessor, Marvell	1	Packaging: QUAD (14mmx14mm);	Die-Fläche: 37,1 mm ² (Fraunhofer IZM: gemessen in 2013)	Die-Fläche: 37,1 mm ²
	Chip für Motor-Kontroller, Smooth	1	Packaging: QUAD/LQFP or TQFP (10mmx10mm);	Die-Fläche: 11,3 mm ² (berechnet nach Angaben von Fraunhofer IZM für 2.5“-Festplatte)	Die-Fläche: 27,5 mm ²

⁶⁹ Alle Eingaben von Herstellern, die vertraulich sind, werden hier vereinfacht als „Herstellerangaben“ dokumentiert.

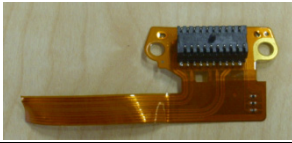
⁷⁰ Bei denjenigen Komponenten, für die in der Datenbank ecoinvent 3 Datensätze zu Vorketten verfügbar sind, ist dies mit dem entsprechenden Namen in Klammern zusätzlich vermerkt.

Gruppe	Komponente ⁷⁰	Stück	Parameter	Menge	Summe
	Speicher, Winbond	1	Packaging: TSOP II (22mmx10mm);	Die-Fläche: 14,7 mm ² (Fraunhofer IZM: gemessen in 2013)	
	Chip	1	3mm x 1mm;	Die-Fläche: 1,5 mm ² (eigene Annahme: 50% der Packaging-Fläche)	
Widerstand	Widerstand, mittel (SMD-Typ)	4	Gewicht (g/Stück): 0,002	0,007 g	0,071 g
	Widerstand, klein (SMD-Typ)	46	Gewicht (g/Stück): 0,001	0,064 g	
Keramik-Kondensatoren	Kondensator, groß (SMD-Typ)	4	Gewicht (g/Stück): 0,018	0,070 g	0,161 g
	Kondensator, mittel (SMD-Typ)	10	Gewicht (g/Stück): 0,002	0,020 g	
	Kondensator, klein (SMD-Typ)	51	Gewicht (g/Stück): 0,001	0,071 g	
Transistor	Transistor (SMD-Typ)	2	Gewicht (g/Stück): 0,112	0,224 g	0,224 g
Transformator	Induktor (Ringkerndrossel-Typ)	3	Gewicht (g/Stück): 0,064	0,192 g	0,192 g
Diode	Diode, groß (SMD-Typ)	2	Gewicht (g/Stück): 0,056	0,112 g	0,128 g
	Diode, klein (SMD-Typ)	2	Gewicht (g/Stück): 0,008	0,016 g	
Anschluss	Kontakte	1	Gewicht (g/Stück): 0,08	0,08 g (Fraunhofer IZM: gemessen in 2013)	0,08 g
Sensor	Shock Sensor ⁷¹	1	Gewicht (g/Stück): 0,02	0,02 g	0,02 g
SATA-Stecker	Stecker	1	Gewicht (g/Stück): 6	6 g (Fraunhofer IZM: gemessen in 2013)	6 g

Auf der Festplatte befindet sich noch eine kleine flexible Leiterplatte (s. Bild in Tabelle 34, unten), auf der es nur eine Komponente, den Steckverbinder, gibt. Ein kleiner Teil der flexiblen Leiterplatte ist mit dem Lese-/Schreibkopf verbunden. Weil dieser Teil schwer vom Lese-/Schreibkopf getrennt werden kann, wird er zusammen mit diesem dargestellt (s. Abschnitt „Lese-/Schreibkopf“, S. 101).

⁷¹ Von Experten im durchgeführten Expertenworkshop bzw. Herstellern wurde der Hinweis gegeben, dass die Herstellung des Schock-Sensors mit der Herstellung eines Kondensators für AP4 annähernd bilanziert werden kann.

Tabelle 34: Parameter für die flexible Leiterplatte

Komponente	Menge
Flexible Leiterplatte	
Flexible Leiterplatte (Area)	9,9cm ²
Flexible Leiterplatte (Gewicht)	0,37 g (Fraunhofer IZM, gemessen: 2013)
Steckverbinder	1,36 g (Fraunhofer IZM, gemessen: 2013)
	Davon 0,86 g Kupfer
	Davon 0,54 g PA66

Festplattenmedium

Eine Festplatte mit einem Formfaktor von 3,5“ ist mit dem aluminiumbasierten Medium und eine von 2,5“ ist mit dem glasbasierten Medium ausgestattet. Neben dem Hauptmaterial Aluminium oder Glas beinhalten die Medien noch andere Metalle.

Die 3,5“-Festplatte ist mit drei aluminiumbasierten Festplattenmedien ausgestattet (s. Abbildung 14). Laut der Herstellerinformation im Expertenworkshop werden aktuell nicht mehr 3 Medien für 1-TB-Festplatten verbaut. Mittlerweile wird dafür nur noch ein Medium benötigt (bei 3,5-Zoll-Festplatten). Allerdings hat diese Entwicklung einen gewissen Stillstand erreicht und noch mehr Kapazität auf einem einzigen Medium ist momentan nicht in Sicht. Außerdem kommt es auch gelegentlich vor, dass eine Festplatte für 1,5 TB mit 3 Medien in die Produktion geht, dort aber zu viele Defekte aufweist, sodass ein Medium von der Firmware deaktiviert wird.

Das Gewicht der Festplattenmedien im 3,5-Zoll-Formfaktor beträgt 94 g. Eine genaue Aufschlüsselung der Materialzusammensetzung für die Festplattenmedien ist ohne Laboruntersuchung nicht möglich. Aus diesem Grund werden die Angaben über die Materialzusammensetzung des Festplattenmediums vom Hersteller übernommen. Es liegen zwei detaillierte Listen vom Hersteller vor, jeweils für aluminiumbasierte und glasbasierte Medien (s. Tabelle 35 und Tabelle 36). Die Daten beziehen sich jeweils auf ein Medium. Das Gewicht pro Medium für eine 3,5“-Festplatte beträgt 23 g (s. Tabelle 35). Daher wird das gesamte Gewicht der untersuchten Festplatte laut aktuellen Herstellerangaben von 2013 entsprechend adjustiert (s. Fußnote 65).

Die Festplattenmedien werden in den Produktionsstätten des Hersteller produziert, deshalb ist der jeweilige Produktionsaufwand bereits in den Produktionsdaten des Herstellers berücksichtigt (genaue Beschreibung s. Abschnitt „Produktionsaufwand“ (S. 103).

Tabelle 35: Materialienzusammensetzung eines aluminiumbasierten Mediums (Quelle: Herstellerangaben 2013)

Al-basierte Medien	Menge (g/Medium)	Anteil
Aluminium	21,24	92,2%
Nickel	1,03	4,5%
Magnesium	0,72	3,13%
Phosphor	0,0300	0,130%
Kobalt	0,0028	0,012%

Al-basierte Medien	Menge (g/Medium)	Anteil
Ruthenium	0,0019	0,008%
Chrom	0,0012	0,005%
Tantal	0,0009	0,004%
Platin	0,0008	0,003%
Eisen	0,0008	0,003%
Titan	0,0007	0,003%
Bor	0,0004	0,002%
Zirkonium	0,0002	0,001%
Kohlenstoffe	0,0002	0,001%
Perfluorpolyether	0,00003	0,0001%
kristallines Siliziumdioxid	0,00002	0,0001%
Molybdän	0,00002	0,0001%
Silizium	0,00002	0,0001%
Titanium(IV) oxide	0,00001	0,00004%
Kupfer	0,00001	0,00002%
Summe	23,03	100%

Tabelle 36: Materialienzusammensetzung eines glasbasierten Mediums (Quelle: Herstellerangaben 2013)

Glasbasierte Medien	Menge (g/Medium)	Anteil
kristallines Siliziumdioxid	3,17	66,8%
Siliziumdioxid	1,33	28,1%
Al ₂ O ₃	0,23	4,9%
Kobalt	0,00122	0,026%
Ruthenium	0,00092	0,019%
Tantal	0,00038	0,0080%
Chrom	0,00032	0,0068%
Platin	0,00031	0,0065%
Eisen	0,00018	0,0038%
Nickel	0,00016	0,0033%
Titan	0,00015	0,0032%
Zirkonium	0,00012	0,0025%
Kohlenstoffe	0,00004	0,0008%
Molybdän	0,000027	0,0006%
Palladium	0,000017	0,0004%
Perfluorpolyether	0,000013	0,0003%
Bor	0,000013	0,0003%
Kupfer	0,000013	0,0003%
Silizium	0,00001	0,0002%
Sauerstoff	0,00001	0,0002%

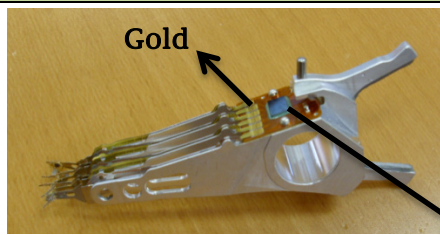
Glasbasierte Medien	Menge (g/Medium)	Anteil
TiO ₂	0,0000067	0,0001%
Wolfram	0,0000067	0,0001%
Vanadin	0,0000067	0,0001%
Perfluorpolyoxyalkane	0,000005	0,0001%
Summe	4,74	100%

Lese-/Schreibkopf

Der Lese-/Schreibkopf besteht hauptsächlich aus Aluminium. Eine wichtige Komponente ist ein Mikrochip (s. das Bild in der Tabelle 37). Der Chip wird auf Englisch als „preamplifier“ oder „preamp“ bezeichnet (Rubtsov 2009) und dient als Verstärker des Signals vom Lese-/Schreibkopf zur Leiterplatte.

Darüber hinaus befindet sich auf der flexiblen Leiterplatte des Preamplifiers noch Gold. Die Goldmenge wird auf Basis von Dichte und Volumen berechnet und beträgt 3 Mikrogramm, eine Angabe, die hinsichtlich des Ressourcenaspekts wichtig ist.

Tabelle 37: Komponentenzusammensetzung des Lese-/Schreibkopfs

Komponente	Menge
Lese-/Schreibkopf (Foto: Öko-Institut)	
Lese-/Schreibkopf	8 g Aluminium 0,000003 g Gold (Abschätzung: Fläche: 31,5 mm ² ; Dicke: 5nm; Dichte ⁷² : 19,3g/cm ³)
Mikrochips	16,4 mm ²

Beim Betrachten der Spitze des Lese-/Schreibkopfs erkennt man einen Tragrahmen, der auf English HGA (head gimbal assemblies) genannt wird. Ein schwarzer Chip auf der Spitze des Tragrahmens (HGAs) wird im Englischen als „Slider“ bezeichnet. „Slider“ ist die Stelle, an der Lesen und Schreiben tatsächlich stattfinden.




Tragrahmen und Slider werden vom Festplatter-Hersteller selber produziert, deshalb ist der jeweilige Produktionsaufwand bereits in den Produktionsdaten des Herstellers berücksichtigt.

⁷² Quelle: http://de.wikibooks.org/wiki/Tabellensammlung_Chemie/_Dichte_fester_Stoffe

Aluminium-Komponenten

Tabelle 38 fasst alle Aluminium-Komponenten zusammen. Sie machen insgesamt 46% des gesamten Gewichts der Festplatte aus. Der untere Deckel (s. Bild in der nachfolgenden Tabelle) dominiert mit einem Anteil von 43% des gesamten Gewichts. Der schwarze Überzug ist farblich eloxiert, die schwarze Eloxal-Schicht wird vernachlässigt.








Tabelle 38: Zusammengefasste Aluminium-Komponenten

Aluminium-Komponenten	Bild	Gramm/HDD
Gehäuse: Unterer Deckel (Schwarz)		271
Motoringe		7
Aluminium-Teil zwischen Platten		14
Summe Aluminium-Komponenten		292
Gesamtgewicht Festplatte		605
Anteil der Aluminium-Komponenten		48%

Stahl-Komponenten

Tabelle 39 fasst alle Stahl-Komponenten zusammen. Sie machen insgesamt 29% des gesamten Gewichts aus.



Tabelle 39: Zusammengefasste Stahl-Komponenten

Stahl-Komponenten	Bild	Gramm
Gehäuse: Oberer Deckel		87
Motor		21
Kugellagerzylinder		5
Metallring (Magnet Ring)		5
Spulenring in Motor (Grün)		6
Schwingspulenbetätiger für Neodym-Magnete (2 Stück)		54
Schrauben (23 Stück)		6
Summe Stahl-Komponenten		184
Gesamtgewicht Festplatte		605
Anteil der Stahl-Komponenten		30%

Kupfer-Komponenten

Tabelle 40 fasst alle Kupfer-Komponenten zusammen. Sie machen insgesamt 1% des gesamten Gewichts aus. Anzumerken ist, dass Isolierungen und Lacküberzüge der Kupferdrähte vernachlässigt wurden.

Tabelle 40: Zusammengefasste Kupfer-Komponenten

Kupfer-Komponenten	Bild	Gramm/HDD
Kupferdrähte		3
Kupferspule		3
Summe Kupfer-Komponenten		6
Gesamtgewicht		605
Anteil der Kupfer-Komponenten		1%

Produktionsaufwand bei den Herstellern einer durchschnittlichen Festplatte

Wie schon in Abschnitt 4.2.1 erwähnt sind Western Digital mit Hitachi GST sowie Seagate mit Samsung die weltweit größten Hersteller von Festplatten. Die Ermittlung des Produktionsaufwands beruht auf Publikationen von Western Digital und Seagate und auf Angaben von Experten im durchgeführten Expertenworkshop bzw. Herstellerangaben.

Die Festplattenhersteller beziehen Komponenten zum einen von ihren Lieferanten, zum andern haben sie aber auch eigene Fertigungsprozesse. Um den Produktionsaufwand bei der Fertigung von Festplatten zu erfassen, ist es vor allem wichtig zu wissen, welche Prozesse von den Herstellern der Festplatte selber durchgeführt werden.

Die Produktionsprozesse bei den Festplattenherstellern (Gate-to-Gate) umfassen die Endmontage des Produktes sowie die Produktion der Komponenten Medien, Slider und HGAs (s. Abschnitte Festplattenmedium und Lese-/Schreibkopf).

Nachfolgend werden die aus den Herstellerangaben bzw. in der Öffentlichkeit frei zugänglicher Literatur ermittelten Input- und Outputdaten näher diskutiert.

Inputdaten: Stromverbrauch und anderer Energieverbrauch

Western Digital (WD) weist in seinem Umweltbericht (Western Digital 2012) die Treibhausgasemissionen aus dem Stromverbrauch (518.742 t CO_{2e} / a) in verschiedenen Produktionsländern im Jahr 2011 aus. Die für die Berechnung zugrunde gelegten länderspezifischen Emissionsfaktoren für den Strommix wurden ebenfalls im Umweltbericht angegeben, so dass der Stromverbrauch mithilfe der länderspezifischen Emissionsfaktoren berechnet werden konnte. Die genauen Daten des länderspezifischen Stromverbrauchs und ihre Emissionsfaktoren für die Strombereitstellung werden in Tabelle 41 dargestellt. Im Rahmen des Projektes LCA to go (2013) wurde auf Basis des Umweltberichts vom Western Digital (Western Digital 2012) die Treibhausgasemissionen bezüglich Strom nach Produktionsstandorten und den jeweils durchgeführten Prozessen analysiert. Die Aufschlüsselung der Prozesse ist nötig, da die verschiedenen Parameter für den Produktionsaufwand in der Montage der HDD und in der Produktion der Komponenten Medien, Slider und HGAs eine wichtige Rolle spielen. Deshalb ist diese

Information für die untersuchte Festplatte und für die Diskussion der Skalierbarkeit der Datensätzen notwendig (s. Abschnitt „Entscheidende Parameter für den Stromverbrauch in der Produktion der Leiterplatten bei den Herstellern“, S. 109).

Tabelle 41: Ermittlung des Stromverbrauchs nach Prozessen auf Basis der THG-Emissionen von Western Digital

		GWP aus Strom (t CO ₂ e)	Emissionsfaktor der Strombereitstellung (kg CO ₂ e/kWh)	Stromverbrauch im Bilanzjahr 2011 (MWh)
Prozess	Quelle Land	Schischke et al. 2012	Western Digital 2012	Eigene Berechnung
Produktion der Medien, Slider und HGAs	Malaysia	138.249	0,56	248.203
	Singapore	30.827	0,53	58.606
	USA	85.353	0,33	259.432
	Thailand	117.888	0,53	222.430
Montage und Test der HDD	Thailand	55.074	0,53	103.523
	Malaysia	91.351	0,56	164.005
Summe				1.056.199

Western Digital hat im Bilanzjahr 2011 207 Millionen HDDs ausgeliefert (LCA to go 2013). Die ermittelten Stromdaten werden entsprechend durch die Anzahl der produzierten HDD dividiert. So ergibt sich der Stromverbrauch für die Fertigung einer durchschnittlichen HDD (ohne Differenzierung von Formfaktoren und anderen technischen Parametern wie Speicherkapazität) (s. Tabelle 42).

Tabelle 42: Stromverbrauch für die Fertigung einer durchschnittlichen HDD auf Basis der Daten von Western Digital (Western Digital 2012)

Inputname	Fertigungsaufwand (kWh/HDD)	Anteil
Strom	5,10	
davon		
Produktion der Medien, Slider und HGAs	3,81	75%
Montage und Test	1,29	25%

Außer Strom werden noch fossile Brennstoffe eingesetzt. Western Digital (WD) weist in seinem Umweltbericht (2012) die Treibhausgasemissionen aus dem Einsatz von fossilen Brennstoffen (6203 t CO₂e) im Jahr 2011 aus (Western Digital 2012). Leider sind die für die Berechnung zugrunde gelegten Emissionsfaktoren der jeweils verwendeten Energieträger nicht angegeben. So ist ein exaktes Zurückrechnen auf die Verbrauchsmenge nicht möglich. Daher werden die nach Energieträger differenzierten Emissionsfaktoren aus der Datenbank GEMIS 4.7 zugrunde gelegt (s. Tabelle 43), um die Verbrauchsmenge bezogen auf ein Jahr näherungsweise zurückzurechnen. Es ist davon auszugehen, dass keine große Abweichung von den tatsächlich verwendeten Emissionsfaktoren besteht.

Die Berechnung der Verbrauchsmenge der Brennstoffe bezogen auf eine durchschnittliche Festplatte beruht auf dem gesamten Jahresverbrauch und der Verkaufsmenge im Jahr (Tabelle 44).

Tabelle 43: Ermittlung der Verbrauchsmenge der fossilen Brennstoffe pro Jahr

	GWP-Werte (t CO ₂ e)	Emissionsfaktor (kg CO ₂ e/kWh)	Verbrauch im Bilanzjahr 2011 (MWh)
Quelle	Western Digital 2012	GEMIS 4.7	Eigene Berechnung
Erdgas	4.989	0,25 ⁷³	19.580
Diesel	331	0,30 ⁷⁴	1.099
Benzin	2	0,30 ⁷⁵	7
Flüssiggas (LPG: Liquefied Petroleum Gas)	881	0,26 ⁷⁶	3.388

Neben den Daten aus Western Digital (2012) können auch die Produktionsdaten von Seagate nach deren Jahresbericht bzw. CDP-Bericht umgerechnet werden. Seagate verbrauchte im Jahr 2011 1.547.867 MWh Strom und verkaufte 199 Millionen Stück HDD (CDP 2012; Seagate 2012). Die Verbrauchsmenge der anderen Energieträger Erdgas, Propan und Heizöl werden ebenfalls direkt im CDP-Bericht 2012 angegeben, so dass man die Verbrauchsmenge für die Fertigung von einem Stück HDD ausrechnen kann.

Eine Zusammenstellung des Energieverbrauchs bei Western Digital (2012) und Seagate ist in Tabelle 44 dargestellt. Es ist zu betonen, dass die Daten von Western Digital (2012) und Seagate nicht absolut vergleichbar sind, da sie verschiedene Festplatten fertigen, die unterschiedliche technische Parameter haben, z.B. Kapazitäten und Anzahl der Medien. Solche technische Parameter sind auch entscheidend für den Produktionsaufwand (s. Abschnitt „Entscheidende Parameter für den Stromverbrauch in der Produktion der Leiterplatten bei den Herstellern“, S. 109).

Tabelle 44: Zusammenstellung des Energieverbrauchs bei Western Digital (2012) und Seagate (Daten bezogen auf die Fertigung einer durchschnittlichen HDD, d.h. ohne Differenzierung von Formfaktoren und andern Technikparametern)

WD			Seagate		
Quelle: umgerechnet auf Basis der Daten des Umweltberichts von WD (Western Digital 2012)			Quelle: umgerechnet auf Basis der Daten des CDP Berichts 2012 von Seagate (CDP 2012)		
Inputname	Menge	Einheit	Inputname	Menge	Einheit
Strom	5,10	kWh/HDD	Strom	7,78	kWh/HDD
Sub-Summe der Brennstoffe	0,12	kWh/HDD	Sub-Summe der Brennstoffe	0,43	kWh/HDD
- Erdgas	0,095	kWh/HDD	- Erdgas	0,39	kWh/HDD
- Diesel	0,005	kWh/HDD	- Propan	0,025	kWh/HDD
- Benzin	0,00003	kWh/HDD	- Heizöl	0,01	kWh/HDD
- Flüssiggas (LPG: Liquefied Petroleum Gas)	0,016	kWh/HDD	-	-	-

⁷³ Der verwendete Datensatz: Raffinerie-Gas-Kessel-DE-2010 (Endenergie)

⁷⁴ Der verwendete Datensatz: Öl-leicht-Kessel-EU-2010 (Endenergie)

⁷⁵ Angenommen wie Diesel

⁷⁶ Der verwendete Datensatz: FlüssiggasHeizung-DE-2010 (Endenergie)

Inputdaten: Chemikalienverbrauch

Laut Herstellerangaben sind die wesentlichen verwendeten Chemikalien bei der Produktion der Festplatten Isopropylalkohol (IPA: auch als 2-Propanol oder Isopropanol genannt) und Perfluor-pentan (Summenformel $C_5H_2F_{10}$). IPA wird für den Reinigungsprozess verwendet. Laut Herstellerangabe beträgt die Verbrauchsmenge des IPAs ca. 0,5 Gramm pro HDD, unabhängig vom Formfaktor der Festplatte.

Da Perfluor-pentan von der Abgasreinigung nicht abgeschieden wird, wird angenommen, dass die emittierte Menge gleich der eingesetzten Menge ist.

Folgende Chemikalien werden laut Herstellerangaben zusätzlich verwendet, allerdings unterliegen die konkreten Mengenangaben der Vertraulichkeit.

- HFC-227ea
- R 404a
- R 134a
- R 508B
- R 123
- Flüssiges CO_2
- SF_6
- Hexan

Da diese Informationen vertraulich sind, ist die jeweils absolut verbrauchte Menge der obigen Chemikalien nicht erfassbar.⁷⁷ Das bedeutet, dass der Aufwand zur Herstellung der oben aufgelisteten Prozesschemikalien im Arbeitspaket 3 (Kapitel 5), in dem eine ganzheitliche Bilanzierung durchgeführt werden soll, nicht berücksichtigt werden kann. Allerdings sind die von Chemikalien verursachten direkten Emissionen in Produktionsdaten erfasst.

Inputdaten: Wasserverbrauch

Die Ermittlung des Wasserverbrauchs basiert auf Angaben von Western Digital im Rahmen der Berichtserstattung für CDP (CDP 2012) und auf dem Jahresbericht von Seagate (Seagate 2012). Daraus wird der Wasserverbrauch in Liter für die Fertigung pro HDD berechnet. Ein durchschnittlicher Wert mit 47,6 Liter für die Fertigung pro HDD wird für den ProBas-Datensatz zugrunde gelegt. Der große Wasserbedarf stammt laut Experteninput wesentlich aus der mechanischen Behandlung in der Slider-Produktion. Außerdem umfasst der Wasserverbrauch die Menge, die in Kühlanlagen und zur Luftreinigung eingesetzt wird (laut der Information eines Herstellers).

⁷⁷ Laut Auskunft von einem anderen Hersteller bewegen sich die eingesetzten Mengen bei einigen Milligramm pro HDD.

Tabelle 45: Ermittlung des durchschnittlichen Wasserverbrauchs

Quelle	Verkaufszahlen in 2011	Wasserverbrauch pro Jahr	Wasserverbrauch (Liter/HDD)
Western Digital CDP-Bericht 2012 (CDP 2012)	207 Million HDD	7493 Megaliter	36,2
Seagate Jahresbericht 2012 (Seagate 2012)	199 Million HDD	9900 Megaliter, davon werden 1000 Megaliter recycled	44,7
Herstellerangabe 2013	-		62,0
Mittelwert			47,6

Emissionsdaten: klimarelevante prozessspezifische direkte Emissionen

Der Umweltbericht 2012 von Western Digital (Western Digital 2012) gibt die direkten Treibhausgasemissionen (THG) resultierend aus den Emissionen von NF₃, CF₄ und SF₆ an (s. Tabelle 46). Auf Basis der Werte der THG-Emissionen und der Charakterisierungsfaktoren des IPCC (2007) wurde auf die emittierte Menge der direkten Emissionen pro Jahr bzw. für die Fertigung pro HDD zurückgerechnet (s. Tabelle 46).

Tabelle 46: Ermittlung der klimarelevanten prozessspezifischen direkten Emissionen (Quelle: Western Digital 2012)

Direkte Emissionen	Wirkungsspezifisch gewichtete THG-Emissionen (Western Digital 2012)	Charakterisierungsfaktoren (IPCC 2007)	Emissionen der einzelnen Substanzen pro Jahr (eigene Berechnung)	Emissionen der einzelnen Substanzen für die Fertigung pro HDD (eigene Berechnung)
Einheit	t CO ₂ e / a	t CO ₂ e/t	kg/a (direkte Emissionen)	kg/HDD
Schwefelhexafluorid (SF ₆)	114	22800	5,0	2,42x10 ⁻⁸
Tetrafluormethan (CF ₄)	12	7390	1,6	7,84x10 ⁻⁹
Stickstofftrifluorid (NF ₃)	28	17200	1,6	7,86x10 ⁻⁹

Ein anderer Hersteller gibt die direkte CO₂e-Emission (Scope 1) an mit der Aussage, dass der Hauptverursacher die Chemikalie Perfluoropentan ist. Mit Hilfe des entsprechenden Charakterisierungsfaktors wird auf die Emission von Perfluoropentan zurückgerechnet.

Tabelle 47: Ermittlung der klimarelevanten prozessspezifischen direkten Emissionen (Quelle: Herstellerangaben 2013)

Direkte Emissionen	Wirkungsspezifisch gewichtete THG-Emissionen (Western Digital 2012)	Charakterisierungsfaktor (IPCC 2007)	Emissionen der einzelnen Substanzen für die Fertigung pro HDD (eigene Berechnung)
Einheit	kg / HDD	t CO ₂ e/t	kg/HDD
Perfluoropentan	1,64	1640	0,00100

Darüber hinaus gibt ein anderer Hersteller die Daten über VOC-Emissionen (Flüchtige organische Verbindungen) an. Wir gehen davon aus, dass Perfluorpentan nicht in der Sammelgruppe VOC-Emissionen summiert wurde. Die Eingaben sind nach Prozessen für die Produktion der Slider, Medien und HGAs und für die Montage differenziert aufgeführt, so dass eine Differenzierung nach Formgrößen vorgenommen kann. VOC ist eine Gruppe verschiedener flüchtiger organischer Verbindungen. Leider ist ein weiteres Aufschlüsseln nach Einzelsubstanzen nicht möglich, so dass die direkten Emissionen lediglich als Summengröße VOC angegeben werden können.

Tabelle 48: VOC-Emissionen nach Formgrößen (Herstellerangaben: 2013)

VOC (kg/HDD)	2,5"-Festplatte	3,5"-Festplatte
In Produktion der Media, Slider, HGA	0,0012	0,0018
In Montage	0,0006	0,0007
Summe	0,0018	0,0024
Durchschnittlicher Wert	0,0021	

Zusammengefasst werden prozessbedingte direkte Emissionen in der folgenden Tabelle dargestellt.

Tabelle 49: Zusammenfassung der direkten Emissionen für die Fertigung pro durchschnittliche HDD

Outputflüsse	kg/HDD
Schwefelhexafluorid (SF ₆)	2,42E-08
Tetrafluormethan (CF ₄)	7,84E-09
Stickstofftrifluorid (NF ₃)	7,86E-09
Perfluorpentan	1,00E-03
VOC	2,13E-03

Outputdaten: Abwasser

Die Angabe zur Abwassermenge von 9,6 Liter für die Fertigung pro HDD stammt von einem Hersteller (Herstellerangaben 2013). In den Umweltberichten der anderen Hersteller sind leider die Abwassermengen nicht aufgeführt.

Wird die Abwassermenge (ca. 10 Liter für die Fertigung pro HDD) mit dem Wasserverbrauch auf der Input-Seite (ca. 47,6 Liter für die Fertigung pro HDD) verglichen, ergibt sich eine große Abweichung. Laut der Information eines Herstellers lässt sich die Differenz dadurch erklären, dass das Wasser während des Produktionsprozesses verdunstet.

Outputdaten: Abfälle

Die Menge der Abfälle wird auf Basis des Jahresberichts von Seagate bestimmt (Seagate 2012). Die Menge der gefährlichen und unspezifischen Abfälle wird für das Finanzjahr 2011 bezogen auf ein Jahr angegeben. Daraus wird die Menge pro Festplatte berechnet. Western Digital macht in ihrem Umweltbericht keine Angaben über Abfälle.

Tabelle 50: Die Menge der Abfälle bei der Produktion der Hersteller der Festplatten (Quelle: Seagate 2012)

Outputflüsse	kg/HDD (FY2011)
Gefährliche Abfälle	0,11
Unspezifische Abfälle	0,09

Outputdaten: Produktionsverlust

Nach Information der Hersteller kann man den Produktionsverlust aus Kostengründen vernachlässigen. Die Materialien und Komponenten werden so weit als möglich wiederverwendet oder weiterverwertet. Daher wurde der Produktionsverlust nicht in diesem Arbeitspaket berücksichtigt.

Entscheidende Parameter für den Stromverbrauch in der Fertigung der Festplatten bei den Herstellern

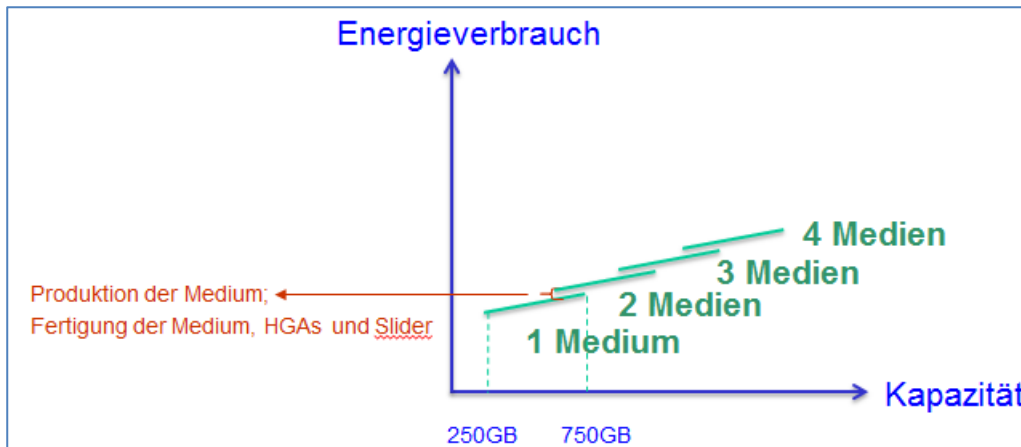
Die entscheidenden Parameter für den Stromverbrauch bei der HDD-Fertigung werden auf der Basis der Kenntnisse aus dem Expertenworkshop und der Herstellerangaben wie folgt identifiziert:

- Der Stromverbrauch in der Montage hängt weniger von der Anzahl der Medien ab als vielmehr von der Speicherkapazität der Festplatten aufgrund des sehr langwierigen 100%-Tests. Je größer die Kapazität, desto länger der Test, desto höher der Stromverbrauch.
- Der Stromverbrauch in der Fertigung von Slidern und HGA ist dagegen abhängig von der Anzahl der Medien. Je höher die Anzahl der Medien, desto mehr HGA und Slider werden benötigt, so dass sich der Stromverbrauch in der Fertigung entsprechend erhöht.

Eine grafische Darstellung dieser Zusammenhänge wird in Abbildung 16 vorgenommen. Es werden zwei Festplatten mit jeweils einer Kapazität von 250 GB und 750 GB angenommen. Beide haben aber nur ein Medium, d.h. sie haben hinsichtlich der Fertigung der HGAs und der Slider den gleichen Energieaufwand. Allerdings führen die unterschiedlich hohen Speicherkapazitäten zu unterschiedlichen Energieverbräuchen im Test während der Montage, sodass die Festplatte mit einer großen Kapazität mehr Energie verbraucht als die andere mit einer kleinen Kapazität.

Bei Festplatten, die zwar über die gleiche Speicherkapazität verfügen, aber eine unterschiedliche Anzahl an Medien haben, ergeben sich durch den Produktionsaufwand für die Medien, die Slider sowie die HGAs die in Abbildung 16 dargestellten „Sprünge“ im Energieaufwand. Änderungen in der Festplattenkapazität wirken sich allerdings stärker auf den Energieaufwand aus als die Anzahl der verwendeten Medien.

Abbildung 16: Verhältnisse zwischen Energieverbrauch und Anzahl der Medien sowie die Kapazität



Zusammengefasst können die Prozesse bei der HDD-Fertigung in zwei Sektoren eingeteilt werden:

- a) Fertigung der HGAs und Slider,
- b) Endmontage und Test.

Im Endmontageprozess ist die Speicherkapazität der entscheidende Parameter für den Energieverbrauch. Die Produktion der Medien, Slider und HGAs hat allerdings einen deutlich höheren Stromverbrauch als der Stromverbrauch im Endmontageprozess (inkl. Test) (Tabelle 51).

Umrechnung des Stromverbrauchs auf die Fertigung der untersuchten Festplatte (3,5"-Festplatte mit einer Speicherkapazität von 1TB und 3 Medien)

Die bis jetzt erfassten Produktionsdaten beziehen sich nur auf die Fertigung einer durchschnittlichen HDD (ohne Differenzierung von Formgrößen, Kapazitäten und Anzahl der Medien). Des Weiteren sollen die Daten für die untersuchte Festplatte mit seinen spezifischen technischen Parametern bereitgestellt werden.

Tabelle 51 zeigt den Stromverbrauch differenziert nach Prozessen, in denen verschiedene technische Parameter den Stromverbrauch bestimmen.

Die in der Tabelle 51 dargestellte Aufteilung des Stromverbrauchs wurde auf Basis der Herstellerangaben vorgenommen.

Tabelle 51: Durchschnittlicher Stromverbrauch nach Angaben verschiedener Hersteller, differenziert nach Prozessen und bezogen auf eine durchschnittliche HDD

Strom (Fertigung pro durchschnittliche HDD)	6,44	kWh/HDD
davon		
Montage und Test	1,85	kWh/HDD
Produktion der Medien, Slider und HGAs	4,59	kWh/HDD

In Tabelle 52 werden die durchschnittliche Kapazität und durchschnittliche Anzahl der Medien dargestellt, weil der Stromverbrauch in der Montage und in der Produktion der Medien, Slider und HGAs von unterschiedlichen Parametern bestimmt wird. Somit besteht eine Grundlage, um

den Stromverbrauch in der Produktion bezogen auf die Festplatte umzurechnen. Des Weiteren wird der Stromverbrauch in den Montage- und Test-Prozessen pro GB Festplattenkapazität und der Stromverbrauch in der Produktion der Medien, Slider und HGAs pro Medium berechnet (s. Tabelle 54).

Dann wird der Stromverbrauch auf die spezifischen Parameter der untersuchten Festplatte umgerechnet. So ergibt sich für die untersuchte Festplatte mit 1 TB Speicherkapazität und 3 Medien ein Stromverbrauch von 9,03 kWh (s. Tabelle 54).

Tabelle 52: Durchschnittliche Kapazität und Anzahl des Mediums (LCA to go 2013)

Formfaktor der Festplatte	2,5"	3,5"	Mittelwert
Durchschnittliche Kapazität (Schischke et al. 2012)	375 GB	700 GB	538 GB
Durchschnittliche Anzahl der Medien (Schischke et al. 2012)	2	3	2,5

Tabelle 53: Ermittlung des spezifischen Stromverbrauchs bezogen auf den jeweils bestimmenden Parameter

Prozesse	Stromverbrauch für die Fertigung pro durchschnittliche HDD (s. Tabelle 51)	Entscheidender Parameter (s. Tabelle 52)	Spezifischer Stromverbrauch (bezogen auf den jeweils bestimmenden Parameter)
Produktion der Medien, Slider und HGAs	4,59 kWh/HDD	Anzahl des Mediums: 2,5/HDD (Mittelwert)	1,84 kWh/Medium
Montage und Test	1,85 kWh/HDD	Kapazität: 538 GB/HDD (Mittelwert)	0,0034 kWh/GB

Nur der Stromverbrauch kann nach den spezifischen Parametern der untersuchten Festplatte umgerechnet werden, da er nach Prozessen differenziert ausgewiesen wird. Für die anderen Inputflüsse wie Brennstoffverbrauch oder Wasserverbrauch und Outputflüsse, wie direkte Emissionen, werden keine Unterschiede zwischen spezifischen Festplatten gemacht, da die Daten hier nicht nach Prozessen differenziert werden können.

Tabelle 54: Ermittlung des Stromverbrauchs für die Fertigung der untersuchten Festplatte bei den Herstellern

Prozesse	Referenzprodukt mit einem Formfaktor von 3,5"	Stromverbrauch des Referenzprodukts
Produktion der Medien, Slider und HGAs	Anzahl des Mediums: 3	$= \frac{1,84kWh}{Medium} \times 3 = 5,51kWh$
Montage und Test	Kapazität: 1 TB	$= \frac{0,0034kWh}{GB} \times 1024GB = 3,52kWh$
Summe	9,03 kWh/HDD	

Information über den Transport der fertigen Produkte

Laut Herstellerangaben werden die fertigen Festplatten per Flugzeug nach Europa transportiert. Obwohl der Transport außerhalb der Systemgrenze dieses Arbeitspakets liegt, wird diese Information für die Bilanzierung im Arbeitspaket 3 (ganzheitliche Bilanzierung) benötigt.

Der Transport der Komponenten liegt ebenfalls außerhalb der Systemgrenze dieses Arbeitspakets, wird aber bei vielen generischen Datensätzen für die Modellierung der Vorketten schon mitberücksichtigt.

4.2.4 Ergebnisse der Datensätze

Die Ergebnisse des in der vorliegenden Studie beschriebenen Datensatzes werden in ProBas unter <http://www.probas.umweltbundesamt.de/php/index.php> veröffentlicht. Dieser Datensatz wird in den nachfolgenden Tabellen dargestellt.

Tabelle 55: Input- und Outputdaten für den Datensatz „Herstellung\interne 3,5"-Festplatte (1 TB; 3 Medien)“

Inputflüsse		Menge	Einheit	Outputflüsse		Menge	Einheit
Komponenten-Zusammenfassung				Produkt	1	3,5"-Festplatte (1TB; 3 Medien)	
NIB-Magnet				Luftemissionen			
	Eisen (Fe)	1,09E-02	kg	Schwefelhexafluorid (SF ₆)	2,42E-08	kg	
	Neodym (Nd)	3,87E-03	kg	Tetrafluormethan (CF ₄)	7,84E-09	kg	
	Praseodym (Pr)	7,73E-04	kg	Stickstofftrifluorid (NF ₃)	7,86E-09	kg	
	Dysprosium (Dy)	3,20E-04	kg	Perfluorpentan	1,00E-03	kg	
	Bor (B)	1,60E-04	kg	VOC	2,45E-03	kg	
Ringmagnet				Abfälle			
	Eisen (Fe)	1,40E-03	kg	gefährliche Abfälle	1,07E-01	kg	
	Neodym (Nd)	5,80E-04	kg	unspezifische Abfälle	9,40E-02	kg	
	Bor (B)	2,00E-05	kg	Abwasser			
Leiterplatte				Abwassermenge	9,60E+00	Liter	
	unbestückte Leiterplatte (Lagenanzahl: 4-6)	4,21E+01	cm ²				
	Prozessor	3,71E+01	mm ² (Die-Fläche)				
	Andere Mikrochips (für Motor-Kontroller; Speicherchips)	2,75E+01	mm ² (Die-Fläche)				
	Widerstände	7,10E-05	kg				
	Kondensatoren	1,61E-04	kg				
	Transistoren	2,24E-04	kg				
	Induktoren	1,92E-04	kg				
	Dioden	1,28E-04	kg				
	Kontakte	8,00E-05	kg				
	Shock Sensor	2,00E-05	kg				
	SATA-Stecker	6,00E-03	kg				
Flexible Leiterplatte							

Inputflüsse		Menge	Einheit	Outputflüsse	Menge	Einheit
	unbestückte Leiterplatte	9,90E+00	cm ²			
	Steckverbinder	1,36E-03	kg			
	davon Kupfer	8,64E-04	kg			
	davon PA66	5,36E-04	kg			
Lese/Schreibkopf						
	Aluminium	8,00E-03	kg			
	Gold	3,04E-09	kg			
	Mikrochip	1,64E+01	mm ² (Die- Fläche)			
Medien (Al-basiert)⁷⁸						
	Al	6,37E-02	kg			
	Nickel	3,09E-03	kg			
	Magnesium	2,16E-03	kg			
	Phosphor	9,00E-05	kg			
	Kobalt	8,40E-06	kg			
	Ruthenium	5,67E-06	kg			
	Chrom	3,50E-06	kg			
	Tantal	2,69E-06	kg			
	Platin	2,31E-06	kg			
	Eisen	2,30E-06	kg			
	Titan	1,98E-06	kg			
	Bor	1,08E-06	kg			
	Zirkonium	7,20E-07	kg			
	Kohlenstoffe	5,70E-07	kg			
	Perfluorpolyether	9,00E-08	kg			
	kristallines Siliziumdioxid	6,00E-08	kg			
	Molybdän	6,00E-08	kg			
	Silizium	6,00E-08	kg			
	Titanium(IV) oxide	3,00E-08	kg			
	Kupfer	1,50E-08	kg			
Aluminium-Komponenten						
	Gehäuse: Unterer Deckel	2,71E-01	kg			
	Motorringe	7,00E-03	kg			
	Aluminium-Teile zwischen Platten	1,40E-02	kg			

⁷⁸ Das gesamte Gewicht der Medien ist nach den aktuellen Daten gemäß den Herstellerangaben 2013 adjustiert. Es gibt daher eine Abweichung vom gemessenen Gewicht des Referenzproduktes, das 2008 produziert wurde.

Inputflüsse		Menge	Einheit	Outputflüsse	Menge	Einheit
Stahl-Komponenten						
	Gehäuse: Oberer Deckel	8,70E-02	kg			
	Motor	2,10E-02	kg			
	Metallring (Magnet Ring)	5,00E-03	kg			
	Spulenring vom Motor (Grün)	6,00E-03	kg			
	Träger	5,40E-02	kg			
	Kugellagerzylinder	5,27E-03	kg			
	Schrauben (23 Stück)	6,00E-03	kg			
Kupfer-Komponenten						
	Kupferdrähte	3,00E-03	kg			
	Kupferspule	3,00E-03	kg			
Produktionsaufwand						
	Strom	9,03E+00	kWh			
	davon in der Montage und Test	3,52E+00	kWh			
	davon in der Produktion der Slider, HGAs und Medien	5,51E+00	kWh			
	Erdgas	2,43E-01	kWh			
	Diesel	2,66E-03	kWh			
	Benzin	1,60E-05	kWh			
	Flüssiggas (LPG: Liquefied Petroleum Gas)	8,18E-03	kWh			
	Propan	1,25E-02	kWh			
	Heizöl	4,75E-03	kWh			
	Wasser	4,76E+01	Liter			
	Isopropylalkohol (IPA)	5,00E-04	kg			
	Perfluorpentan	1,00E-03	kg			

4.2.5 Datenqualitätsanalyse

Die wesentlichen Informationen und Daten, die für die Auswertung der in dieser Studie untersuchten Festplatten notwendig waren, lagen vor.

Die Komponenten und Materialien der 3,5“-Festplatte sind im Wesentlichen identifiziert, ebenso die für den Produktionsaufwand entscheidenden Parameter. Für die aluminiumbasierten Medien für 3,5“-Festplatten und die glasbasierte Medien für 2,5“-Festplatten werden die aktuellen Materialien laut Herstellerangaben für 2013 identifiziert. Die Daten repräsentieren somit den technologischen Hintergrund der Jahre 2008-2012.

Allerdings gibt es die folgenden kritischen Punkte:

- Die wesentlichen Chemikalien sind laut Herstellerangabe erfasst. Allerdings werden noch einige andere Chemikalien eingesetzt, für die keine absoluten Werte innerhalb des Vorhabens erfasst werden konnten.
- Zu den prozessspezifischen direkten Emissionen liegen Angaben von Herstellern vor, die sich allerdings im Erfassungsbereich unterscheiden und daher nicht eindeutig abgrenzbar sind. Ein Hersteller verursacht laut Umweltbericht 0,0007 kg CO₂e pro HDD, die aber nur aus den reaktiven Gasen (SF₆, CF₄, NF₃) stammen, während ein anderer Hersteller laut seines Umweltberichtes 1,64 kg CO₂e pro HDD (Scope 1) verursacht, die hauptsächlich aus der Chemikalie Perfluorpentan stammen. Ein dritter Hersteller gibt 2 g VOC-Emissionen pro HDD an, so dass ein Vergleich ohne weitere Aufschlüsselung nicht machbar ist. Dieser Aspekt benötigt eine detaillierte Betrachtung.
- Wie schon beschrieben, kann ausschließlich der Stromverbrauch nach den verschiedenen Prozessen ausgewiesen werden, so dass eine Umrechnung aus dem durchschnittlichen Wert pro HDD nach den spezifischen Parametern des Referenzproduktes möglich ist. Für die anderen Input- und Outputflüsse des für ProBas erstellten Datensatzes können somit nur Werte pro durchschnittliche Festplatte dargestellt werden, ohne Differenzierung nach Anzahl der Medien und der Speicherkapazität. Dies kann zu einer Über- oder Unterabschätzung führen, je nach Spezifikation der zu untersuchenden Festplatten.

Insgesamt kann die Datenqualität des Datensatzes als gut eingestuft werden. Die gewonnenen Daten und Kenntnisse in diesem Bericht bieten zusätzlich eine Grundlage für die weitere Verbesserung des Datensatzes sowie auch für die neue Erstellung von Datensätzen für Festplatten mit einem Formfaktor von 2,5“.

4.2.6 Diskussion der Skalierbarkeit des Datensatz

In diesem Arbeitspaket sollte für Festplatten noch geprüft werden, ob es möglich ist, mithilfe entscheidender Parameter zwischen den unterschiedlichen Konfigurationen (z.B. Gewicht und Formfaktor von 2,5“ und 3,5“ oder Variationen in der Speicherkapazität) skalierbare Datensätze auf der Basis des Referenzproduktensatzes zu erstellen.

Festplatten mit einem Formfaktor von 2,5“

Ein Datensatz für 2,5“-Festplatten lässt sich nicht auf den Datensatz für 3,5“-Festplatten skalieren.. Das liegt an folgenden Gründen:

- 2,5“-Festplatten sind mit glasbasierten Medien versehen. Wie schon dargestellt (s. Abschnitt Festplattenmedium) ist die Materialzusammensetzung eine andere als bei den 3,5“-Festplatten, die mit den aluminiumbasierten Medien versehen sind.
- Andere Komponenten sind bei den 2,5“-Festplatten sehr ähnlich wie die bei den 3,5“-Festplatten. Sie haben nur einen kleineren Umfang und weniger Gewicht. Beispielweise ist die Fläche der Hauptleiterplatte der 2,5“-Festplatte kleiner als die der 3,5“-Festplatten. Allerdings besteht keine proportionale Relation zum Gewicht (oder zu anderen Parametern, wie Formfaktor) der Festplatten. Somit kann man beispielsweise die Fläche der Leiterplatte in einer 2,5“-Festplatte nicht durch Skalierung hochrechnen. Ein anderes Beispiel sind die drei wesentlichen Mikrochips. Die „Packaging-Fläche“ der drei wesentlichen Mikrochips (s. Tabelle 33) wurde vom Fraunhofer IZM gemessen. Zwei der Mikrochips (Prozessor und Speicherchips) sind identisch für 2,5“- und 3,5“-Festplatte, der Chip

für den Motor-Kontroller hat bei den beiden Formfaktoren aber eine unterschiedliche Packaging-Fläche.

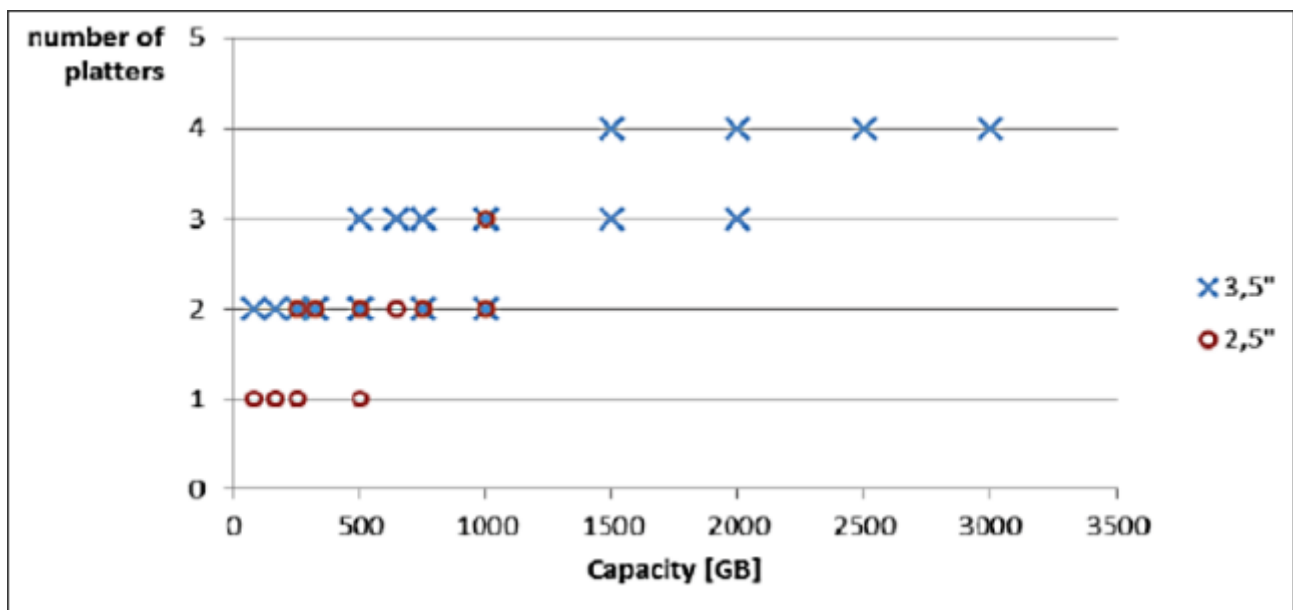
Daher müsste analog zum Vorgehen bei der Ermittlung des Datensatzes für die hier untersuchte 3,5“-Festplatte eine vollständige Analyse der verbauten Komponenten erfolgen.

3,5“-Festplatten mit anderen Kapazitäten und Anzahl der Medien

Auf der Komponentenebene ist eine Skalierbarkeit innerhalb von 3,5“-Festplatten möglich. Falls eine 3,5“-Festplatte die gleiche Kapazität wie das Referenzprodukt, aber eine unterschiedliche Anzahl an Medien hat, müssen Nutzer nur die Gewichtanteile der Medien selber anpassen. Die anderen Komponenten außer dem Medium sind wahrscheinlich sehr ähnlich wie bei dem Referenzprodukt. Falls eine 3,5“-Festplatte eine andere Kapazität als das Referenzprodukt, aber eine gleiche Anzahl der Medien hat, sollen die Komponenten für die Vorketten annähernd identisch sein. Der Unterschied liegt nur bei dem Produktionsaufwand.

Auf der Produktionsebene ist eine Skalierung ebenfalls möglich, wenn Nutzer die Anzahl der Medien ihrer zu bilanzierenden 3,5“-Festplatten kennen. Wie bereits oben dargestellt wurde, steht auf der Produktionsebene der Stromverbrauch für die Endmontage mit der Kapazität in Relation, ebenso der Stromverbrauch für die Produktion der HGAs, Slider und Medien mit der Anzahl der Medien, so dass eine Skalierung hier nicht so einfach ist. Darüber hinaus ist die Anzahl der Medien für die Anwender der hier bereitgestellten Datensätze ohne Herstellerangaben nicht einfach zu bestimmen, da hierzu das Produkt demontiert werden müsste. Hilfsweise kann hier auf die von LCA to go (2013) dargestellte Relation zwischen der Anzahl der Medien und der Speicherkapazität zurückgegriffen werden (s. folgende Abbildung), bei der 11 2,5“-Festplatten und 17 3,5“-Festplatten untersucht wurden.

Abbildung 17: Relation zwischen Anzahl der Medien und Kapazität (direkt entnommen aus Schischke et al. 2012, Figure 3-12)



Für den ProBas-Datensatz wird der Stromverbrauch in der Endmontage und in der Produktion der Slider, HGAs und Medien differenziert dargestellt, damit die Nutzer, die die Anzahl der Medien kennen, selber den Stromverbrauch mithilfe dieser Dokumentation umrechnen kön-

nen. Anzumerken ist, dass nur der Stromverbrauch nach den spezifischen Parametern umgerechnet werden kann. Für andere Input- und Outputflüsse ist eine Differenzierung nach Prozessen nicht möglich.

4.3 Datensatz für CPU

4.3.1 Beschreibung des Produktes

Ein Prozessor, auch Mikroprozessor oder CPU (Central Processing Unit) genannt, ist für die zentrale Steuerung aller Abläufe und die Verarbeitung der Daten in einem Computer zuständig. Die CPU ist ein Mikrochip, dessen Schaltkreise auf einem Halbleitersubstrat integriert sind. Mikrochips⁷⁹ werden auf hochreinem Silizium in Umgebungen mit einem hohen Reinheitsgrad⁸⁰ hergestellt. Dabei wird zwischen den sogenannten Front-End und Back-End-Prozessen unterschieden. Im Front-End-Prozess erfolgt die Fertigung der unverkapselten oder auch ungehäuteten Chips⁸¹. Dazu zählen folgende Prozessschritte:

- Beschichtung/Dünnschichtabscheidung
- Belackung
- Photolithographische Strukturierung
- Abscheidungsprozesse auf der Oberfläche/Ätzen und Lackentfernung
- Metallisierung/Dotierung
- Waferreinigung
- Ofenprozesse

Die Produktion von Chips ist eine Massenproduktion, bei der auf einer Waferscheibe mehrere hundert einzelne Chips untergebracht sind. Dabei werden immer mehrere Waferscheiben in einer Charge zusammen prozessiert. Die Waferscheiben haben einen Durchmesser zwischen 150 und 300 mm, wobei 300 mm heutiger Standard ist. Vor ungefähr 10 Jahren wechselte die Halbleiterindustrie von 200-mm- auf 300-mm-Wafer. Die nächste Fertigungsgröße mit 450 mm soll nach Sauter (2013) erst im Jahr 2015 mit einer Fertigungsanlage von Intel starten. Der Vorteil größerer Waferscheiben liegt in der höheren Anzahl gleichzeitig prozessierbarer Chips und der geringeren Verlustfläche an den Rändern. Auf einem 450 mm-Wafer können theoretisch mehr als doppelt so viele Chips wie auf einem 300-mm-Wafer gefertigt werden. Die für diese Studie verwendete Wafergröße beträgt 300 mm.

Die den Front-End-Prozessen vorgelagerte Herstellung des Rohwafers wird in dieser Studie nicht neu bilanziert, da hierfür der von Prakash et al. (2013) erstellte Datensatz genutzt werden kann.

⁷⁹ Fortfolgend wird zur Vereinfachung der Begriff Chip verwendet.

⁸⁰ Zur Charakterisierung der Reinheitsklasse werden sogenannte Luftreinheitsklassen für verschiedene Anwendungsgebiete unterschieden. Für die Mikroelektronikfertigung ist die Reinheitsklasse von 1 und besser gefordert. Dabei darf die Anzahl der Partikel, die $>0,5 \mu\text{m}$ sind, nicht 30 Partikel pro Kubikfuß überschreiten. Friedemann et al. (2000)

⁸¹ Oft werden diese in Anlehnung an den englischen Begriff „Bare Die“ als Nacktchip bezeichnet.

Bevor die Chips im Back-End-Prozess verkapselt werden, erfolgt ein Funktionstest der fertigen Chips auf dem Wafer. Dabei wird geprüft, ob die Chips fehlerfrei sind. Fehlerfreie Chips werden als „Known Good Die“ (KGD) bezeichnet. Defekte Chips werden als „Bad die“ gekennzeichnet und von den weiteren Back-End-Prozessen ausgeschlossen. In einer Qualitätsprüfung werden die Chips auf ihre Spannungsfestigkeit und thermischen Eigenschaften getestet. Hierbei wird unterschieden, welche Chips mit welcher Taktrate betrieben werden können. Beispielsweise konnten im Jahr 2009 nur 5% der Chips auf einem Standardwafer mit der höchsten Taktrate von 3,2 GHz betrieben werden (Hodgin 2009)

Am Ende des Front-End-Prozesses steht der fertige Wafer. Im folgenden Back-End-Prozess werden die einzelnen Chips in der Chipmontage mit einem Gehäuse fest verbunden.

Aktuelle Prozessoren für Desktop-PCs und Notebooks werden üblicherweise in der Gehäuseform bzw. Packagevariante PGA (Pin Grid Array) oder BGA (Ball Grid Array) gefertigt. Die aktuellen Intelprozessoren Core i3, i5, i7 werden hierbei als 988-pin micro-FCPGA (bzw. bezogen auf den Sockel als rPGA988B) und BGA1023 Gehäuse aufgeführt.

Die Abmessungen in Tabelle 56 sind aus den Datenblättern von Intel entnommen.

Tabelle 56: Abmessungen der Packages rPGA988B und BGA 1023 Intel (2013)

	rPGA	BGA
Abmessungen	37,5 x 37,5 mm	31 x 24 mm
Fläche (Package)	14,06 cm ²	7,44 cm ²
Kontakte	988 Pins je 1,7 mm Länge bei 0,37 mm Durchmesser	1023 Lotkugeln 0,439 mm Durchmesser (vor dem Löten) 0,215 mm Höhe nach dem Löten unter dem Die
Substratdicke	1,05 mm	0,757 mm
Die-Fläche	0,94 cm ² (7,656 x 12,223 mm)	0,94 cm ² (7,656 x 12,223 mm)

Für diese Studie wird nachfolgend das aktuellere BGA-Design betrachtet, welches insbesondere für Notebook-CPU's eingesetzt wird.⁸² Bei diesem Design wird der fertig verkapselte Chip nicht in einen Sockel gesteckt, sondern direkt auf das Mainboard gelötet.

Entsprechend der Designzeichnung (Intel 2013b) ist das BGA-Package aus vier wesentlichen Komponenten aufgebaut:

- **Halbleiterchip**, mit der aktiven Seite nach unten (Flip Chip) auf einem Substrat aufgebracht. Auf der aktiven Seite des Dies sind Kontakte (sogenannte Bumps) aufgebracht, die noch im Rahmen der Front-End-Prozesse gefertigt wurden. Aufgrund der Abmes-

⁸² Aktuell wird ein BGA-Design nur für wenige Desktop-Prozessoren angeboten. Intels aktuelle Prozessor-Mikroarchitektur „Haswell“ wird mit dem Sockeldesign LGA1150, rPGA 94, BGA 1364 und BGA 1168 gefertigt. Die BGA Versionen werden insbesondere in Ultrabooks, Tablets und PC-Systemen mit Mainboards, welche einen kleinen Formfaktor haben(z.B. Mini-ITX), eingesetzt (Techpowerup, 2012).

sungen der Flip-Chip-Lotbumps im Bereich von 100 Mikrometer und darunter sind die eingesetzten Lotmengen gegenüber dem auf dem Mainboard verwendeten Lot als marginal anzusehen. Nach Erfahrungswerten der TU-Berlin entspricht die Lotmenge 1-3 % des Baugruppengewichtes. Bei einem typischen Micro ATX Mainboard mit einer Fläche von 30 cm x 30 cm und einem Gewicht von 821 g⁸³ entspricht die minimale Lotmenge ca. 8 g. Im Vergleich dazu steht die Lotmenge von 0,34 g für die in Tabelle 72 berechneten Lotkugeln.

- **Underfiller**, aufgebracht nach dem Löten des Dies, um die Zwischenräume unter dem Chip auszufüllen und um die Stabilität und Zuverlässigkeit des Aufbaus zu erhöhen
- **Substrat** zur Umverdrahtung von den Chipkontakten auf der Oberseite zu einem entspannteren Ball- Raster auf der Unterseite.
- **Balls** auf der Unterseite des Gehäuses zur Ankontaktierung auf dem Mainboard.

Ein Aspekt bei der ökobilanziellen Betrachtung bisheriger Chip-Packages war die Integration von Keramikkondensatoren, da diese einen relevanten Anteil von Platin enthalten. Schischke et al. (2008) haben eine Input-Output-Bilanz eines Keramikkondensators veröffentlicht (siehe Tabelle 57).

Tabelle 57: Sachbilanz für die Fertigung eines Keramikkondensators nach Schischke et al. (2008)

Wesentliche Prozess-Inputflüsse	Menge
Alumina-Substrat	0,926 g
Silber-Platin-Paste	0,02 g
Isopropanol	0,108 ml
PET-Beutel	0,856 g
HDPE	0,129 g
Wesentliche Outputflüsse	Menge
Produkt (1 Keramikkondensator)	0,636 g
Alumina-Substrat-Abfall mit Silber-Platin-Pasten-Anhaftungen	0,34 g
CO ₂ -Emissionen des Stromverbrauchs (Malaysischer Energie-Mix)	32 g

Gegenüber früheren Intel-Prozessor-Designs, wie z.B. beim rPGA988A (siehe Intel 2013a), sind nach dem Packagelayout (s. Intel 2013b) keine Keramikkondensatoren auf dem Gehäuse assembliert. Ob es eventuell stattdessen eingebettete Kondensatoren im Substrat gibt, ist nicht bekannt.

Bei dem Aufbau der Intel-Prozessoren für Notebooks (BGA-Package) dürfte der Die als Flip Chip mit Bumps auf das Substrat gelötet sein. Das Substrat besteht aus einem sechslagigen Aufbau und dient der Umverdrahtung zu den an der Unterseite befindlichen Lotkugeln des BGA-Aufbaus. An den Rändern des Flip Chips ist der Underfiller erkennbar, der den Zwischenraum unter dem Die ausfüllt (siehe dazu Querschliff durch einen typischen FC-BGA-Aufbau nach Vardaman (2013)).

⁸³ Basierend auf dem Mainboard Asus H81M-PLUS. Vgl. <http://www.asus.com/de/Motherboards/H81MPLUS/specifications/>

4.3.2 Quellendiskussion für die Auswahl der Daten

Im vorangegangenen Vorhaben „Schaffung einer Datenbasis zur Ermittlung ökologischer Wirkungen der Produkte der Informations- und Kommunikationstechnik (IKT)“ Prakash et al. (2013) wurden vier IC-relevante Datensätze erstellt:

- IC-Fertigung Front-End-Prozess\”Wafer Out”
- IC-Fertigung Front-End-Prozess\”Good die out”
- IC-Fertigung Back-End-Prozess
- Silizium-Wafer-Herstellung

Aus den Ergebnissen des vorangegangenen Vorhabens zogen Prakash et al. (2013) folgendes Fazit: „Derzeit verfügbare Datensätze können nur bedingt auf moderne Produkte angewendet werden, da sie nicht mehr den heute realisierten Stand der Technik abbilden.“ Da viele der in Prakash et al. (2013) erhobenen Daten auf eine Studie von Williams aus dem Jahr 2002 zurückgehen, ist es für diese Studie notwendig, aktuellere Quellen zu verwenden. Hinzu kommt, dass die im vorangegangenen Projekt erstellten Datensätze für Speicherchips ausgelegt waren, in diesem Projekt aber CPUs im Vordergrund stehen. Im Folgenden werden daher die relevantesten Quellen miteinander verglichen.

Energiebedarf

Im direkten Vergleich mit Prakash et al. (2013) zeigen aktuelle Quellen einen deutlich höheren Energiebedarf für den Front-End-Prozess von Logikchips (Microcontroller, CPU, GPU u.ä.) gegenüber Speicherchips, wie in der folgenden Tabelle 58 dargestellt ist. Dies wird mit dem höheren Fertigungsaufwand für die Herstellung der Logikchips im Vergleich zu den Speicherchips begründet.

Tabelle 58: Energieinput im Front-End-Prozess im Vergleich

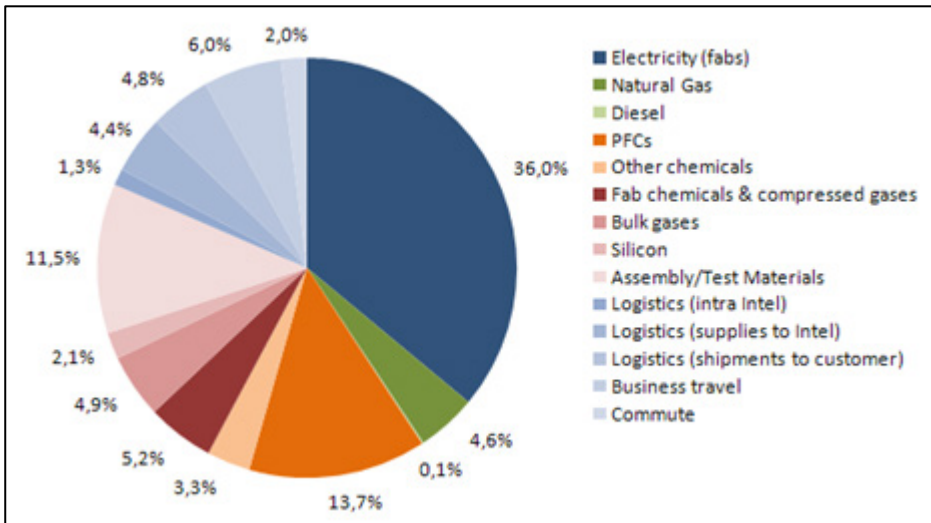
Energieinput	Menge	Einheit	Bezug	Quelle
Strom	1,05	kWh/cm ²	Speicherchips	ESIA 2010 / Prakash et al. 2013
Erdgas	0,13	kWh/cm ²	Speicherchips	ESIA 2010 / Prakash et al. 2013
Strom	3,02	kWh/cm ²	Logikchips	Schmidt et al. 2011
Erdgas	0,0045	kWh/cm ²	Logikchips	Schmidt et al. 2011
Energie	3,5	kWh/cm ² basierend auf einer durchschnittlichen Fab von 2010	Logikchips	Boyd 2012

Treibhausgasemissionen

Von Intel liegt eine aggregierte Veröffentlichung Higgs (2009) zu den unternehmensbezogenen Treibhausgasemissionen (Scope 1, 2 und 3) der eigenen Fertigung vor, die auch bereits bei Prakash et al. (2013) herangezogen wurde. Da das Kerngeschäft von Intel nach wie vor die CPU-Fertigung ist, kann die Aufteilung in Abbildung 18 als weitgehend repräsentativ für die CPU-Herstellung angesehen werden, wenn auch die Daten nicht mehr dem aktuellsten Stand entsprechen. Die prozentuale Aufteilung für eine CPU darf als sehr ähnlich angenommen werden,

auch wenn man für einen Product Carbon Footprint die Geschäftsreisen und den Weg der Mitarbeiter zum Arbeitsplatz üblicherweise nicht einbeziehen würde.

Abbildung 18: Intels Carbon Footprint (Zusammenstellung: Fraunhofer IZM)



Der Carbon Footprint des Stromverbrauchs der Fabs (Halbleiterfertigung) macht über 1/3 der Gesamttreibhausgasemissionen aus. Eine Aufteilung nach Front- und Back-End ist jedoch leider nicht angegeben. Die direkte Emission von perfluorierten Kohlenstoffverbindungen (PFCs) macht 13,7% aus.

Laut veröffentlichter Produktökobilanzen weist eine CPU für PCs und Notebooks einen Carbon Footprint im niedrigen einstelligen kg-Bereich auf (siehe auch Ergebnisse in Tabelle 96). Laut den Angaben von Intel werden 13,7 % dieses Carbon Footprints durch PFC-Emissionen verursacht. Der von der deutschen Halbleiterindustrie angegebenen Wert für PFC-Emissionen (ZVEI 2011)⁸⁴ von ca. 0,16 kg CO₂e pro cm² gefertigter Waferfläche weicht von den Intel-Daten deutlich ab.. Demgegenüber lässt sich aus dem PFC-Bericht des europäischen Halbleiterverbands ESIA (2011) für 2010 ein etwa doppelt so hoher Wert von 0,3 kg CO₂e pro cm² gefertigter Waferfläche ableiten. Die ZVEI-Daten beinhalten u.a. die Angaben der CPU-Fertigung von GLOBALFOUNDRIES in Dresden. Ein Grund für die vergleichsweise höheren Intel-Daten könnte das höhere Alter der dortigen Fabs sein, deren Konfiguration eine Nachrüstung mit PFC-Abgasreinigung verhindert. Andererseits beinhalten die ESIA-Daten auch die CPU-Fertigung von Intel in Irland. Zum Vergleich: die Daten von Schmidt et al. (2011) zur Logikchip-Fertigung weisen nur einen Emissionswert von 0,1 kg CO₂e pro cm² Wafer aus.

Geht man angesichts der von Intel veröffentlichten Daten (Higgs 2009) von einem eher höheren PFC-Emissionswert von 0,3 kg CO₂e/cm² aus und splittet in Analogie zum Vorgehen von Prakash et al. (2013) diese Emissionen auf die einzelnen von ESIA (2011) veröffentlichten Stoffe auf, ergeben sich näherungsweise in Tabelle 59 die aufgelisteten PFC-Emissionen.

⁸⁴ ZVEI 2011: PFC Daten für die CPU Fertigung für 2010 im Rahmen der freiwilligen Selbstverpflichtung zur Reduzierung der Nicht-Kohlenstoff-Treibhausgase an

Tabelle 59: PFC-Emissionen und ihre GWP-Werte

	Beitrag zum Gesamt-GWP der PFC-Emissionen (in %) (ESIA 2011)	Charakterisierungsfaktoren (IPCC 2007)	PFC-Emissionen (kg/cm ²)	GWP von PFC (kg CO ₂ e/cm ²)
NF3	10	17200	2,47217E-06	0,0425
C2F6	41	12200	1,01359E-05	0,1237
CF4	28	7390	6,92207E-06	0,0512
CHF3	5	14800	1,23608E-06	0,0183
C3F8	3	8830	7,4165E-07	0,0065
SF6	8	22800	1,97773E-06	0,0451
C4F8	5	10300	1,23608E-06	0,0127
Summe	100			0,3

Assembly- und Testmaterialien sind der drittgrößte Einzelbeitrag in Intels Carbon-Footprint-Bilanz, der üblicherweise Leadframes, Epoxidverkapselungsmaterial, Gold- und Kupferdrahtbonds umfasst, im Falle des hier ausgewählten BGA-Packages jedoch v.a. das FR4-Substrat und dessen (externe) Fertigung sowie die Lotkugeln für die Unterseite des BGAs.

Chemikalienverbrauch

In der Halbleiterindustrie werden für die Herstellung von Mikrochips viele unterschiedliche Chemikalien eingesetzt. Prakash et. al (2013) stützen ihren Datensatz für die Front-End-Prozesse von Speicherbausteinen auf 16 Chemikalien, davon werden 10 Chemikalien in hochreiner Form verwendet. Boyd listet für das Bezugsjahr 2010⁸⁵ mehr als 50 Chemikalien und Schmidt et al. (2011) mehr als 80 Chemikalien für die Front-End-Prozesse von Logikchips auf. Während die 16 Chemikalien für die Herstellung von Speicherchips lediglich eine Auswahl des insgesamt eingesetzten Chemikalienspektrums darstellen, ist für Boyd (2010) und Schmidt et al. (2011) anzumerken, dass diese gemittelte Daten verwenden. Im Fall von Boyd (2010) wurde der Bezug auf US-amerikanische Fabs gelegt. Hingegen beziehen sich Schmidt et al. (2011) auf 80% der weltweiten Halbleiterindustrie und mittelt hierbei auch unterschiedliche Strukturbreiten.

Diskussion der Back-End-Prozesse

Aus dem Forschungsbericht von Prakash et al. (2013) ergaben sich folgende offene bzw. relevante Punkte zu den Back-End-Prozessen:

- Die Back-End-Bilanzierung basiert auf Daten für einen spezifischen Speicherchip von Samsung DRAM DDR3. Part-Nummer: K4B1G0846E-HCH9. Speicherkapazität: 1 GB. Die Fläche beträgt 43 mm². Gesamter Chip (mit Gehäuse) wiegt 0,162 g pro Stück.
- Wasser- und Chemikalienverbrauch im Back-End-Prozess wurden mangels Daten nicht berücksichtigt.

⁸⁵ Für das Bezugsjahr 2010 bezieht sich Boyd ausschließlich auf eine Strukturbreite von 45 nm. Es ist aber davon auszugehen, dass in diesem Jahr parallel auch noch ältere Strukturbreiten gefertigt wurden.

- In Back-End-Prozessen werden keine signifikanten Chemikalien verbraucht. Laut ESIA (2010) geht der Materialeinsatz praktisch vollständig in das Produkt ein. Materialverluste sind vernachlässigbar.
- Zur Abschätzung des Back-end-Energieverbrauchs wurde der Mittelwert der von ESIA angegebenen Spannbreite am Gesamt-Energieverbrauch (31% in Bezug zu Front-End) zur Bilanzierung genutzt.
- Der Back-End-Datensatz repräsentiert nur den Packaging-Typ FBGA (Fine Pitch Ball Grid Array).

Bis auf die Art der Ankontaktierung auf der Leiterplatte (BGA, Lotkugeln) unterscheidet sich das Package des Speicherchips maßgeblich von dem Package der hier ausgewählten CPU: Während der Speicherchip (häufig auch als Multichip-Modul) mit Drahtbondtechnik und der aktiven Seite nach oben verbaut wird, durchläuft der CPU-Chip zunächst im Front-End noch einen zusätzlichen Bumpingprozess, um ihn dann im Back-End mit der aktiven Seite nach unten (Flip Chip) auf einem FR4-Substrat als unverkapselten Nacktchip zu verlöten. Eine Übertragung der Back-End-Daten vom Speicher- auf den CPU-Chip ist daher nicht sinnvoll.

Tabelle 60: Input- und Outputdaten für den Datensatz „IC-Fertigung Back End Prozess“ (direkte Emissionen) nach Prakash et al. (2013)

Input			Output		
Strom	2,46E-01	kWh	Speicherchip	1	Stück (= 0,162 g)
Erdgas	3,05E-02	kWh			
Unverkapselter Chip mit 43 mm ² Silizium	2,37E-05	kg			
Polymer	1,06E-05	kg			
SiO ₂	4,75E-05	kg			
Au	2,00E-07	kg			
Carbon Black	2,00E-07	kg			
Ag	7,00E-07	kg			
Cu	1,00E-07	kg			
Sn	2,63E-05	kg			
BT-Core (Bismaleimidetriazine)+Cu+Au+Ni	5,26E-05	kg			

4.3.3 Vorgehensweise zur Datenerhebung und Repräsentativität der Daten

Der hier vorgestellte Datensatz basiert auf Schmidt et al. (2011). Es handelt sich um einen Wafer für Logikchips, die u.a. CPUs umfassen.

Da aktuelle Herstellerdaten, mit Ausnahme von Wasserverbrauchsdaten (siehe unten), nicht zur Verfügung stehen, wird der Datensatz von Schmidt et al. (2011) direkt übernommen. Er beschreibt die Waferproduktion für Logikchips anhand der 300-mm-Technologie.

Die Repräsentativität der Angaben von Schmidt et al. (2011) wird als gut angenommen, da zumindest einer der Ko-Autoren aus dem Umfeld eines der weltweit führenden Planungs- und Bauausführungsunternehmens für Halbleiterreinräume stammt und somit eine fundierte Kenntnis über den Betrieb und die Medienversorgung von Front-End-Fertigungen vorausgesetzt werden kann.

Die in Tabelle 61 gelisteten Annahmen wurden laut Schmidt et al. (2011) hinsichtlich der Produktion getroffen.

Tabelle 61: Merkmale des Referenzproduktes

Parameter	Wert
Typ	Wafer für Logikchips
Wafer-Durchmesser	300 mm
Wafermaterial	Silizium
Bezugsgröße	1 m ²
Waferfläche eines Wafers	0,071 m ²
Waferdicke	0,75 mm
Gewicht eines Wafers	~150 g
Prozess-Yield (Ausbeute)	84%
Produktionskapazität (Input)	120 m ² /Woche
Produktionsstandort	Global

Die Annahmen zum Yield beruhen laut Schmidt et al. (2011) auf Expertenschätzungen (ohne nähere Angaben) und decken sich etwa mit Annahmen zum Yield von Deng (2008).⁸⁶

Ermittlung der Ausbeute bei der Chip-Herstellung

Nach der Produktionslinienausbeute und der Netto-Ausbeute, wie bei Prakash et al. (2013) beschrieben, sind noch die Randverluste zu berücksichtigen, wie zum Teil in Kapitel 4.3.1 beschrieben. In Schmidt et al. (2011) wurde die gesamte Ausbeute⁸⁷ mit 84% berücksichtigt. Da bei Schmidt et al. (2011) nur ganze Wafer berücksichtigt werden, wird folgende Anpassung für Randverluste bei der Chipvereinzelnung vorgeschlagen. Auf der Grundlage des Silicon Edge Tools⁸⁸ und der aus Tabelle 56 aufgeführten Chipfläche können die Randverluste der Waferfertigung berechnet werden. Demnach können aus einem 300-mm Wafer 638 Chips mit den von Intel angegebenen Abmaßen 7,656 x 12,223 mm gewonnen werden.

Auf Basis der von Prakash et al. (2013) verwendeten Formel für den Flächenverlust ergibt sich folgende Berechnung:

$$\text{Flächenverlust[cm/Wafer]} = 3,1415 \left(\frac{30}{2}\right)^2 - (0,94[\text{cm}^2] * 638 \text{ Stück}) = 706,86[\text{cm}^2] - 599[\text{cm}^2] = 107,14[\text{cm}^2]$$

Der Flächenverlust aufgrund des Randes der Wafer-Scheibe beträgt damit 107,14 cm.

$$\text{Der Randverlust ist damit ca. } 15\% = \frac{107,14 \text{ cm}^2}{706,86 \text{ cm}^2}$$

⁸⁶ Schmidt et al. (2011) beschreibt den „Prozess-Yield“ als Produktionslinie-Ausbeute, wobei von einem Testwaferverlust von 1,03 Wafer/h ausgegangen wird. Bruch- und Layerfehler werden mit einem Verlust von 6% eingerechnet (Netto-Ausbeute).

⁸⁷ Gesamte Ausbeute: Produktionslinie-Ausbeute + Netto-Ausbeute vgl. mit Fußnote 86

⁸⁸ Siehe Silicon Edge (2015); <http://www.silicon-edge.co.uk/j/index.php/resources/die-per-wafer>; Zugriff 26.11.2015

Die Wafer-Ausbeute inklusive des Flächenverlustes und der Prozessausbeute kann damit, in Anlehnung an Prakash et al. (2013) zu 71,4% berechnet werden (vgl. mit Tabelle 62).

Tabelle 62: Kenndaten der Wafer-Herstellung und Ermittlung der Ausbeute mit Core i5 Prozessor nach Tabelle 56

Kenndaten	Menge	Quelle
Waferdurchmesser	300 mm	Schmidt et al. (2011)
Waferfläche eines Wafers	706,86 cm ²	
Prozess-Yield (Ausbeute)	84%	
Chip-Größe	0,94 cm ²	Intel (2013)
Brutto-Ausbeute (Chips/Wafer)	638	Silicon Edge (2014)
Randverlust	15%	Berechnung nach Silicon Edge (2014)
Wafer-Ausbeute (von „Wafer Start“ zu den fehlerfreien Chips)	84%*85%=71,4%	Eigene Berechnung

Wasserverbrauch bei der Chip-Herstellung

Aktuelle Daten von Intel zum Wasserverbrauch sind in deren Berichten für das Carbon Disclosure Project für 2012 aufgeschlüsselt. Mit einer Zuordnung zu Front und Back End und über das Fertigungsvolumen von Intel lässt sich der Wasserverbrauch je Teilprozess und bezogen auf die Waferfläche angeben. Ausgehend von einer Fertigungskapazität von 4,6 Millionen 300-mm-Wafern im Jahr 2012 (IC Insights 2013) und unter der Annahme einer branchenüblichen Auslastung von 85% ergibt sich für 2012 etwa ein Fertigungsvolumen von Intel von 280.000 m² Waferfläche. Der Wasserverbrauch von Intel – und damit im Wesentlichen für die CPU-Fertigung – pro m² Waferfläche lässt sich mithilfe dieser Angaben grob abschätzen:

- Front-End: 100.000 l/m² (bzw. 10 kg/cm²)
- Back-End: 9.000 l/m² (bzw. 900 g/cm²)

Im Vergleich zu den herangezogenen Daten von Schmidt et al. (2011) ist jedoch davon auszugehen, dass Intels Berichtsdaten auch Sanitärwasser und ähnliche nicht direkt fertigungsbezogene Verbräuche mit einschließen.

Tabelle 63: Wasserverbrauch Intel (2013c)

Land	Front-End / Back-End	Wasserbrauch (Mio. Liter)	Anteile des Front-End / Back-End am Gesamtwasserverbrauch
USA	FE	23613	86,4%
Irland	FE	2911	
Israel	FE	2820	
Costa Rica	BE	473	7,7%
Malaysia	BE	1806	
Vietnam	BE	329	
China	FE / BE	1961	5,8%
Indien	sonstiges	61	0,2%
Summe		33974	

Darüber hinaus gibt Intel an, dass 80% des eingesetzten Wassers auch wieder eingeleitet werden, 20% sind Verdunstungsverluste (Intel 2013c).

4.3.4 Festlegung des Untersuchungsrahmens

In diesem Forschungsvorhaben wird ein Sachbilanz-Datensatz für die Herstellung einer CPU erstellt. Eine Veröffentlichung des Datensatzes in ProBas ist vorgesehen.

Bei diesem Datensatz werden ausschließlich die direkten Umweltwirkungen des Herstellungsprozesses einer CPU dargestellt. Die für eine vollständige Bilanzierung erforderlichen Vorketten (bspw. Material- und Energievorketten) können von ProBas-Nutzern eigenständig mit geeigneten Datensätzen ergänzt und mit den direkten Prozess-Modulen in Verbindung gesetzt werden.

Bezugsgröße

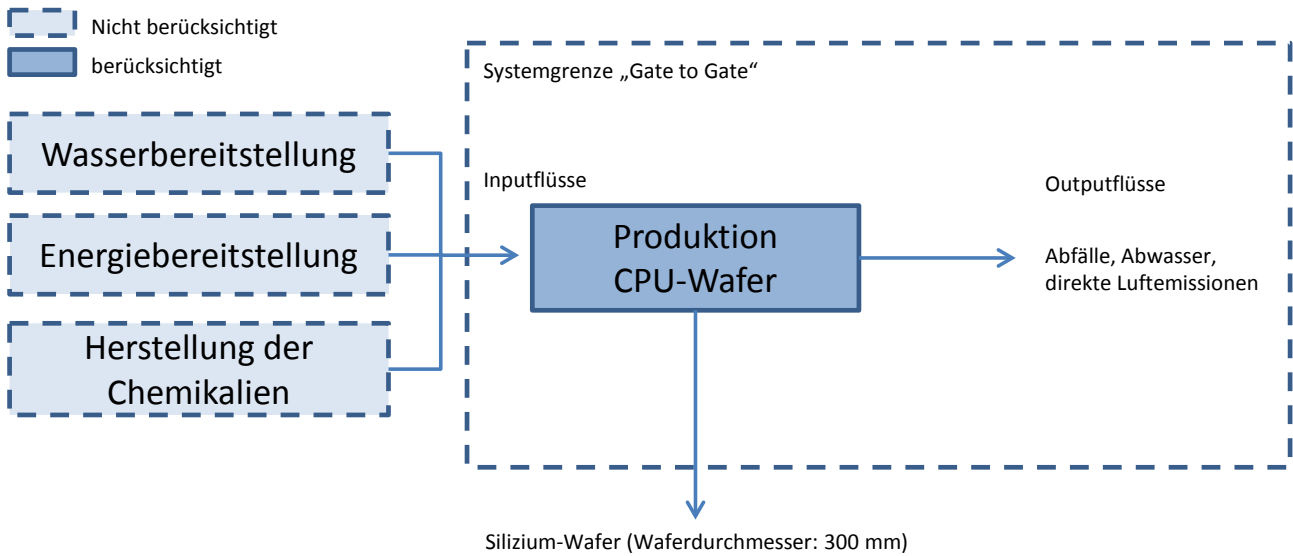
Im Bereich der Bilanzierung von ICs werden in der Literatur unterschiedliche Bezugsgrößen vorgeschlagen bzw. verwendet. Nissen beschreibt die Bezugseinheit mit „pro cm² und Anzahl Maskenschritte“ für die Abschätzung der Umweltauswirkungen bei der Chipfertigung (Nissen 2001). GLOBALFOUNDRIES hat in einem Pilotprojekt einen so genannten „Manufacturing Index dies out“ (MI) verwendet. MI ist das Produkt von „Good dies“ und der Anzahl der Maskenschritte (Hermanns 2010). Schmidt et.al. (2011) verwendet die Waferfläche pro Quadratmeter hergestellter Wafer als Bezugsgröße. Der Europäische Verband der Halbleiterindustrie (ESIA) empfiehlt cm² fertiger Wafer als Bezugsgröße (ESIA 2010).

In Anlehnung an Schmidt et al. (2011) wird in diesem Bericht als Bezugsgröße des Datensatzes ein Quadratmeter Waferfläche für die CPU-Herstellung gewählt.

Festlegung der Systemgrenze

Die Betrachtung der Herstellung der CPU beginnt mit der Erfassung der In- und Outputflüsse für die Produktion des Wafers (Gate-to-Gate) (Input: Energie, Wasser, Chemikalien; Output: direkte Luft- und Wasseremissionen, Abfälle). Die Produktion der Inputmaterialien, die Gewinnung von Rohmaterial und die Energiebereitstellung sind nicht Gegenstand der Betrachtung.

Abbildung 19: Systemgrenze des ProBas-Datensatzes für die Herstellung des CPU-Wafers im Rahmen dieses Arbeitspakets (Darstellung: Öko-Institut)



Repräsentativität des Datensatzes

Die erhobenen Daten entsprechen laut Schmidt et al. (2011) dem Stand der Technik in der Waferproduktion und repräsentieren einen globalen Produktionsmix.

Tabelle 64: Repräsentativität des CPU-Datensatzes (ohne Vorkette)

Datensatz in ProBas	Zeitlicher Bezug	Geografischer Bezug	Technologischer Bezug
Herstellung CPU	2005	Welt	Wafersubstrat: Silizium
			Wafer-Durchmesser: 300 mm
			Waferfläche eines Wafers: 0,071m ²
			Waferdicke: 0,75 mm
			Gewicht eines Wafers: ~150 gr
			Prozess-Yield (Ausbeute): 84%

4.3.5 Ergebnis und Auswertung des Datensatzes für die Herstellung der CPU

Der Datensatz zur Herstellung der CPU wird ausgehend von dem Chemikalienverbrauch, den Materialverlusten und dem Energieaufwand bei der Produktion ermittelt.

Nachfolgend werden die von Schmidt et al. (2011) veröffentlichten Daten näher erläutert.

Die wesentlichen Produktionsprozesse im Bereich der Waferproduktion sind photolithografische Strukturierung, Abscheidungsprozesse auf der Oberfläche, Metallisierung, Waferreinigung, Polieren und Ofenprozesse. Neben diesen Produktionsprozessen gibt es zahlreiche Serviceprozesse wie Klimatisierung der Reinnräume, Abgasreinigung, Wasseraufbereitung (Deionat) und Abwasserbehandlung. Anschließende Produktionsschritte wie Dicing (Vereinzelung) und Packaging wurden von Schmidt et al. (2011) nicht betrachtet. Auf diese Prozessschritte wird in Kapitel 4.3.9 näher eingegangen.

Inputdaten: Stromverbrauch und anderer Energieverbrauch

Der Stromverbrauch wird in erster Linie von den Produktionsprozessen direkt verursacht, in zweiter Linie von Serviceprozessen wie die Bereitstellung der Kühlleistung, Bereitstellung von destilliertem Wasser, Klimatisierung, etc. Die Serviceprozesse verursachen mehr als die Hälfte des Stromverbrauchs.

Des Weiteren gliedert sich der Stromverbrauch wie folgt:

- Strom (Produktion): 19.400 kWh/m² Wafer
- Strom (Betriebsanlagen): 7.800 kWh/m² Wafer
- Strom (mechanische Kühlung): 2.910 kWh/m² Wafer
- Strom (Sonstiges): 91,8 kWh/m² Wafer
- Erdgas: 45,5 kWh/m² Wafer

Inputdaten: Chemikalien- und Material und Wasserverbrauch

Die Daten zum Chemikalien- und Wasserverbrauch beruhen auf Primärdaten, basierend auf Einkaufs- und Prozessdaten.

Outputdaten: Direkte Luftemissionen

Direkte Luftemissionen wurden teilweise basierend auf den Inputchemikalien modelliert und teilweise haben Schmidt et al. (2011) den Energieverbrauch direkt an den einzelnen Anlagen gemessen.

Outputdaten: Feste Abfälle

Die Zusammensetzung der festen Abfälle wurde anhand der Inputdaten der Chemikalien modelliert.⁸⁹

Information über den Transport der fertigen Produkte

Schmidt (2011) trifft folgende Abschätzungen hinsichtlich des Transports:

- Transport (LKW > 16 t, Flottendurchschnitt): 371 tkm
- Transport (Schienenfracht): 960 tkm

4.3.6 Ergebnisse der Datensätze

Der in der vorliegenden Studie beschriebene Datensatzes wird in ProBas unter <http://www.probas.umweltbundesamt.de/php/index.php> veröffentlicht. Dieser Datensatz wird in den nachfolgenden Tabellen dargestellt. Quelle der Daten ist die Untersuchung von Schmidt et al. (2011). Schmidt et al. geben Werte je m² Waferfläche an. Für diesen Bericht wurde der Datensatz zusätzlich für eine konkrete CPU skaliert, nämlich den in Tabelle 56 aufgeführten Chip mit einer Größe von 0,94 cm². Wie in Kapitel 4.3.2 beschrieben bleibt 1 m² Wafer die allgemeine Bezugsgröße.

⁸⁹ Ausschuss ist bei den festen Abfällen nicht enthalten.

Tabelle 65: Inputdaten für den Datensatz „Herstellung CPU-Wafer“

Inputflüsse	Input Referenzfluss		Input skaliert auf einen Die mit der Größe 0,94 cm ²	
	Menge	Einheit	Menge	Einheit
Chemikalienverbrauch in der Produktion				
2-Methylaminoethanol	5,45	kg/m ² Wafer	0,0005123	kg/Die
Aceton	1,39	kg/m ² Wafer	0,00013066	kg/Die
Argon	41,4	kg/m ² Wafer	0,0038916	kg/Die
Arsenwasserstoff (AsH ₃)	0,00403	kg/m ² Wafer	3,7882E-07	kg/Die
Arsenwasserstoff (AsH ₃) 0.7% in Wasserstoff (H ₂)	0,0000945	kg/m ² Wafer	8,883E-09	kg/Die
Diboran (B ₂ H ₆) 5% in Stickstoff (N ₂)	0,0034	kg/m ² Wafer	3,196E-07	kg/Die
Bortrichlorid (BCl ₃)	0,024	kg/m ² Wafer	2,256E-06	kg/Die
80% Wasser (H ₂ O), 20% Ammoniumfluorid/Fluorwasserstoffsäure (HF) (20:1)	10,3	kg/m ² Wafer	0,0009682	kg/Die
80% Wasser (H ₂ O), 20% Ammoniumfluorid/Fluorwasserstoffsäure (HF) (500:1)	4,62	kg/m ² Wafer	0,00043428	kg/Die
Butylacetat	2,94	kg/m ² Wafer	0,00027636	kg/Die
Kohlenstoff (C) (undef.)	0,422	kg/m ² Wafer	3,9668E-05	kg/Die
Hexafluorethan (C ₂ F ₆)	0,601	kg/m ² Wafer	5,6494E-05	kg/Die
Octafluorocyclobutan (C ₄ F ₈)	0,0574	kg/m ² Wafer	5,3956E-06	kg/Die
Perfluorcyclopenten (C ₅ F ₈)	0,0527	kg/m ² Wafer	4,9538E-06	kg/Die
Tetrafluormethan (CF ₄)	0,268	kg/m ² Wafer	2,5192E-05	kg/Die
Difluormethan (CH ₂ F ₂)	0,0192	kg/m ² Wafer	1,8048E-06	kg/Die
Fluormethan (CH ₃ F)	0,00335	kg/m ² Wafer	3,149E-07	kg/Die
Fluoroform (CHF ₃)	0,0069	kg/m ² Wafer	6,486E-07	kg/Die
Chlor (Cl ₂)	0,0411	kg/m ² Wafer	3,8634E-06	kg/Die
Kohlenstoffmonoxid (CO)	0,00368	kg/m ² Wafer	3,4592E-07	kg/Die
Cu(hexafluoro-acetylacetonate) ₂	0,0881	kg/m ² Wafer	8,2814E-06	kg/Die
Kupfersulfat (CuSO ₄)	57,3	kg/m ² Wafer	0,0053862	kg/Die
1% Fluorwasserstoffsäure (HF) in Wasser (H ₂ O)	39,7	kg/m ² Wafer	0,0037318	kg/Die
Ethylendiamintetraessigsäure (EDTA)	2,88	kg/m ² Wafer	0,00027072	kg/Die
Milchsäureethylester	24,9	kg/m ² Wafer	0,0023406	kg/Die
1% Fluor (F ₂) in Krpton (Kr)	0,00122	kg/m ² Wafer	1,1468E-07	kg/Die
Gamma-butyrolacton	0,118	kg/m ² Wafer	1,1092E-05	kg/Die
Wasserstoff (H ₂)	1,98	kg/m ² Wafer	0,00018612	kg/Die
Sulfoxylsäure (H ₂ O ₂)	0,364	kg/m ² Wafer	3,4216E-05	kg/Die
Wasserstoffperoxid (H ₂ O ₂) (30%)	52,6	kg/m ² Wafer	0,0049444	kg/Die
Schwefelsäure (H ₂ SO ₄)	29,3	kg/m ² Wafer	0,0027542	kg/Die
Schwefelsäure H ₂ SO ₄ (98%)	43,4	kg/m ² Wafer	0,0040796	kg/Die
Phosphorsäure (H ₃ PO ₄) (85%)	6,84	kg/m ² Wafer	0,00064296	kg/Die
Bromwasserstoffsäure (HBr)	0,0517	kg/m ² Wafer	4,8598E-06	kg/Die
Chlorwasserstoff (HCl)	0,216	kg/m ² Wafer	2,0304E-05	kg/Die

Inputflüsse	Input Referenzfluss		Input skaliert auf einen Die mit der Größe 0,94 cm ²	
	Menge	Einheit	Menge	Einheit
Chlorwasserstoff (HCl) (37%)	122	kg/m ² Wafer	0,011468	kg/Die
Helium (He)	0,000553	kg/m ² Wafer	5,1982E-08	kg/Die
Fluorwasserstoffsäure (HF)	0,307	kg/m ² Wafer	2,8858E-05	kg/Die
Fluorwasserstoffsäure (HF) (50%)	33,3	kg/m ² Wafer	0,0031302	kg/Die
Fluorwasserstoffsäure flüssig (0.5%)	1,99	kg/m ² Wafer	0,00018706	kg/Die
Hexamethyldisilazan	0,228	kg/m ² Wafer	2,1432E-05	kg/Die
Salpetersäure (HN03)	0,927	kg/m ² Wafer	8,7138E-05	kg/Die
Salpetersäure (HN03) (69%)	4,11	kg/m ² Wafer	0,00038634	kg/Die
Salpetersäure (HN03)/HF 50	2,57	kg/m ² Wafer	0,00024158	kg/Die
Isopropanol	30,7	kg/m ² Wafer	0,0028858	kg/Die
Kaliumhydroxid (KOH)	116	kg/m ² Wafer	0,010904	kg/Die
Kaliumhydroxid (KOH) (40%)	0,428	kg/m ² Wafer	4,0232E-05	kg/Die
Krypton/Neon (Kr/Ne)	0,000608	kg/m ² Wafer	5,7152E-08	kg/Die
Methyl-nonafluorbutyl-Äther	1,05	kg/m ² Wafer	0,0000987	kg/Die
Stickstoff (N2)	2040	kg/m ² Wafer	0,19176	kg/Die
Distickstoffmonoxid (N2O)	0,365	kg/m ² Wafer	0,00003431	kg/Die
Natriumhydroxid (NaOH)	0,71	kg/m ² Wafer	0,00006674	kg/Die
Stickstofftrifluorid (NF3)	0,161	kg/m ² Wafer	1,5134E-05	kg/Die
Ammoniak (NH3)	0,0506	kg/m ² Wafer	4,7564E-06	kg/Die
Ammoniak (NH3) (25%)	6,47	kg/m ² Wafer	0,00060818	kg/Die
Ammoniumhydroxid (NH4OH)	0,0946	kg/m ² Wafer	8,8924E-06	kg/Die
Ammoniumhydroxid (NH4OH) (2%)	2,98	kg/m ² Wafer	0,00028012	kg/Die
N-Methyl-2-pyrrolidon	5,47	kg/m ² Wafer	0,00051418	kg/Die
Sauerstoff (O2)	222	kg/m ² Wafer	0,020868	kg/Die
Propylene glycol methyl ether acetate (PGMEA)	2,92	kg/m ² Wafer	0,00027448	kg/Die
Monophosphan (PH3)	0,00353	kg/m ² Wafer	3,3182E-07	kg/Die
Monophosphan (PH3) 1% in Wasserstoff (H2)	0,0000731	kg/m ² Wafer	6,8714E-09	kg/Die
Monophosphan (PH3) 30% in Silan (SiH4)	0,00519	kg/m ² Wafer	4,8786E-07	kg/Die
Triethylphosphat (PO(OC2H5)3)	0,0442	kg/m ² Wafer	4,1548E-06	kg/Die
Trimethylphosphat (PO(OCH3)3)	0,0114	kg/m ² Wafer	1,0716E-06	kg/Die
Propylene glycol	0,716	kg/m ² Wafer	6,7304E-05	kg/Die
Reiner Stickstoff (N2)	3300	kg/m ² Wafer	0,3102	kg/Die
Schwefelhexafluorid (SF6)	0,725	kg/m ² Wafer	0,00006815	kg/Die
Ethylsilicat (Si(OC2H5)4)	0,152	kg/m ² Wafer	1,4288E-05	kg/Die
Disilan (Si2H6)	0,005	kg/m ² Wafer	0,00000047	kg/Die
Siliciumtetrachlorid (SiCl4)	0,00865	kg/m ² Wafer	8,131E-07	kg/Die
Siliciumtetrafluorid (SiF4)	0,00166	kg/m ² Wafer	1,5604E-07	kg/Die
Dichlorsilan (SiH2Cl2)	0,0529	kg/m ² Wafer	4,9726E-06	kg/Die
Silan (SiH4)	0,0729	kg/m ² Wafer	6,8526E-06	kg/Die

Inputflüsse	Input Referenzfluss		Input skaliert auf einen Die mit der Größe 0,94 cm ²	
	Menge	Einheit	Menge	Einheit
Tetramethylammoniumhydroxide	28,2	kg/m ² Wafer	0,0026508	kg/Die
Trimethylvinylsilane	0,0533	kg/m ² Wafer	5,0102E-06	kg/Die
UHP-Ar	3,72	kg/m ² Wafer	0,00034968	kg/Die
UHP-H2	0,405	kg/m ² Wafer	0,00003807	kg/Die
UHP-He	0,226	kg/m ² Wafer	2,1244E-05	kg/Die
UHP-N2	22,4	kg/m ² Wafer	0,0021056	kg/Die
UHP-O2	6,08	kg/m ² Wafer	0,00057152	kg/Die
Wolfram(VI)-fluorid (WF6)	0,345	kg/m ² Wafer	0,00003243	kg/Die
Schlacke gesamt	94,5	kg/m ² Wafer	0,008883	kg/Die
davon Wasser	85	kg/m ² Wafer	0,00799	kg/Die
davon Natriumhydroxid	0,034	kg/m ² Wafer	3,196E-06	kg/Die
davon Quarzsand	9,45	kg/m ² Wafer	0,0008883	kg/Die
Wasser ⁹⁰	160.000	kg/m ² Wafer	15,04	kg/Die
Strom	30.201,80	kWh/m ² Wafer	2,8389692	kWh/Die
Erdgas	45,5	kg/m ² Wafer	0,004277	kg/Die

Tabelle 66: Outputdaten für den Datensatz „Herstellung CPU-Wafer“

Outputflüsse	Output Referenzfluss [kg/m ² Wafer]	Output skaliert auf einen Die mit der Größe 0,94 cm ² [kg/Die]
Direkte Luftemissionen		
2-Methylaminoethanol	0,0205	0,000001927
Aceton	0,139	0,000013066
Aluminiumoxid (Al2O3)	0,00000242	2,2748E-10
Argon (Ar)	45,1	0,0042394
Arsen (As)	0,0000371	3,4874E-09
Arsen(III)-oxid (As2O3)	1,14E-07	1,0716E-11
Arsenwasserstoff (AsH3)	0,0000314	2,9516E-09
Bor (B)	0,0000371	3,4874E-09
Diboran (B2H6)	3,22E-07	3,0268E-11
Bortrioxid (B2O3)	6,73E-07	6,3262E-11
Brom (Br2)	0,0000782	7,3508E-09
Essigsäure-n-butylester	0,0111	1,0434E-06
Hexafluorethan (C2F6)	0,0106	9,964E-07

⁹⁰ Vergleiche dazu eigene Abschätzung basierend auf Intel-Daten: 100.000 kg/m²

Outputflüsse	Output Referenzfluss [kg/m ² Wafer]	Output skaliert auf einen Die mit der Größe 0,94 cm ² [kg/Die]
C2H5OC2H5	0,00184	1,7296E-07
Octafluorocyclobutan (C4F8)	0,000871	8,1874E-08
Perfluorocyclopenten (C5F8)	0,00348	3,2712E-07
Tetrafluormethan (CF4)	0,0261	2,4534E-06
Difluormethan (CH2F2)	0,0000513	4,8222E-09
Brommethan (CH3Br)	0,000173	1,6262E-08
Chlormethan (CH3Cl)	0,00054	5,076E-08
Fluormethan (CH3F)	0,0000335	3,149E-09
Dimethylether (CH3OCH3)	0,0000771	7,2474E-09
Methan (CH4)	2,09	0,00019646
Fluoroform (CHF3)	0,000069	6,486E-09
Chlor (Cl2)	0,000203	1,9082E-08
Kohlenstoffmonoxid (CO)	0,00569	5,3486E-07
Kohlenstoffdioxid (CO ₂)	31,2	0,0029328
Carbonylfluorid (COF ₂)	0,000216	2,0304E-08
Milchsäureethylester	0,437	0,000041078
Fluor (F2)	0,00102	9,588E-08
γ-Butyrolacton	0,000444	4,1736E-08
Wasserstoff (H2)	0,419	0,000039386
Wasser (H2O)	23300	2,1902
Schwefelsäure (H2SO4)	0,0461	4,3334E-06
Bromwasserstoff (HBr)	0,000213	2,0022E-08
Salzsäure (HCl)	0,00675	6,345E-07
Helium (He)	0,226	0,000021244
Hexamethyldisilazan	0,0000269	2,5286E-09
Fluorwasserstoffsäure (HF)	0,00986	9,2684E-07
Salpetersäure (HNO3)	0,00521	4,8974E-07
Isopropanol	0,336	0,000031584
Krypton (Kr)	0,00124	1,1656E-07
Methyl nonafluorobutyl ether	0,00396	3,7224E-07
Stickstoff (N2)	714000	67,116
Distickstoffmonoxid (N2O)	0,268	0,000025192
Neon (Ne)	0,000583	5,4802E-08
Stickstofftrifluorid (NF3)	0,000509	4,7846E-08
Ammoniak (NH3)	0,0548	5,1512E-06
Ammoniumchlorid (NH4Cl)	0,0000197	1,8518E-09
N-Methyl-2-pyrrolidon	0,0313	2,9422E-06

Outputflüsse	Output Referenzfluss [kg/m ² Wafer]	Output skaliert auf einen Die mit der Größe 0,94 cm ² [kg/Die]
Stickstoffmonoxid (NO)	0,0000334	3,1396E-09
Stickstoffdioxid (NO ₂)	0,196	0,000018424
Sauerstoff (O ₂)	201000	18,894
organische Chlorverbindungen	1,24E-07	1,1656E-11
Phosphor (P)	0,000386	3,6284E-08
Phosphorpentoxid (P ₂ O ₅)	0,0000577	5,4238E-09
Monophosphan (PH ₃)	0,0156	1,4664E-06
PO(OC ₂ H ₅) ₃	0,0000836	7,8584E-09
PO(OCH ₃) ₃	0,0000216	2,0304E-09
1,2-Propandiol	0,0027	2,538E-07
Propylen-Glykol-Methyl-Ätheracetat (PGMEA)	0,02	0,00000188
Schwefelhexafluorid (SF ₆)	0,0285	0,000002679
Aethylsilikatn (Si(OC ₂ H ₅) ₄)	0,000287	2,6978E-08
Disilan (Si ₂ H ₆)	0,000225	2,115E-08
Silane (SiH ₄)	0,00913	8,5822E-07
Siliciumdioxid (SiO ₂)	0,000351	3,2994E-08
Schwefeldioxid (SO ₂)	0,000837	7,8678E-08
Tetramethylammoniumhydroxid	0,00726	6,8244E-07
Trimethylsilanol	0,00298	2,8012E-07
Wolfram(VI)-fluorid (WF ₆)	0,0000128	1,2032E-09
Wolfram(VI)-oxid (WO ₃)	0,0000251	2,3594E-09
Abwasserzusammensetzung		
*OCI-	6,39	0,00060066
*AsO ₃ __	0,00136	1,2784E-07
Acetone	0,0693	6,5142E-06
B ₃ __	0,0148	1,3912E-06
Br⊕	0,0507	4,7658E-06
C (undef)	0,141	0,000013254
Ca ⁺⁺	5,76	0,00054144
Ethanol	0,00716	6,7304E-07
Cl⊕	46,5	0,004371
CO ₃ ⊕⊕	125	0,01175
Cu ⁺⁺	1,25	0,0001175
Ethylendiamintetraessigsäure (EDTA)	2,84	0,00026696
F⊕	0,391	0,000036754
Fe ⁺⁺	0,618	0,000058092
H ₂ O	137000	12,878
Isopropanol	0,154	0,000014476

Outputflüsse	Output Referenzfluss [kg/m ² Wafer]	Output skaliert auf einen Die mit der Größe 0,94 cm ² [kg/Die]
K+	83,9	0,0078866
Methanol	0,000335	3,149E-08
Mg ++	6,39	0,00060066
Na+	6,77	0,00063638
NH4+	5,23	0,00049162
NO2+	0,00000267	2,5098E-10
NO3-	6,39	0,00060066
PO4+	6,38	0,00059972
Organochlorine compounds	1,24E-08	1,1656E-12
SO3+	0,335	0,00003149
SO4+	62,7	0,0058938
Tetramethylammonium hydroxide	22,9	0,0021526
Al2O3	1,89	0,00017766
As2O3	0,0000235	2,209E-09
Cu	0,0283	2,6602E-06
Davon Wasser (H2O)	1,27	0,00011938
Davon Natriumhydroxid (NaOH)	0,000509	4,7846E-08
Davon Quarzsand (SiO2)	0,141	0,000013254
SiO	1,9	0,0001786
W	0,0403	3,7882E-06
WO3	0,00608	5,7152E-07
Abfälle (feste Reststoffe)		
*AsO3+	2,81E-07	2,6414E-11
*OCl-	2,73E-07	2,5662E-11
Al2O3	1,89	0,00017766
As	0,000159	1,4946E-08
As2O3	0,00305	2,867E-07
B	0,000207	1,9458E-08
B2O3	0,000447	4,2018E-08
B03---	0,00000304	2,8576E-10
Br-	0,0000103	9,682E-10
Br2	1,72E-07	1,6168E-11
C (undef)	0,0000421	3,9574E-09
Ca(OH)2	0,0000146	1,3724E-09
Ca++	0,000884	8,3096E-08
CaF2	7,45	0,0007003
CH3CH2OH	0,00000147	1,3818E-10
Cl-	0,00934	8,7796E-07

Outputflüsse	Output Referenzfluss [kg/m ² Wafer]	Output skaliert auf einen Die mit der Größe 0,94 cm ² [kg/Die]
Cl2	7,02E-08	6,5988E-12
CO ₂	0,00092	8,648E-08
CO3--	0,0244	2,2936E-06
Cu	0,000117	1,0998E-08
Cu slurry	26,9	0,0025286
Cu++	21,6	0,0020304
EDTA	1,45E-07	1,363E-11
Ethyl lactate	13,4	0,0012596
F-	1,03	0,00009682
Fe++	0,00000571	5,3674E-10
Gamma-butyrolactone	0,00000106	9,964E-11
H ₂ O	88,9	0,0083566
H ₂ SO ₄	42,2	0,0039668
H3PO ₄	3,22E-07	3,0268E-11
HCL	3,65E-08	3,431E-12
HF	16,3	0,0015322
Hexafluoro-acetylacetonate	0,0688	6,4672E-06
Hexamethyldisilazane	0,171	0,000016074
HNO3	0,0257	2,4158E-06
K+	0,0172	1,6168E-06
Methanol	6,9E-08	6,486E-12
Mg++	0,00114	1,0716E-07
Na+	0,00122	1,1468E-07
NH3	1,76E-07	1,6544E-11
NH4+	0,979	0,000092026
NH4Cl	0,0415	0,000003901
NH4OH	9,5E-10	8,93E-14
N-Methyl-2-pyrrolidone	0,354	0,000033276
PO2-	5,49E-10	5,1606E-14
NO3-	0,0000486	4,5684E-09
P	0,00608	5,7152E-07
P2O5	0,0233	2,1902E-06
Propylene glycol methyl ether acetate (PGMEA)	2,4	0,0002256
P04---	0,000153	1,4382E-08
Organochlorine compounds	4,84E-07	4,5496E-11
Si	0,00742	6,9748E-07
Si3N4	0,0358	3,3652E-06
SiO2	2,12	0,00019928

Outputflüsse	Output Referenzfluss [kg/m ² Wafer]	Output skaliert auf einen Die mit der Größe 0,94 cm ² [kg/Die]
S03--	0,000069	6,486E-09
S04--	32,6	0,0030644
Tetramethylammonium hydroxide	0,00000282	2,6508E-10
W	0,229	0,000021526
W03	0,261	0,000024534
Ion exchange resin	1,11	0,00010434

4.3.7 Treibhausgaspotenzial

Der in Abschnitt 4.3.6 beschriebene Datensatz wurde mit Hilfe der Software Umberto und Vorkettendatensätzen aus ecoinvent 2.0 von Schmidt et al. (2011) bilanziert. Obwohl bei der Waferfertigung überwiegend hochreine Gase und Chemikalien verwendet werden, mussten Schmidt et al. aufgrund der schlechten Datenlage dazu Vorketten für „Standardmaterialien“ aus ecoinvent 2.0 verwenden.

Die Wirkungsabschätzung mit ecoinvent 2.0 zeigt, dass in fast allen Wirkungskategorien der Energieverbrauch den höchsten Einfluss hat, gefolgt von den Vorketteneinflüssen der Chemikalienproduktion. Im Bereich der Chemikalien hat die Bereitstellung von Stickstoff den größten Einfluss. Der Anteil von Transport, Abfallbehandlung und Infrastrukturprozessen ist in allen Wirkungskategorien gering.

Bei der Bewertung mit ecoinvent 2.0 ergibt sich ein Treibhausgaspotential von 21 t CO₂e pro m² Wafer (entspricht ca. 2 kg CO₂e pro Die bei einer Die-Fläche von 0,94 cm²). Dabei verursachen die direkten Treibhausgasemissionen etwa 6% dieses Potentials, der Energieverbrauch etwa 75%.

4.3.8 Datenqualitätsanalyse

Die von Schmidt et al. (2011) gelisteten Chemikalien und Mengen wurden von der SEMATECH Carbon Footprint Working Group (CFWG) geprüft und mit deren Industriedaten von Fabs für Logikwafer verglichen. Die Vergleichsprodukte variieren laut SEMATECH CFWG hinsichtlich Alter und Technologiegeneration. Zudem zeigte sich beim Vergleich der unterschiedlichen Fabdaten, dass die Mengen der eingesetzten Chemikalien zwischen den Fabs stark schwankt, was auf die breite Produktpalette der betrachteten Fabs zurückzuführen ist. Die in Tabelle 67 dargestellten Werte zeigen, inwiefern die Daten der SEMATECH CFWG von denen des Papers von Schmidt et al. (2011) abweichen.

Die unterschiedlichen Fabs und Produkttypen benötigen unterschiedliche Chemikalien. Einige der in Tabelle 67 genannten Chemikalien werden von allen Fabs verwendet (z.B. Schwefelsäure, PFCs, Wasserstoffperoxid), einige nur von einem Teil der Fabs und nur für einzelne Produkttypen eingesetzt und andere Chemikalien werden in den Fabs der SEMATECH CFWG gar nicht verwendet.

Des Weiteren sind die Einschätzungen der SEMATECH CFWG unterschieden nach den Wafergrößen 200 mm und 300 mm (jeweils im Vergleich zu den Zahlen von Schmidt et al. (2011) für 300-mm-Wafer) und verdeutlichen die Unterschiede in der Chemikaliennutzung bei diesen

beiden Technologien. Für Wafer der Größe 300 mm sind besonders große Abweichungen mit grauer Hintergrundfarbe der Zellen gekennzeichnet. Die Zahlen in der Tabelle geben keinen genauen Faktor, sondern immer eine Spanne eines Faktors an.

- < 1: Daten von Schmidt et al. (2011) sind um den Faktor 0 – 1 kleiner als der Industriedurchschnitt nach SEMATECH CFWG
- > 1: Daten von Schmidt et al. (2011) sind um den Faktor 1 – 10 größer als der Industriedurchschnitt nach SEMATECH CFWG
- > 10: Daten von Schmidt et al. (2011) sind um den Faktor 10 – 100 größer als der Industriedurchschnitt nach SEMATECH CFWG
- > 100: Daten von Schmidt et al. (2011) sind um den Faktor 100 – 1.000 größer als der Industriedurchschnitt nach SEMATECH CFWG
- > 1.000: Daten von Schmidt et al. (2011) sind um den Faktor 1.000 – 10.000 größer als der Industriedurchschnitt nach SEMATECH CFWG
- > 10.000: Daten von Schmidt et al. (2011) sind um mehr als den Faktor 10.000 größer als der Industriedurchschnitt nach SEMATECH CFWG

Ist für einzelne Chemikalien kein Vergleichswert angegeben, bedeutet dies nicht, dass die Chemikalien laut SEMATECH CFWG nicht verwendet wurden, sondern nur, dass keine Einschätzung gegeben wird.

Tabelle 67: Inputdaten für den Datensatz „Herstellung CPU-Wafer“ - Vergleich der Daten von Schmidt et al. (2011) mit der Einschätzung der SEMATECH CFWG

Inputflüsse	Menge	Einheit	Unterschied zu Industriedaten	
			200 mm	300 mm
Chemikalienverbrauch in der Produktion				
2-Methylaminoethanol	5,45	kg/m ² Wafer	> 1	> 10
Aceton	1,39	kg/m ² Wafer	> 1	< 1
Argon	41,4	kg/m ² Wafer	> 10.000	> 10.000
Arsenwasserstoff (AsH ₃)	0,00403	kg/m ² Wafer		> 10
Arsenwasserstoff (AsH ₃) 0.7% in Wasserstoff (H ₂)	0,0000945	kg/m ² Wafer		
Diboran (B ₂ H ₆) 5% in Stickstoff (N ₂)	0,0034	kg/m ² Wafer		> 10
Bortrichlorid (BCl ₃)	0,024	kg/m ² Wafer	< 1	> 1
80% Wasser (H ₂ O), 20% Ammoniumfluorid/Fluorwasserstoffsäure (HF) (20:1)	10,3	kg/m ² Wafer		
80% Wasser (H ₂ O), 20% Ammoniumfluorid/Fluorwasserstoffsäure (HF) (500:1)	4,62	kg/m ² Wafer		
Butylacetat	2,94	kg/m ² Wafer	> 1	< 1
Kohlenstoff (C) (undef.)	0,422	kg/m ² Wafer		
Hexafluorethan (C ₂ F ₆)	0,601	kg/m ² Wafer		
Octafluorocyclobutan (C ₄ F ₈)	0,0574	kg/m ² Wafer	< 1	> 1
Perfluorocyclopenten (C ₅ F ₈)	0,0527	kg/m ² Wafer		
Tetrafluormethan (CF ₄)	0,268	kg/m ² Wafer	> 1	> 1

Inputflüsse		Menge	Einheit	Unterschied zu Industriedaten	
				200 mm	300 mm
	Difluormethan (CH ₂ F ₂)	0,0192	kg/m ² Wafer		> 1
	Fluormethan (CH ₃ F)	0,00335	kg/m ² Wafer		
	Fluoroform (CHF ₃)	0,0069	kg/m ² Wafer		< 1
	Chlor (Cl ₂)	0,0411	kg/m ² Wafer		< 1
	Kohlenstoffmonoxid (CO)	0,00368	kg/m ² Wafer		
	Cu(hexafluoro-acetylacetonate) ₂	0,0881	kg/m ² Wafer		
	Kupfersulfat (CuSO ₄)	57,3	kg/m ² Wafer	> 100	> 100
	1% Fluorwasserstoffsäure (HF) in Wasser (H ₂ O)	39,7	kg/m ² Wafer		
	Ethylendiamintetraessigsäure (EDTA)	2,88	kg/m ² Wafer		> 10
	Milchsäureethylester	24,9	kg/m ² Wafer	> 10	> 10
	1% Fluor (F ₂) in Krpton (Kr)	0,00122	kg/m ² Wafer		
	Gamma-butyrolacton	0,118	kg/m ² Wafer		
	Wasserstoff (H ₂)	1,98	kg/m ² Wafer	> 1.000	> 1
	Sulfoxylsäure (H ₂ O ₂)	0,364	kg/m ² Wafer		
	Wasserstoffperoxid (H ₂ O ₂) (30%)	52,6	kg/m ² Wafer	> 1	< 1
	Schwefelsäure (H ₂ SO ₄)	29,3	kg/m ² Wafer		
	Schwefelsäure H ₂ SO ₄ (98%)	43,4	kg/m ² Wafer	< 1	> 1
	Phosphorsäure (H ₃ PO ₄) (85%)	6,84	kg/m ² Wafer	< 1	< 1
	Bromwasserstoffsäure (HBr)	0,0517	kg/m ² Wafer		> 1
	Chlorwasserstoff (HCl)	0,216	kg/m ² Wafer		< 1
	Chlorwasserstoff (HCl) (37%)	122	kg/m ² Wafer	> 10	> 1
	Helium (He)	0,000553	kg/m ² Wafer		
	Fluorwasserstoffsäure (HF)	0,307	kg/m ² Wafer	< 1	< 1
	Fluorwasserstoffsäure (HF) (50%)	33,3	kg/m ² Wafer	> 1	> 1
	Fluorwasserstoffsäure flüssig (0.5%)	1,99	kg/m ² Wafer		
	Hexamethyldisilazan	0,228	kg/m ² Wafer		> 1
	Salpetersäure (HN ₃)	0,927	kg/m ² Wafer		
	Salpetersäure (HN ₃) (69%)	4,11	kg/m ² Wafer	> 1	< 1
	Salpetersäure (HN ₃)/HF 50	2,57	kg/m ² Wafer		
	Isopropanol	30,7	kg/m ² Wafer	> 1	> 1
	Kaliumhydroxid (KOH)	116	kg/m ² Wafer	> 1.000	> 1.000
	Kaliumhydroxid (KOH) (40%)	0,428	kg/m ² Wafer		
	Krypton/Neon (Kr/Ne)	0,000608	kg/m ² Wafer		
	Methyl-nonafluorbutyl-Äther	1,05	kg/m ² Wafer	> 1.000	> 100
	Stickstoff (N ₂)	2040	kg/m ² Wafer	> 1.000	> 1.000
	Distickstoffmonoxid (N ₂ O)	0,365	kg/m ² Wafer	< 1	< 1
	Natriumhydroxid (NaOH)	0,71	kg/m ² Wafer		
	Stickstofftrifluorid (NF ₃)	0,161	kg/m ² Wafer	< 1	< 1

Inputflüsse		Menge	Einheit	Unterschied zu Industriedaten	
				200 mm	300 mm
	Ammoniak (NH ₃)	0,0506	kg/m ² Wafer		
	Ammoniak (NH ₃) (25%)	6,47	kg/m ² Wafer	< 1	< 1
	Ammoniumhydroxid (NH ₄ OH)	0,0946	kg/m ² Wafer		
	Ammoniumhydroxid (NH ₄ OH) (2%)	2,98	kg/m ² Wafer	> 1	< 1
	N-Methyl-2-pyrrolidon	5,47	kg/m ² Wafer		>100
	Sauerstoff (O ₂)	222	kg/m ² Wafer	> 100	> 100
	Propylene glycol methyl ether acetate (PGMEA)	2,92	kg/m ² Wafer	< 1	< 1
	Monophosphan (PH ₃)	0,00353	kg/m ² Wafer		
	Monophosphan (PH ₃) 1% in Wasserstoff (H ₂)	0,0000731	kg/m ² Wafer		
	Monophosphan (PH ₃) 30% in Silan (SiH ₄)	0,00519	kg/m ² Wafer		
	Triethylphosphat (P(O)(OC ₂ H ₅) ₃)	0,0442	kg/m ² Wafer		> 100
	Trimethylphosphat (P(O)(OCH ₃) ₃)	0,0114	kg/m ² Wafer		
	Propylene glycol	0,716	kg/m ² Wafer		< 1
	Reiner Stickstoff (N ₂)	3300	kg/m ² Wafer		
	Schwefelhexafluorid (SF ₆)	0,725	kg/m ² Wafer		> 10
	Ethylsilicat (Si(OC ₂ H ₅) ₄)	0,152	kg/m ² Wafer		
	Disilan (Si ₂ H ₆)	0,005	kg/m ² Wafer		
	Siliciumtetrachlorid (SiCl ₄)	0,00865	kg/m ² Wafer		< 1
	Siliciumtetrafluorid (SiF ₄)	0,00166	kg/m ² Wafer		< 1
	Dichlorsilan (SiH ₂ Cl ₂)	0,0529	kg/m ² Wafer		> 1
	Silan (SiH ₄)	0,0729	kg/m ² Wafer		> 1
	Tetramethylammoniumhydroxide	28,2	kg/m ² Wafer	> 10	> 10
	Trimethylvinylsilane	0,0533	kg/m ² Wafer		
	Ultra high Purity (UHP)-Ar	3,72	kg/m ² Wafer		< 1
	UHP-H ₂	0,405	kg/m ² Wafer		< 1
	UHP-He	0,226	kg/m ² Wafer		< 1
	UHP-N ₂	22,4	kg/m ² Wafer		
	UHP-O ₂	6,08	kg/m ² Wafer		
	Wolfram(VI)-fluorid (WF ₆)	0,345	kg/m ² Wafer		< 1
	Schlacke gesamt	94,5	kg/m ² Wafer	> 1	> 1
	davon Wasser	85	kg/m ² Wafer		
	davon Natriumhydroxid	0,034	kg/m ² Wafer		
	davon Quarzsand	9,45	kg/m ² Wafer	< 1	< 1
Wasser und Energie					
	Wasser	160.000	kg/m ² Wafer		> 1
	Strom	30.201,8	kWh/m ² Wafer		
	Erdgas	45,5	kg/m ² Wafer		

Die von Schmidt et al. (2011) angegebenen Outputdaten wurden von SEMATECH CFWG ebenfalls bewertet und als nicht repräsentativ eingestuft, da laut SEMATECH CFWG die meisten gelisteten Emissionen bei Waferfabs gar nicht auftreten. Dies wird darauf zurückgeführt, dass diese Emissionen zum Teil basierend auf den Inputchemikalien modelliert und nicht gemessen wurden. Als Beispiel für eine Emission, die bei Waferfabs real nicht auftreten soll, wird As_2O_3 genannt. Schmidt et al. (2011) beschreiben die Emissionen als teilweise berechnet auf Basis der Inputdaten und teilweise wurden Primärdaten aus Messungen an existierenden Fabs erhoben.

Die Hauptemissionen laut SEMATECH sind korrosive Emissionen wie HCl, HF und NH_3 sowie flüchtige organische Verbindungen (VOCs). Zudem gibt es in modernen Fabs Abluftreinigung:

- Dezentrale, prozessnahe Abgasreinigung für PFCs
- Dezentrale, prozessnahe Abgasreinigung für selbstentzündliche Gase
- Nassreinigung für korrosive Bestandteile
- Thermische Oxidation für VOC-Bestandteile

Ebenso werden die Angaben zu Abfällen und Abwasserzusammensetzung als nicht charakteristisch eingestuft. Außerdem konnte ein Teil der Inputchemikalien mit den vorhandenen Datenbanken nicht abgebildet werden, weil diese Daten nicht verfügbar waren. Insbesondere komplexere Chemikalien, wie Tetramethylammoniumhydroxid, aber auch Kupfersulfat und Methylnonafluorbutyl-Äther konnten nicht modelliert werden.

Sensitivitätsanalyse

Um den Einfluss der Inputchemikalien für 300-mm Wafer mit den größten Abweichungen näher bestimmen zu können, wurde eine Modellierung mit der Software GaBi sowie deren Datenbank und der ecoinvent-Datenbank 2.0 durchgeführt. Dabei wurde ein Fokus auf die in Tabelle 67 markierten Chemikalien gelegt, für die bei den 300-mm-Wafern die Daten nach Schmidt et al. (2011) besonders stark von den Angaben von SEMATECH CFWG abweichen.

Ein Teil der Inputchemikalien konnte mit den vorhandenen Datenbanken⁹¹ nicht abgebildet werden, weil diese Daten nicht verfügbar waren. Insbesondere komplexere Chemikalien, wie Tetramethylammoniumhydroxid konnten nicht modelliert werden. Die folgende Tabelle 68 zeigt daher die in der Modellierung nicht berücksichtigten Chemikalien.

Tabelle 68: Nicht berücksichtigte Inputflüsse für die Modellierung des Schmidt et al. (2011) Datensatzes

Inputflüsse	Menge [kg/m ² Wafer]
Chemikalienverbrauch in der Produktion	
2-Methylaminoethanol	5,45
Octafluorocyclobutan (C4F8)	0,0574
Perfluorocyclopenten (C5F8)	0,0527
Tetrafluormethan (CF4)	0,268

⁹¹ Prüfung mit zwei kommerziellen Datenbanken

Inputflüsse	Menge [kg/m ² Wafer]
Difluormethan (CH ₂ F ₂)	0,0192
Fluormethan (CH ₃ F)	0,00335
Cu(hexafluoro-acetylacetonate) ₂	0,0881
Kupfersulfat (CuSO ₄)	57,3
Milchsäureethylester	24,9
Bromwasserstoffsäure (HBr)	0,0517
Methyl-nonafluorbutyl-Äther	1,05
Distickstoffmonoxid (N ₂ O)	0,365
Stickstofftrifluorid (NF ₃)	0,161
Ammoniumhydroxid (NH ₄ OH)	0,0946
Propylene glycol methyl ether acetate (PGMEA)	2,92
Triethylphosphat (PO(OC ₂ H ₅) ₃)	0,0442
Trimethylphosphat (PO(OCH ₃) ₃)	0,0114
Propylene glycol	0,716
Ethylsilicat (Si(OC ₂ H ₅) ₄)	0,152
Disilan (Si ₂ H ₆)	0,0005
Siliciumtetrafluorid (SiF ₄)	0,00166
Dichlorsilan (SiH ₂ Cl ₂)	0,0529
Silan (SiH ₄)	0,0729
Tetramethylammoniumhydroxide	28,2
Trimethylvinylsilane	0,0533
Wolfram(VI)-fluorid (WF ₆)	0,345

Basierend auf den vorhandenen Datensätzen wurde für folgende Inputchemikalien eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt, um die Auswirkung der Abweichung auf ausgesuchte Umweltwirkungskategorien zu prüfen:

- Argon
- Kaliumhydroxid (KOH)
- Stickstoff (N₂)
- N-Methyl-2-pyrrolidon
- Sauerstoff (O₂)

Die Sensitivitätsanalyse für die fünf genannten Chemikalien, deren Verbrauch Schmidt et al. (2011) nach SEMATECH CFWG stark überschätzt (Faktor >100 in Tabelle 67), wurde exemplarisch für die Wirkungskategorien Eutrophierungspotential, Treibhauspotential und Frischwasserverbrauch mit dem jeweiligen in Tabelle 67 dargestellten Faktor durchgeführt. Aus früheren Studien ist erkennbar, dass diese Wirkungskategorien eine besondere Relevanz für die Bewertung der Chip-Herstellung haben, vgl. Prakash et al. (2013) und Boyd (2012).

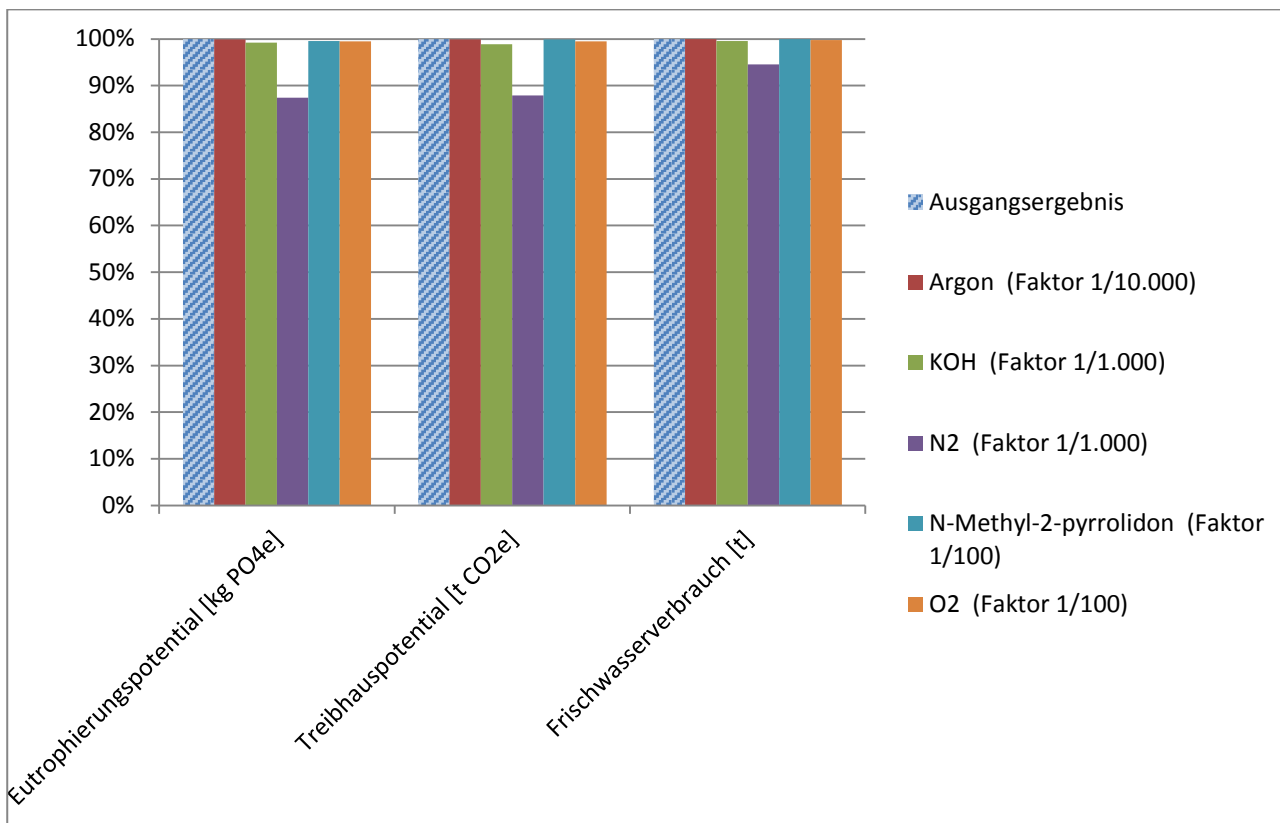
Die Sensitivitätsanalyse zeigt, dass eine Änderung der von Schmidt et al. (2011) angegebenen Daten um den von SEMATECH CFWG genannten Faktor (d.h. verringerter Verbrauch) lediglich

im Falle des Stickstoffverbrauchs zu einer signifikanten Änderung des Gesamtergebnisses führt (siehe Tabelle 69 und Abbildung 20).

Tabelle 69: Sensitivitätsanalyse der Chemikalien mit der größten Abweichung

Wirkungskategorie	Gesamtergebnis mit Daten nach Schmidt et al (2011)	Gesamt-Ergebnis mit verringertem Wert für Argon (Faktor 1/10.000)	Gesamt-Ergebnis mit verringertem Wert für KOH (Faktor 1/1.000)	Gesamt-Ergebnis mit verringertem Wert für N ₂ (Faktor 1/1.000)	Gesamt-Ergebnis mit verringertem Wert für N-Methyl-2-pyrrolidon (Faktor 1/100)	Gesamt-Ergebnis mit verringertem Wert für O ₂ (Faktor 1/100)
Eutrophierungspotential [kg PO ₄ e]	62,03	61,98	61,53	54,24	61,75	61,72
Treibhauspotential [t CO ₂ e]	19,09	19,08	18,87	16,77	19,07	19,00
Frischwasserverbrauch [t]	32,7	32,69	32,55	30,93	32,69	32,63

Abbildung 20: Sensitivitätsanalyse der Chemikalien mit der größten Abweichung



Die stärkste Abweichung ergab sich durch den Einfluss des Stickstoffverbrauchs. Berechnet man die Gesamt-Umweltauswirkungen mithilfe der Daten von Schmidt et al. (2011), dann wird ein großer Teil der Umweltauswirkungen in den drei untersuchten Wirkungskategorien vom Stickstoffverbrauch verursacht, wie man Tabelle 70 entnehmen kann. Änderungen in den Daten für den Stickstoffverbrauch wirken sich deshalb besonders stark aus. Die Ergebnisse für fünf ausgewählte Stoffe der Sensitivitätsanalyse sind in Anhang 1 tabellarisch dargestellt.

Tabelle 70: Anteil des Stickstoffs am Gesamtergebnis der jeweiligen Wirkungskategorie (Sensitivitätsanalyse)

Stickstoff (N ₂)	Anteil am Gesamtergebnis bei Berechnung mit Daten nach Schmidt et al. (2011)	Anteil am Gesamtergebnis bei Berechnung mit verringertem Verbrauch (Faktor 1/1.000) (gerundet)
Eutrophierungspotential	12,58%	0,01%
Treibhauspotential	12,15%	0,01%
Frischwasserverbrauch	5,43%	0,01%

Für einige Chemikalien schätzte SEMATECH CFWG den Verbrauch bei den 300-mm-Wafern allerdings nicht niedriger, sondern höher ein als von Schmidt et. al (2011) angegeben. Für diese Chemikalien ist in Tabelle 67 der Faktor mit „<1“ angegeben. Für sie soll eine weitere Sensitivitätsanalyse durchgeführt werden. SEMATECH CFWG macht jedoch keine Angaben darüber, wie hoch die Werte tatsächlich sind. Exemplarisch wurde daher ein Faktor von 100 angenommen. Ähnlich wie bei der weiter oben durchgeführten Sensitivitätsanalyse wird für diese Chemikalien untersucht, wie es sich auswirkt, wenn man die von Schmidt et al (2011) angegebenen Werte mit dem Faktor 100 multipliziert. Dies wurde wiederum für die Wirkungskategorien Eutrophierungspotential, Treibhauspotential und Frischwasserverbrauch durchgeführt.

Aufgrund fehlender Daten in den vorhandenen Ökobilanzdatenbanken konnten auch hier nicht alle Inputflüsse abgebildet werden (siehe Tabelle 68). Nicht betrachtet bei der Sensitivitätsanalyse wurden:

- Distickstoffmonoxid (N₂O)
- Stickstofftrifluorid (NF₃)
- Propylene glycol methyl ether acetate (PGMEA)
- Propylene glycol
- Siliciumtetrachlorid (SiCl₄)
- Siliciumtetrafluorid (SiF₄)
- Wolfram(VI)-fluorid (WF₆)

Tabelle 71: Sensitivitätsanalyse (mögliches Unterschätzen des Ergebnisses)

Inputflüsse	Angaben Schmidt et al. (2011) [kg/m ² Wafer]	Annahmen Sensitivitätsanalyse (Faktor 100)
Chemikalienverbrauch in der Produktion		
Aceton	1,39	139
Butylacetat	2,94	294
Fluoroform (CHF ₃)	0,0069	0,69
Chlor (Cl ₂)	0,0411	4,11
Wasserstoffperoxid (H ₂ O ₂) (30%)	52,6	5260
Phosphorsäure (H ₃ P ₀ 4) (85%)	6,84	684
Chlorwasserstoff (HCl)	0,216	21,6
Fluorwasserstoffsäure (HF)	0,307	30,7

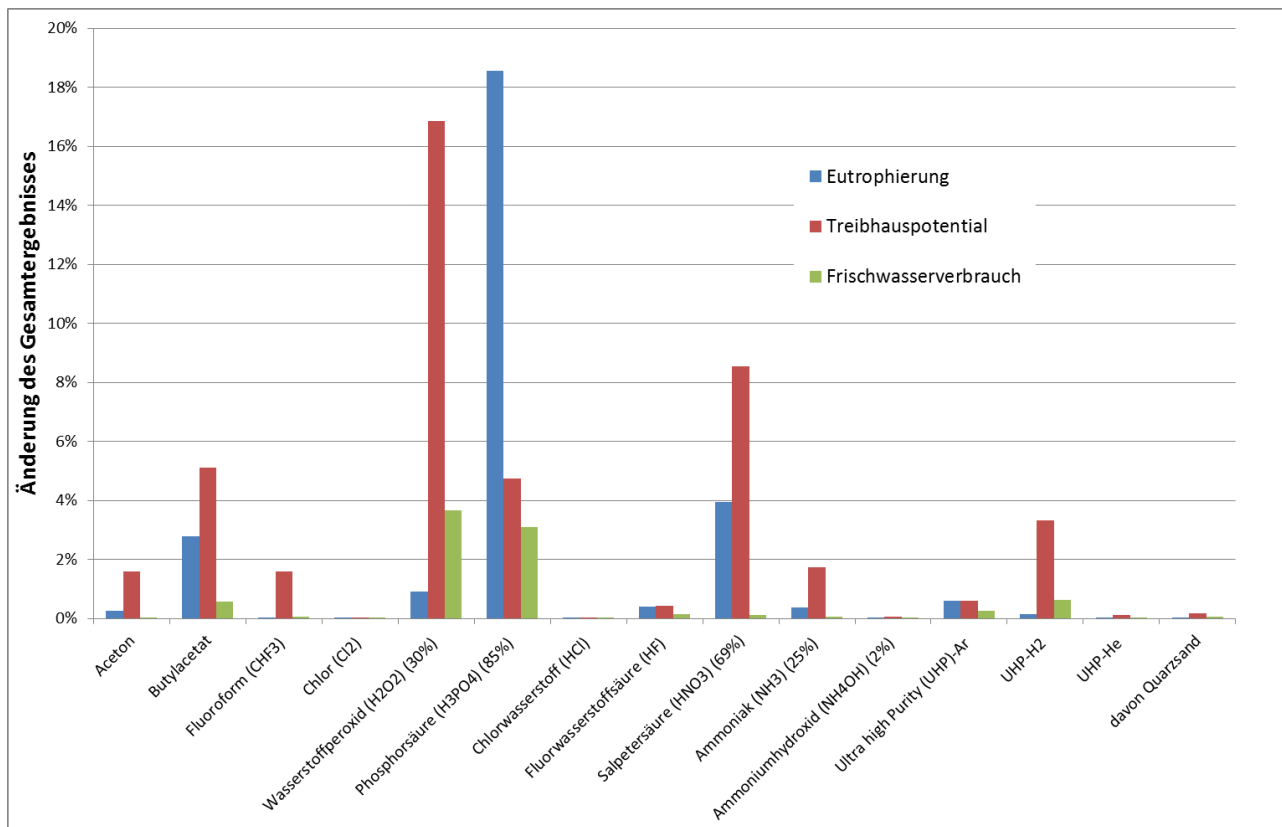
Inputflüsse	Angaben Schmidt et al. (2011) [kg/m ² Wafer]	Annahmen Sensitivitätsanalyse (Faktor 100)
Salpetersäure (HNO ₃) (69%)	4,11	411
Ammoniak (NH ₃) (25%)	6,47	647
Ammoniumhydroxid (NH ₄ OH) (2%)	2,98	298
Ultra high Purity (UHP)-Ar	3,72	372
UHP-H ₂	0,405	40,5
UHP-He	0,226	22,6
Schlacke, davon Quarzsand	9,45	945

Die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse für Chemikalien, deren Verbrauch Schmidt et al. (2011) nach SEMATECH CFWG unterschätzt (Faktor <1 in Tabelle 67) sind in Abbildung 21 dargestellt. Für das Treibhauspotential ergibt sich nur für Chemikalien Wasserstoffperoxid und Salpetersäure eine signifikante Änderung der Umweltauswirkungen (16,8% und 8,5%). Für die anderen Chemikalien können die Änderungen zum gesamten ökobilanziellen Ergebnis für das Treibhauspotential mit unter 5% vernachlässigt werden.

In der Wirkungskategorie Eutrophierung führt nur die Erhöhung des Phosphorsäure-Wertes zu einer signifikanten Änderung des Gesamtergebnisses mit einer Steigerung um 18,5%.

Die Abweichungen in der Umweltwirkungskategorie Frischwasserverbrauch sind mit einer Änderung von unter 4% zu vernachlässigen.

Abbildung 21: Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse (mögliches Unterschätzen des Ergebnisses) (Berechnung und grafische Darstellung: TU Berlin)



Die Diskussion der Daten mit der SEMATECH CFWG zeigt, dass einzelne Daten zwar einer großen Unsicherheit unterliegen und Einzelwerte stark diskussionswürdig sind. Im Vergleich zum gesamten ökobilanziellen Ergebnis sind diese Unsicherheiten aber mit Ausnahme der Daten für Stickstoff, Wasserstoffperoxid und der Salpetersäure von keiner besonderen Relevanz. Gleichzeitig ist die Veröffentlichung von Schmidt et al. (2011) eine der wenigen, die nicht nur aggregierte CO₂e-Werte, sondern einzelne In- und Outputflüsse nennt und damit eine der aktuellsten und transparentesten Veröffentlichungen zu diesem Thema.

4.3.9 Ergebnis und Auswertung für das Packaging der CPU

Für Flip-Chip-BGA-Aufbauten (Ball Grid Array) sind üblicherweise drei Fertigungsstandorte relevant (Yole 2013):

1. Front-End-Fertigung der Wafer einschließlich Bumping und nachfolgendem Wafertest (Europa, USA oder Asien)
2. Substratfertigung durch Zulieferer (Japan, Taiwan, China, Korea)
3. Flip-Chip-Bestückung/Back-End

Intel zeichnet zwar für das Layout der Flip-Chip-Substrate verantwortlich, fertigt diese jedoch nicht selbst. Die entsprechenden Herstellungsaufwände für das Substrat sind daher nicht in den Umweltbilanzen erfasst, sofern diese nur Scope 1 und Scope 2 Emissionen beinhalten. In Intels eingangs zitierter Carbon-Footprint-Bilanz von Higgs (2009) können die Beiträge für Assembly und Test Materials mit einem 11,5%igen Anteil gerechnet werden. Die Substratherstellung kann nicht über einen Aufschlag wie bei der Speicherchipbilanzierung (Prakash et al. 2013) erfolgen, sondern eine gesonderte Bilanzierung der Substratherstellung ist erforderlich. Nach Yole (2013) kann davon ausgegangen werden, dass der Bumpingprozess mit dem zugehörigen Wafertest heute Teil der Front-End-Fertigung ist und dieser zugerechnet werden müsste. Der von Schmidt et al. (2011) beschriebene Front-End-Prozess endet jedoch vermutlich mit der Waferreinigung und dem Polieren der Waferoberfläche (vgl. Kapitel 4.3.5): Schmidt et al. (2011) haben die durchschnittliche Fertigung von Logikchips bilanziert, die in ihrer ganz überwiegenden Anzahl noch immer drahtgebondet (Back-end-Prozess) und nicht gebumpt werden, und zudem erfolgt vielfach das Bumping durch spezielle Dienstleister, sprich in einer anderen Fab. Daher wird angenommen, dass ein Bumpingprozess nicht in dem Front-End-Prozess von Schmidt et al. (2011) berücksichtigt und eine gesonderte Bilanzierung notwendig ist.

Bumpingprozess

Der Bumpingprozess beschreibt ein Verfahren der Aufbau- und Verbindungstechnik zur Kontaktierung von unverkapselten Chips mittels sogenannter Bumps⁹². Der Chip wird bei diesem Verfahren direkt mit der aktiven Kontaktierungsseite nach unten zum Substrat (Schaltungsträger) montiert. Das Verfahren hat den Vorteil, dass besonders geringe Abmessungen des Gehäuses und kurze Leiterlängen möglich sind.

⁹² Auf dem unverkapselten Chip werden entsprechende Kontaktierstellen mit einer Höhe von weniger als 100 µm vorbereitet. Diese Kontaktierstellen werden als „Bumps“ bezeichnet.

Die von Intel, AMD und anderen in der Halbleiterbranche derzeit angewendete Bumping-Technologie für Flip Chips arbeiten mit galvanisch aufgebrachte Bumps. Im Falle von Intel sind nach Aussage des Marktforschungsunternehmens TechSearch Int. alle Flip-Chip-Bumps als Kupfersäulen (auch Copper Pillars genannt) ausgeführt (Vardaman 2013).

Intels Copper Pillar Technologie ist in Vardaman (2013, Folie 8) dargestellt. Erkennbar ist der Copper Pillar auf der Flip-Chip-Seite, der nachfolgend mit einer lötbaren Metallisierung versehen wurde.

Nach dem Bondingprozess ist eine NiSnCu-Schicht vorhanden, welche aber ursprünglich als Nickelschicht mit Goldoberfläche aufgetragen wurde. Der minimale Goldanteil hat sich durch den Lötprozess in den angrenzenden metallischen Schichten verteilt. Das Zinn-Silber-Lot (AgSn), stellt den Kontakt zu dem gegenüberliegenden Pad her. Dieses besteht aus Kupfer, welches ebenfalls mit einer Nickel-Phosphor Underbump-Metallisierung (NiP) versehen wurde.

Die für das Bonding relevante Prozessfolge lässt sich in Anlehnung an Vardaman (2013) und Yole (2013)⁹³ angeben mit:

1. Aufspütern einer Metallschicht, die als Grundlage für die spätere Kupferabscheidung dient
2. Aufbringung Resistmaske für die Bump- bzw. Pillarabscheidung
3. Galvanische oder elektrochemische Kupferabscheidung (Pillar)
4. Galvanische oder elektrochemische Nickelabscheidung
5. Galvanische Lot-Abscheidung
6. Entfernung Photoresist (Strippen)
7. Umschmelzen der Lotkappe (Reflow)
8. Chip-Test

Die einzelnen Prozessschritte der Copper-Pillar-Fertigung sind bei Chipbond 2014 dargestellt.

Neben den Materialverbräuchen für den Copper-Pillar-Aufbau (UBM⁹⁴, Kupfer, Nickel, Lotkappe) sind als Hilfsstoffe der Fotoresist⁹⁵ und das Medium zum Strippen des Resists zu berücksichtigen. Des Weiteren sind den Anwendungsempfehlungen von DuPont als einem Hersteller relevanter Trockenresistfilme zufolge folgende weitere Betriebs- und Hilfsstoffe sowie thermische Prozesse den Trockenresist betreffend zu konstatieren. Quantitative Verbrauchsdaten sind nur teilweise verfügbar (DuPont™ WBR™ 2000 Series, Data Sheet & Processing Information):

- Vorreinigung Waferoberfläche mit 2-3%iger Schwefelsäurelösung, Spülung mit DI-Wasser, Trocknen mit Stickstoff
- Laminieren bei 95°C

⁹³ Yole bezieht sich hierbei auf einen Copper Pillar Bumping Prozess von ASE (Taiwanesischer Halbleiterhersteller).

⁹⁴ UBM: Under Bump Metallurgy bezeichnet den Metallisierungsprozess unter den Bumps.

⁹⁵ Fotoresist: bezeichnet einen speziellen Fotolack der für die fotolitografische Strukturierung bei der CPU-Herstellung verwendet wird.

- Aushärten des Resists für 20 Minuten bei 65°C
- Belichtung mit 10-20 mW/cm²
- Aushärten nach der Belichtung entweder 25 Minuten bei 85°C im Ofen oder 55 Sekunden bei 100°C auf Heizplatte
- Entwicklung mit 1%iger Na₂CO₃/K₂CO₃-Lösung bei 28°C und einem Durchfluss von 200 ml/min und 150 Sekunden Entwicklungszeit (für einen 100 µm dicken Resistfilm bei 300-mm-Wafern); Stickstoffspray: 40 Nm²/min
 - Aus diesen Angaben ergeben sich für einen 300-mm-Wafer folgende Verbräuche:
 - 5 g/Wafer Na₂CO₃ oder K₂CO₃
 - 500 ml/Wafer DI-Wasser (der Entwicklerlösung)
 - 100 Nm³/Wafer Stickstoff
- Spülen mit DI-Wasser bei gleichem Druck wie beim Entwicklungsschritt und mindestens der halben Entwicklungszeit, folglich pro 300-mm-Wafer zusätzlich:
 - 250 ml/Wafer DI Wasser
- Trocknen mit Stickstoff bei einem Volumenstrom von 40 Nm²/min über 30 Sekunden, folglich pro Wafer weitere
 - 20 Nm³/Wafer Stickstoff
- Erneutes Aushärten nach der Entwicklung entweder 25 Minuten bei 85°C im Ofen oder 55 Sekunden bei 100°C auf Heizplatte
- Plasmavakuumätzen mit Sauerstoff für 30 Sekunden
- Metallabscheidung
- Strippen z.B. mit Lösungen, die u.a. auf quaternärem Ammoniumhydroxid basieren (R₄NOH)

Bei den Angaben zum DI-Wasser-Verbrauch ist von einer erheblichen fabinternen Wasserkreislaufführung auszugehen, und folglich der DI-Wassereinsatz nicht mit dem Rohwasserbedarf gleichzusetzen.

Geht man im Falle der Intel-CPU's von einer Trockenresistschichtdicke von etwa 100 µm aus und in Anlehnung an Angaben von DuPont von einer Dichte von 1,35 g/cm³ für typische Trockenresiste, so ergibt sich für einen CPU-Die der Fläche 0,94 cm² etwa ein Resistverbrauch von 13 mg Trockenresist pro CPU-Die.

Die Waferlevel-Prozesse, einschließlich der Copper Pillar Aufbringung, finden in Intels Front-End-Fabs in den USA statt Yole (2013), und sind somit in Intels Umweltdaten zum Front-End mit erfasst. Laut Yole stammen die verwendeten Anlagen für die Copper Pillar Abscheidung u.a. von Applied Materials und NEXX Systems.

Substratherstellung

Der führende Hersteller von Epoxidfilmen als dielektrisches Material der auflaminierten Lagen ist Ajinomoto. Substrathersteller für Intel sind u.a. NYPCB und IBIDEN Co. (Yole 2013).

Die Fertigung von Epoxid-Film (ABF: Ajinomoto Build-up Film) für die Außenlagen von BGA-Substraten wird von Ajinomoto, wie bei Narahashi (2013) dargestellt, beschrieben.

Der Film ist aufgebaut aus einer Trägerschicht PET (38 µm), der Epoxidschicht (10-100 µm) und einer Deckschicht OPP (Oriented Polypropylen, 16 µm). Das Epoxid wird mit Phenol ausgehärtet bzw. vernetzt. Sowohl dieser Aufbau, der aus Umweltsicht keine erkennbar auffälligen Substanzen oder Prozesse erfordert, als auch der mehrlagige Substrataufbau unterscheiden sich nicht wesentlich von anderen Prozessen für mehrlagige Leiterplatten, so dass als Näherung die Verwendung des Leiterplattendatensatzes (6-lagig) auch für das BGA-Substrat der CPU gerechtfertigt ist.

Thermokompressionsprozess

Bei dem Thermokompressionsprozess mit einer NCP⁹⁶-Paste (Non-Conductive Paste) wird die NCP-Paste auf dem Substrat aufgebracht und der Flip Chip platziert. Durch die Einbringung von Wärme wird der Chip verlötet und abschließend härtet die NCP-Paste als Underfiller aus (vgl. Patterson 2012).

Aufgrund des geringen Kontaktabstandes für aktuelle CPU-Packages findet der Bondprozess (thermisches Verbindungsverfahren) in Reinraumumgebung statt, jedoch sind die Reinraumanforderungen deutlich geringer als bei den Front-End-Prozessen. Der Energieverbrauch der Infrastruktur ist folglich für diesen Teilprozess deutlich geringer anzusetzen.

Die Flip-Chip-Bestückung erfolgt auf Nutzen⁹⁷, dabei sind die einzelnen Substrate als Streifen oder flächig angeordnet. Ab einer Größe von 27 x 27 mm Substratfläche geht das Marktforschungsunternehmen Yole von einer Bestückung auf vereinzelt Substraten aus (Yole 2013). Die Substratgröße der Intel Core i5 Prozessoren als BGA-Ausführung liegen mit 31 x 24 mm in diesem Bereich. Da an den Komponenten keine Anhaltspunkte für eine Bestückung im Nutzenerkennbar sind⁹⁸, kann von einer Einzelbestückung ausgegangen werden.

Die Bonding-Temperatur für den Copper-Pillar Prozess wird von Sakai mit 217 – 250°C angegeben und entspricht damit den typischen Löttemperaturen (230°C)⁹⁹ für bleifreie Zinn-Silber-Kupfer-Lote (Sakai et al 2011). Auch wenn keine konkreten Vergleichsdaten vorliegen, ist davon auszugehen, dass die Einbringung von Wärme über einen Wärmeüberträger deutlich effizienter ist als das Aufheizen in einem luftdurchströmten Reflowofen. Den Flip Chip Bonding-Prozess mit einem konventionellen Reflow-Lötprozess gleichzusetzen, würde den Energieaufwand daher überschätzen. Zudem benötigt der Thermokompressionsprozess einschließlich Aufheizen, Löten und gleichzeitigem Aushärten der NCP-Paste sowie Abkühlen lediglich 10 bis 15 Sekunden (vgl. mit Cheung et al. (2012)).

⁹⁶ NCP: steht für Non-conductive paste.

⁹⁷ Nutzen beschreibt eine Gesamtfläche, die gemeinsam prozessiert (hier bestückt) und erst anschließend geteilt (vereinzelt) wird.

⁹⁸ Typisch wären beispielsweise erkennbar durchgesägte Stege zu Nachbarsubstraten.

⁹⁹ Nach Intel sollte die typische Temperatur für bleifreie Lote bei einem BGA-CPU minimal 11°C und empfohlen 13°C über dem Schmelzpunkt des Lotes liegen. (Intel 2010)

Während Intel als Flip-Chip-Lotlegierung für CPUs der Technologienodes 45 und 32 nm SnAgCu verwendet hat, erfolgte mit dem Übergang zu 22 nm die Umstellung auf SnCu-Lot (TechSearch 2014).

Aufbringung BGA-Lotkugeln

Die Aufbringung der Lotkugeln auf der Unterseite des BGA-Packages erfolgt als letzter Schritt nach der Flip-Chip-Bestückung und beinhaltet einen zusätzlichen Reflowprozess zum Aufschmelzen des Lotes, gefolgt von einem abschließenden Test Yole (2013). Demnach erfolgt dieser Prozess im Rahmen der Back-End-Fertigung bei Intel. Im Einzelnen umfasst das Aufbringen der Lotkugeln (Renavikar 2008):

1. Pastendruck
2. Platzierung der Lotkugeln
3. Reflowprozess zum Auflöten der Lotkugeln
4. Reinigung

Das verwendete Lotmaterial mit Stand von 2008 nach der Umstellung auf bleifreie Lote bei Intel ist SnAgCu mit einem Silberanteil von 4% und einem Kupferanteil von 0,5%.

Bei 1023 Lotkugeln mit einem Durchmesser von 0,439 mm ergibt sich ein Gesamtlotvolumen von 0,0453 cm³. Unter Zugrundelegung der Dichte von 7,44 g/cm³ für SnAgCu-Lot ergeben sich die in Tabelle 72 aufgelisteten Metallgehalte in den Lotkugeln des betreffenden BGA-Packages.

Tabelle 72: Metallgehalte BGA-Lotkugeln einer Intel-BGA1023-CPU (eigene Berechnung)

Element	Gewichtsanteil
Zinn (Sn)	0,32199985 g
Silber (Ag)	0,0134869 g
Kupfer (Cu)	0,00168586 g

Das Temperaturprofil beim Reflowlöten der BGA-Kugeln entspricht exakt dem Lötprofil beim späteren Auflöten des BGAs auf dem Mainboard. Die Verweilzeit im Reflowofen beträgt etwa 6 Minuten, davon knapp über einer Minute oberhalb der Schmelztemperatur von SnAgCu-Lot bei 217°C.

Für den üblichen Reflow-Lötprozess von Baugruppen mit bleifreien Loten ist ein Strombedarf von etwa 1 Wh pro 1 cm² Substratfläche anzusetzen (Erfahrungswert TU Berlin). Unter der Annahme, dass das Umschmelzen von BGA-Lotkugeln mit einer ähnlichen Flächenbelegung im Reflowofen einhergeht, ist der Wert übertragbar. Bei einer angenommenen Substratgröße der Intel Core i5 Prozessoren als BGA-Ausführung mit 7,44 cm² ergibt sich ein Strombedarf von 7,44 Wh.

Zusammenfassung Packaging

Aus den vorliegenden Daten konnte kein vollständiger Datensatz für das CPU-Package abgeleitet werden. Es wurden die wichtigsten Prozessschritte für ein BGA1230-Package, welches für aktuelle CPUs zur Anwendung kommt, beschrieben.

Für den Bumpingprozess werden für die Metallisierung folgende Materialien eingesetzt:

- Ni
- SnCu
- Cu
- NiP
- Ti oder TiN

Genaue Mengenangaben bezogen auf einen CPU Die sind derzeit nicht verfügbar. Der notwendige Resistverbrauch wurde mit 13 mg Trockenresist pro CPU-Die abgeschätzt. Das Trockenresist besteht aus in der Regel aus Polymeren bzw. Epoxidharzen.

Für die Substratbilanzierung kann der 6 lagige-Leiterplattendatsatz auf die BGA-Packagefläche skaliert werden. Für den Thermokompressionsprozess wird neben dem SnCu-Lot eine NCP eingesetzt. Genaue Mengenangaben liegen hierzu nicht vor. Es wird davon ausgegangen, dass dieser Prozess nahezu verlustfrei ist. Der Energieaufwand kann bei einem Bondingprozess von 15 sec gegenüber der Chipherstellung vernachlässigt werden. Dieser Wert basiert auf Erfahrungswerten der Wissenschaftler der Fraunhofer IZM mit den im Haus vorhandenen Bondinganlagen. Für das Aufbringen der Lotkugeln wurde der Gewichtsanteil für Sn, Ag und Kupfer für ein BGA-Package berechnet vgl. Tabelle 72. Der Strombedarf für den zugehörigen Reflowprozess wurde mit 7,44 Wh für das Package berechnet.

Der Gesamtenergieverbrauch für Intels Back-End-Standorte betrug 2012 (Intel 2013d) etwa 800 GWh, dazu kamen direkte und indirekte Treibhausgasemissionen (Scope 1 und 2) von 535.000 t CO₂-eq. Näherungsweise korreliert mit der Anzahl prozessierter Wafer bei Intel im gleichen Jahr (siehe Abschätzung zum Wasserverbrauch bei Intel pro Wafer, S. 125 f.) lassen sich der Gesamtenergieverbrauch und der Carbon Footprint des Back-Ends (Scope 1 und 2) für einen 0,94 cm² großen Die abschätzen mit

- 0,27 kWh Sekundärenergieverbrauch (Strom, Wärme, Kälte),
- 0,18 kg CO₂e.

Da Energieverbrauch und Carbon Footprint im Back-End jedoch deutlich weniger mit der Chipfläche korrelieren als im Front-End, stellen diese Werte nur eine grobe Näherung dar, umfassen jedoch wenigstens alle im Back-End relevanten Prozesse, wie z.B. den Test. In der folgenden Tabelle 73 sind die Energie- und Stoffströme für die CPU-Fertigung, wie in Kapitel 4.3.5 und 4.3.9 dargestellt, zusammengefasst.

Tabelle 73: CPU-Fertigung nach Prozessen zusammengefasst

Prozess		Menge	Einheit pro Waferfläche	Quelle
Front-End (ohne Bumping)	Strom	30.201,80	kWh/m ²	Schmidt 2011, s. Tabelle 76
	Erdgas	45,5	kWh/m ²	Schmidt 2011, s. Tabelle 76
	Wasser	100.000	kg/m ²	Intel (2013c)
	Wasser	160.000	kg/m ²	Schmidt et al. (2011), s. Tabelle 76
	Inputdaten Chemikalien	s. Tabelle 76	kg/m ²	Schmidt et al. (2011)
	Outputdaten Direkte Luftemissionen	s. Tabelle 66	kg/m ²	
	Outputdaten Abwasserzusammensetzung	s. Tabelle 66	kg/m ²	

Prozess		Menge	Einheit pro Waferfläche	Quelle
	Outputdaten feste Abfälle	s. Tabelle 66	kg/m ²	
Front-End Bumping	Na ₂ CO ₃ oder K ₂ CO ₃	7,074E-06	kg/m ²	Eigene Berechnung aus Vardman (2013) und Chipbond (2014) für BGA 1023 Package mit einer Fläche v. 0,000744 m ²
	Stickstoff (N)	1,698E-01	Nm ² /m ²	
	Trockenresist	1,839E-08	kg/m ²	
Back-End Gesamt ¹⁰⁰	Strom, Wärme, Kälte	0,27	kWh/CPU	Berechnung nach Intel (2013d) und IC Insights (2013)
	Wasserverbrauch	9.000	kg/m ²	Berechnung nach Intel (2013c) und IC Insights (2013)
Back-End Substrat	Siehe Datensatz 6 lagige-Leiterplatte			LCA to go (2013)
Back-End (Aufbringen der Lotkugeln)	Strom	10	kWh/m ²	(Erfahrungswert TU Berlin)
	Sn	0,4328	kg/m ²	Eigene Berechnung TU Berlin für BGA 1023 Package mit einer Fläche von 0,000744 m ²
	AG	0,0181	kg/m ²	
	Cu	0,0023	kg/m ²	

4.3.10 Diskussion der Skalierbarkeit des Datensatz

Grundsätzlich können die Daten für die Front-End-Prozesse über die Chipfläche wie in Tabelle 56 dargestellt skaliert werden. Dies wurde bereits exemplarisch für den in Tabelle 56 aufgeführten Intel Core-i5 Prozessor mit einer Die-Fläche von 0,94 cm² in Tabelle 76 und Tabelle 66 durchgeführt. Für das Package ist neben der Die-Größe die Fläche des Package und die Packageausführung entscheidend. Das hier beschriebene Package wird überwiegend für Notebook CPUs eingesetzt und zum Teil auch für Desktop-PCs. Für Desktop-PCs ist anzumerken, dass überwiegend ein Pin Grid Array-Package (PGA) verwendet wird. Die Fertigungsprozesse können nicht direkt mit den BGA-Prozessen verglichen werden. Zusätzlich zur komplett gehäuteten CPU muss bei der PGA-Ausführung der Sockel berücksichtigt werden, in welchen der fertig verpackte Chip gesteckt wird.

4.4 Datensatz für unbestückte Leiterplatten

4.4.1 Beschreibung des Produktes und Vorgehensweise zur Datenerhebung

Eine Leiterplatte ist integraler Bestandteil elektronischer Geräte.

Es gibt eine Vielzahl von unterschiedlichen Leiterplatten für unterschiedliche Einsatzbereiche. Sie variieren hinsichtlich:

- Lagenzahl
- Substratmaterial
- Beschichtung

¹⁰⁰ Auf Grundlage der Quellenungenauigkeit können diese Daten vereinzelte Front-End-Prozessdaten (Bumpingprozess) enthalten.

Die Lagenzahl ist abhängig von der Komplexität der benötigten Schaltung und der verfügbaren Fläche. So sind als Mainboard bei Desktop-PCs meist 6-lagige Leiterplatten im Einsatz, in Tablets und teilweise auch in Laptops eher 8-lagige. Bei Server-Mainboards werden auch 10-lagige Leiterplatten verwendet. Die Leiterplatten anderer Komponenten (Festplatten, USB-Anschluss, etc.) haben meist 2 bis 4 Lagen.

Im Normalfall sind – von 1-lagigen abgesehen – nur Leiterplatten mit einer geraden Lagenanzahl im Einsatz (2, 4, 6, etc.). Eine ungerade Anzahl ist möglich, wird jedoch nur für Spezialanwendungen gefertigt.

Das Substratmaterial FR4 ist ein glasfaserverstärktes Epoxidharz und Standard bei der Anwendung von IT-Technik und Consumer Electronic. Zum Vergleich: FR1, FR2 und FR3 sind hartpapierverstärkte Harze und damit weniger stabil als FR4. FR5 ist wie FR4 ebenfalls glasfaserverstärkt, aber für Hochtemperaturanwendungen geeignet (Oberender 2006).

Neben dem Substratmaterial kann auch die Beschichtung variieren. Gängige Beschichtungen sind Nickel-Gold, Zinn, Silber oder HAL (hot air levelling), die Einfluss auf die Leiterplatteeigenschaften haben. Nickel-Gold-Beschichtungen zeichnen sich zum Beispiel durch gute Lötbarkeit und Bodeigenschaften sowie gut Lagerfähigkeit aus.¹⁰¹

Da der Fokus dieser Studie bei Arbeitsplatzcomputern liegt, wird eine 6-lagige FR4-Leiterplatte mit Nickel-Gold-Beschichtung als Untersuchungsgegenstand gewählt. Diese werden nach Aussagen des Expertenkreises überwiegend für Desktop-PCs eingesetzt. Bei Notebooks werden sowohl 6- als auch 8-lagige Leiterplatten, ebenfalls mit Nickel-Goldbeschichtung, als Mainboard verbaut.

Aufgrund der wenigen zur Verfügung stehenden Informationen zur Leiterplattenproduktion wurden den Daten im Wesentlichen aus Ergebnissen des EU-Projektes „LCA to go“ extrahiert (LCA to go 2013). Im Rahmen dieses Projektes wurden Primärdaten bei der Leiterplattenproduktion erhoben. Die Datenerhebung erfolgt vor Ort bei einem europäischen Leiterplattenproduzenten.

Tabelle 74: Merkmale des Referenzproduktes

Merkmal	
Typ	Starre Leiterplatte
Lagenanzahl	6
Substratmaterial	FR4 mit bromierten Flammschutzmitteln
Größe	Europakarte-Standardmaß 0,016 m ²
Oberflächenbeschichtung	Nickel-Gold
Produktionsjahr	2012
Produktionsstandort	EU

¹⁰¹ Für mehr Informationen zu den unterschiedlichen Beschichtungen siehe z.B. http://www.contag.de/leiterplatten.php?leiterplatten_technologien_oberflaechen.html

4.4.2 Festlegung des Untersuchungsrahmens

In dieser Studie wird ein Sachbilanz-Datensatz für die Herstellung einer unbestückten Leiterplatte für den Import in ProBas erstellt.

Der Datensatz entspricht einer FR4-Multilayer-Leiterplatte mit 6 Lagen. Die Beschichtung der Leiterplatte ist Nickel-Gold (Ni/Au).

Bei diesem Datensatz werden ausschließlich direkte Prozesse dargestellt, die im Kontext dieses Arbeitspakets untersucht werden konnten. Die für eine vollständige Bilanzierung erforderlichen Vorketten können von ProBas-Nutzern eigenständig mit geeigneten Datensätzen ergänzt und mit den direkten Prozess-Modulen in Verbindung gesetzt werden.

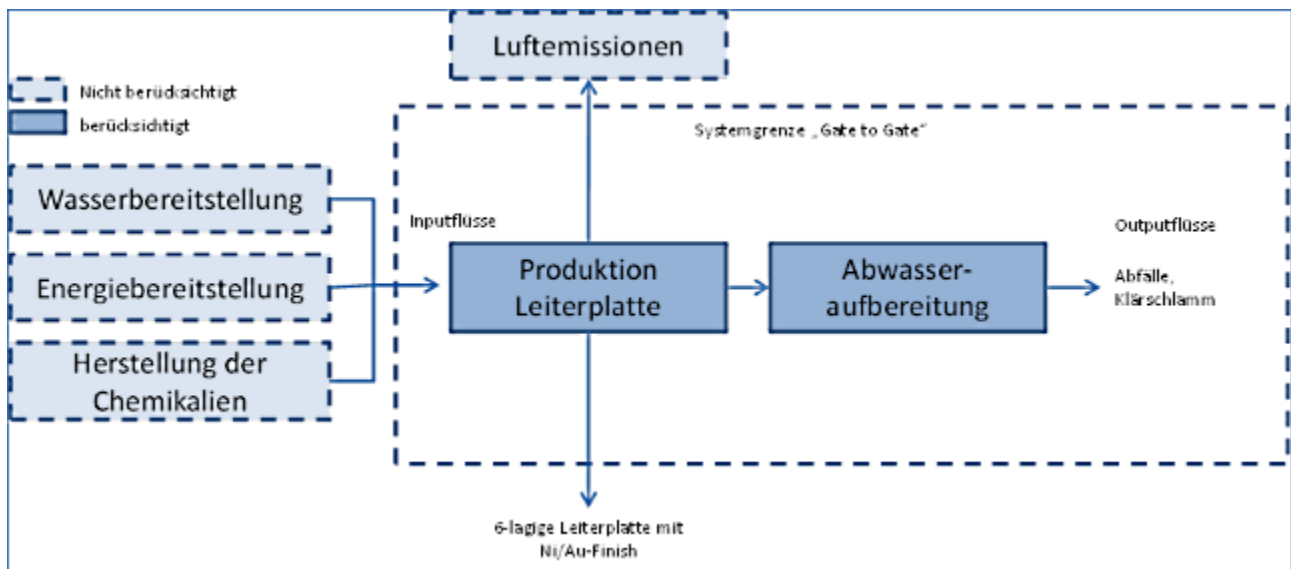
Bezugsgröße

Die Bezugsgröße des Datensatzes ist ein Quadratmeter unbestückte FR4-Leiterplatte mit 6 Lagen und einem Ni-Au-Oberflächenfinish. Dabei werden alle Flüsse vom Referenzprodukt mit der Größe 160 cm² auf die Bezugsgröße 1 m² umgerechnet.

Festlegung der Systemgrenze

Die Systemgrenze für die Herstellung der Leiterplatte beginnt mit der Erfassung der In- und Outputflüsse für die Produktion der Leiterplatte (Gate-to-Gate) (Input: Energie, Wasser, Rohstoffe, Chemikalien; Output: Abwasser, Klärschlamm und feste Abfälle). Produktion der Inputmaterialien und Gewinnung von Rohmaterial ist nicht Teil der Betrachtung.

Abbildung 22: Systemgrenze des ProBas-Datensatzes für die Herstellung der Leiterplatte im Rahmen dieses Arbeitspakets (Darstellung: Öko-Institut)



Emissionen der Leiterplattenfertigung wurden nicht erfasst, es ist aber von einem Aufkommen insbesondere folgender Abluftemissionen auszugehen, die durch geeignete Maßnahmen wie Filter und Wäscher reduziert werden (siehe Europäische Kommission 2006):

- Stäube aus der mechanischen Leiterplattenbearbeitung (Vereinzelung des Nutzens¹⁰² und insbesondere Bohrungen für Durchkontaktierungen)
- Flüchtige organische Lösemittel / VOC (Reinigungsprozesse, Flüssigresiste)
- Ammoniumverbindungen (ammoniumbasierte Ätzlösungen)
- Aerosole (Zinn-Strippen)

Repräsentativität des Datensatzes

Die erhobenen Daten entsprechen dem Stand der Technik in der Leiterplattenproduktion. Die Daten sind repräsentativ für Leiterplatten wie sie in Desktops und häufig auch in Notebooks verwendet werden.

Tabelle 75: Repräsentativität des Leiterplatten-Datensatzes (ohne Vorkette)

Datensatz in ProBas	Zeitlicher Bezug	Geografischer Bezug	Technologischer Bezug
Herstellung Leiterplatte	2012-2013	Europa	Lagenzahl: 6l
			Substrat: FR4
			Oberflächenbeschichtung: Ni-Au
			Abmessungen: Europakarte-Standardmaß 0,016 m ²
			Produktionsjahr: 2012
			Systemgrenzen: Produktion und Abwasser- aufbereitung

4.4.3 Ergebnis und Auswertung des Datensatzes für die Herstellung der Leiterplatte

Der Datensatz zur Herstellung der unbestückten Festplatte erfolgt ausgehend von dem Chemikalienverbrauch, Materialverlusten und dem Energieaufwand bei der Produktion. Nachfolgend werden die aus den Herstellerangaben ermittelten Input- und Outputdaten näher diskutiert.

Für die Datenerhebung wurde eine 6-lagige Leiterplatte der Größe 160 mm x 100 mm = 0,016 m² betrachtet, was dem Europakarte¹⁰³-Standardmaß entspricht. Weil eine Skalierung auf andere Einsatzbereiche mit unterschiedlich großen Leiterplatten hergestellt werden soll, wird als funktionale Einheit 1 m² genutzt und alle Material- und Energieflüsse werden auf diesen Wert skaliert. Bei dieser Skalierung sind Leiterplatten in Formaten wie sie in Desktops und Notebooks verwendet werden, abgedeckt. Bei der Bilanzierung nicht rechteckiger Leiterplatten (Aussparungen, L-förmige Leiterplatten, etc.) sollte als Bezugsgröße jeweils das kleinstmöglich zu bildende Rechteck der Ausmaße genutzt werden (und nicht nur die reale Fläche), um dem notwendigen Verschnitt Rechnung zu tragen.

¹⁰² Der Nutzen beschreibt die Gesamtleiterplatte, die in einer Fläche produziert wird und aus mehreren (identischen oder unterschiedlichen) Leiterplatten besteht, bevor sie in einzelne Leiterplatten geteilt (vereinzelt) wird.

¹⁰³ Standardmaß für Leiterplatten nach DIN 41494 oder IEC 60297

Das Substratmaterial besteht aus FR4-Laminat (glasfaserverstärktes Epoxidharz), welches bromierte Flammhemmer enthält und mit Kupferfolie beschichtet ist (Dicke der Kupferfolie: 18 µm).

Die Datenerhebung betrifft folgende nacheinander ablaufende Prozesse:

1. Schneiden des Laminats
2. Entgratung und Reinigung der Leiterplatte (Brushing)
3. Photolithographie (Ausbringung des Photoresist und Belichtung)
4. Photoresist-Entwicklung
5. Kupferätzen
6. Photoresist-Striping
7. Konversionsbeschichtung (Black oxide)
8. Verpressen/Post-Laminierung
9. Bohren
10. Entgratung und Reinigung der Leiterplatte
11. TOPCOM¹⁰⁴ (leitfähiges Polymer in PTH¹⁰⁵)
12. Photolithographie
13. Photoresist-Entwicklung
14. Leiterbild-Galvanisieren
15. Dry Film Stripping
16. Kupferätzen
17. Zinn Stripping
18. Lötmaske (2x Drucken, 2x Trocknen, 2x Belichten, 2x Entwickeln, 2x Photohärten)
19. Abscheidung der Oberflächenbeschichtung
20. Beschriftung (Drucken, Trocknen, UV-Photohärten)
21. Fräsen
22. Spülen (Wasser)

Im Rahmen der Datenerhebung bei „LCA to go“ wurden folgende Daten erhoben:

1. Art und Menge der verwendeten Chemikalien und Rohstoffe zur Herstellung der unterschiedlichen Leiterplattentypen
2. Gesamtverbrauch von Strom und Wärme
3. Wasserverbrauch (inkl. Prozesswasser, Brauchwasser)
4. Abfallproduktion (Ausschuss von Leiterplatten und feste Abfälle)

¹⁰⁴ Anlagenbezeichnung des Herstellers für Direktmetallisierung

¹⁰⁵ Plated through holes

Inputdaten: Stromverbrauch und anderer Energieverbrauch

Der Stromverbrauch von 337,5 kWh/m² Leiterplatte wurde bei einem europäischen Leiterplattenproduzenten erhoben und anhand der notwendigen Prozessschritte diesem Leiterplattentyp zugeordnet.

Die benötigte Wärmemenge von 207 MJ/m² Leiterplatte wurde ebenfalls direkt erhoben. Hierbei wurde allerdings keine Unterscheidung nach Leiterplattentyp vorgenommen, sondern allen Leiterplattentypen der gleiche Wärmebedarf pro m² zugeordnet.

Der bilanzierte Energieverbrauch beinhaltet den Energieverbrauch der hauseigenen Abwasserbehandlungsanlage. Eine Differenzierung des Energieverbrauchs nach Fertigung und Abwasseranlage ist nicht verfügbar.

Inputdaten: Chemikalien- und Materialverbrauch

Der Verbrauch an Chemikalien und Materialien wurde direkt in der Leiterplattenproduktion erhoben und ist in Tabelle 76 für die einzelnen Prozessschritte dargestellt. Chemikalien für die interne Wasseraufbereitung und Abwasserbehandlung sind in der Bilanz mit aufgeführt.

Massenmäßig sind die wichtigsten Materialien:

- Epoxidharz
- Ammoniumchlorid
- Kupferfolie

Inputdaten: Wasserverbrauch

Der Wasserverbrauch in der Leiterplattenfertigung liegt bei 3,3525 m³/m² Leiterplatte. Die größten Wassermengen werden für die Prozesse Verpressen/Post-Laminierung sowie für die Galvanisierung des Leiterbildes benötigt.

Outputdaten: Klärschlamm und feste Abfälle

Die Menge an festen Abfällen und Klärschlamm wurde als Summe erfasst und beträgt 6,83 kg/m² Leiterplatte. Eine Differenzierung nach Abfallart oder Zusammensetzung des Schlammes ist nicht verfügbar.

Entscheidende Parameter für den Stromverbrauch in der Produktion der Leiterplatten bei den Herstellern

Die entscheidenden Parameter für den Stromverbrauch bei der Leiterplatten-Herstellung werden auf der Basis der Kenntnisse aus dem Expertenworkshop und der Herstellerangaben wie folgt identifiziert:

- Der Stromverbrauch hängt überwiegend von der Anzahl der gefertigten Lagen ab.
- Die Art der Beschichtung hat ebenfalls einen, wenn auch kleineren, Einfluss auf den Stromverbrauch der Leiterplattenfertigung.

Information über den Transport der fertigen Produkte

Bei Fertigung der Leiterplatten in Asien erfolgt der Transport laut Herstellerangaben per Flugzeug nach Europa. Obwohl der Transport außerhalb der Systemgrenze von Arbeitspaket 3 liegt, wird diese Information für die Bilanzierung von Arbeitspaket 4 (ganzheitliche Bilanzierung) benötigt.

4.4.4 Ergebnisse der Datensätze

Die Ergebnisse des in der vorliegenden Studie beschriebenen Datensatzes werden in ProBas unter <http://www.probas.umweltbundesamt.de/php/index.php> veröffentlicht. Dieser Datensatz wird in den nachfolgenden Tabellen dargestellt.

Tabelle 76: Inputdaten für den Datensatz „Herstellung Leiterplatte“

Inputflüsse	Menge	Einheit
Replenisher alkaline etching solution BoardCare Etch100		
Ammoniak (Gas)	0,3093	kg/m ² PCB
Ammoniumhydrogencarbonat	0,0990	kg/m ² PCB
Ammoniumchloride	1,2989	kg/m ² PCB
Aluminiumblech (Dicke: 0,14 - 0,18 mm)	0,2166	kg/m ² PCB
Zellulose	0,5636	kg/m ² PCB
Kupferanode	0,3149	kg/m ² PCB
Salpetersäure	0,2894	kg/m ² PCB
Natriumcarbonat	0,5955	kg/m ² PCB
Fällungsmittel (enthält Eisen, Aluminium und Flockungsmittel)	0,9820	kg/m ² PCB
Eisenoxid	0,1002	kg/m ² PCB
Aluminiumoxid	0,0016	kg/m ² PCB
Salzsäure (37%)	0,9367	kg/m ² PCB
Natriumhydroxid	0,2077	kg/m ² PCB
Natriumchlorid	0,7583	kg/m ² PCB
Kalk	0,3821	kg/m ² PCB
Kupferfolie	1,0460	kg/m ² PCB
Glass-Epoxy-Laminat (Dicke: 1,6mm)	4,0262	kg/m ² PCB
Nickelbad		
2-Hydroxybernsteinsäure	0,0047	kg/m ² PCB
Bernsteinsäure	0,0164	kg/m ² PCB
Nickelsulfat	0,1195	kg/m ² PCB
Schwefelsäure	0,0016	kg/m ² PCB
Natriumphosphat	0,0785	kg/m ² PCB
Gold-Kaliumzyanid	0,0008	kg/m ² PCB
Salpetersäure (konzentriert)	0,0724	kg/m ² PCB
Tetrafluoroborsäure (konzentriert)	0,0371	kg/m ² PCB
Schwefelsäure (konzentriert)	0,3465	kg/m ² PCB

Inputflüsse		Menge	Einheit
	Phosphorsäure (konzentriert)	0,0146	kg/m ² PCB
	Ammoniak (Gas)	0,0146	kg/m ² PCB
	Natriumpersulfat	0,0008	kg/m ² PCB
	Lötmaske XV501 (Acryl-Lack)	0,0879	kg/m ² PCB
Remover RS5899			
	Adipinsäuredimethylester	0,0073	kg/m ² PCB
	Glutarsäuredimethylester	0,0134	kg/m ² PCB
	Bernsteinsäuredimethylester	0,0045	kg/m ² PCB
	Kaliumpermanganat	0,0167	kg/m ² PCB
ENVISION MLB-2011 A			
	Ethylenglykol	0,0272	kg/m ² PCB
	Ethylenglykolmonoethylether	0,0182	kg/m ² PCB
FR4 Prepregs			
	Glasfaser	0,3115	kg/m ² PCB
	Epoxidharz	1,6582	kg/m ² PCB
Energie			
	Strom	337,5	kWh/m ² PCB
	Wärme	0,207	GJ/m ² PCB
	Wasser	3,3525	m ³ /m ²

4.4.5 Datenqualitätsanalyse

Die Daten stammen aus einer europäischen Leiterplattenproduktion und bilden daher nicht zwangsweise den Marktdurchschnitt ab, da der Großteil der Leiterplattenproduktion für APCs und Unterhaltungselektronik in Asien erfolgt. Die Daten wurden im Rahmen des EU-FP-7 Projektes „LCA to go“ erhoben und im Rahmen dieses Projektes einem Critical Review unterzogen.

Bei den Inputflüssen und Energieverbräuchen handelt es sich um 2012 erhobene Primärdaten. Sie spiegeln damit aktuelle Technologie wider. Alle wesentlichen Materialien konnten identifiziert werden, ebenso wie der dazugehörige Energieverbrauch.

Allerdings gibt es folgende kritischen Punkte:

- Outputflüsse konnten nicht erfasst werden.
- Nicht für alle Chemikalien konnte die genaue chemische Zusammensetzung erfasst werden. Für eine Reihe von Chemikalien existieren außerdem noch keine Datensätze.
- Direkte Treibhausgasemissionen wurden bei der Datenerhebung allgemein erfasst, d.h. für die Fertigung insgesamt, aber nicht hinsichtlich der verschiedenen Leiterplattentypen allokiert. Direkte Treibhausgasemissionen in der Leiterplattenfertigung stammen lediglich aus wenig relevanten Quellen (z.B. Treibstoffverbrauch von Fahrzeugen), nicht aber aus den Fertigungsprozessen und sind in ihrer Menge gegenüber den indirekten

Emissionen der Energiebereitstellung vernachlässigbar. Die direkten Treibhausgasemissionen des Fertigungsstandorts belaufen sich auf 0,482 kg CO₂e/m² Leiterplatte¹⁰⁶.

- Treibhausgasemission der Stromerzeugung und Wärmebereitstellung sind nicht Teil des Datensatzes, sondern sind je nach Art der Energieerzeugung in der Vorkette zu bilanzieren.

Insgesamt kann die Datenqualität des Datensatzes als gut eingestuft werden.

4.4.6 Diskussion der Skalierbarkeit des Datensatzes

Der Datensatz ist grundsätzlich zwar übertragbar auf Leiterplatten gleichen Typs (gleiches Substratmaterial und gleiche Beschichtung) mit anderer Lagenzahl. Da jedoch nur ein Datensatz vorliegt, ist keine direkte Skalierung möglich. Dafür müsste mindestens ein zweiter Datensatz für eine andere Lagenzahl vorliegen.

Ansonsten ist auf der Grundlage eines einzelnen Datensatzes nur eine Skalierung durch den Nullpunkt möglich, was nicht der Realität entspricht.

¹⁰⁶ Mix über alle bei diesem Leiterplattenproduzenten gefertigten Leiterplattentypen.

5 Arbeitspaket 3: Ökologische und ökonomische Vergleichsrechnungen

5.1 Einführung

Das Arbeitspaket verfolgt folgende Ziele:

- Ermittlung der Umweltauswirkungen sowie der Lebenszykluskosten der in typischen Verwaltungsstrukturen eingesetzten Arbeitsplatzcomputer
- Vergleich von unterschiedlichen Arbeitsplatzlösungen zur Identifizierung der jeweils umweltfreundlichsten und wirtschaftlichsten Varianten
- Durchführung der Amortisationsrechnung für den Ersatz von Desktop-PCs durch Notebooks und Mini-PCs
- Hochrechnung der ökologischen und ökonomischen Berechnungen auf die Gesamtbundesverwaltung

Für die obengenannte Zielsetzung werden drei typische Arbeitsplatzlösungen ausgewählt:

- Computerarbeitsplatz mit Desktop-PC: beinhaltet einen stationären Desktop-PC¹⁰⁷, einen externen Monitor¹⁰⁸, eine externe Tastatur und eine Computer-Mouse
- Computerarbeitsplatz mit Notebook: beinhaltet ein Notebook¹⁰⁹ (mit integriertem Monitor), einen zusätzlichen externen Monitor¹¹⁰, eine Docking-Station, eine externe Tastatur und eine Computer-Mouse
- Computerarbeitsplatz mit Mini-PC: beinhaltet einen Mini-PC¹¹¹, einen externen Monitor¹¹², eine externe Tastatur und eine Computer-Mouse

Eine weitere denkbare Arbeitsplatzlösung ist die mit Thin Client. Um jedoch die gleichen Aufgaben zu erfüllen wie ein Computer oder Notebook muss ein Thin Client auf Ressourcen eines Rechenzentrums zurückgreifen, denn die Rechenleistung eines Thin Clients findet auf einem Server statt, der in der Regel in einem Rechenzentrum steht. Da die Datengrundlage für die Ökobilanzberechnung des Anteils des Rechenzentrums zum Teil nicht vorhanden oder die Qualität sehr unbefriedigend ist, wurde die Arbeitsplatzlösung mit Thin Client nicht untersucht.

¹⁰⁷ Nach RAL UZ 78a, Ausgabe November 2014; <https://www.blauer-engel.de/de/produktwelt/buero/arbeitsplatzcomputer/desktop-computer-ausgabe-november-2014>; Zugriff: 05.08.2015

¹⁰⁸ Nach ENERGY STAR® Program Requirements Product Specification for Displays, Version 6.0, October 2014

¹⁰⁹ Nach RAL UZ 78a, Ausgabe November 2014; <https://www.blauer-engel.de/de/produktwelt/buero/arbeitsplatzcomputer/desktop-computer-ausgabe-november-2014>; Zugriff: 05.08.2015

¹¹⁰ Nach ENERGY STAR® Program Requirements Product Specification for Displays, Version 6.0, October 2014

¹¹¹ Bei einem Mini-PC (ohne internen Bildschirm und Tastatur) beträgt das Gewicht (inklusive ggf. vorhandenem externen Netzteil) maximal 5,0 kg und das Gehäusevolumen maximal 5,0 Liter.

¹¹² Nach ENERGY STAR® Program Requirements Product Specification for Displays, Version 6.0, October 2014

Bei der Entwicklung der Bilanzierungsszenarien für die Ermittlung der arbeitsplatzbezogenen Umweltauswirkungen sowie der Lebenszykluskosten ist es notwendig zu erwähnen, dass tragbare Computer, wie Notebooks, im stationären Betrieb nicht die gesetzlichen Bestimmungen für Bildschirmarbeitsplätze erfüllen. So müssten sich eigentlich zum Beispiel Tastatur und Display unabhängig voneinander neigen und positionieren lassen. Die Bildschirmarbeitsverordnung gilt für die Arbeit an Desktop-Monitoren, aber nicht für die Arbeit an Bildschirmgeräten für den ortsveränderlichen Gebrauch, sofern sie nicht regelmäßig an einem Arbeitsplatz eingesetzt werden (BildschArbV 2008). Damit ist klar, dass Notebooks die Anforderungen der BildschArbV schon deshalb nicht erfüllen, weil es an der erforderlichen Trennung von Desktop, Monitor und Tastatur fehlt.

Damit die tragbaren Computer im Hinblick auf die ergonomischen Anforderungen Desktop-PCs ersetzen können, müssen sie u.a. folgende Kriterien erfüllen:

- Notebooks benötigen am festen Arbeitsplatz eine getrennte, frei aufstellbare Tastatur.
- Bei integriertem Monitor eines Notebooks, ist ebenfalls ein getrennt aufstellbarer großer Monitor notwendig, um Fehlhaltungen vorzubeugen.

Das bedeutet, dass Notebooks am Arbeitsplatz mit zwei Monitoren, nämlich einem integrierten Monitor für den mobilen Gebrauch und einem externen Monitor, ausgestattet sind. Diese Erkenntnis ist wichtig für die vergleichende ökobilanzielle Betrachtung von stationären und mobilen Computergeräten.

5.2 Recherche zur Ableitung der Bilanzierungsparameter

Zur Bildung der Bilanzierungsszenarien für die drei ausgewählten Arbeitsplatzlösungen wurden einschlägige Experten aus der Behördenlandschaft in Deutschland, wie zum Beispiel Bundesagentur für Arbeit, Umweltbundesamt und Kaufhaus des Bundes, befragt. Die Befragung erfolgte zwischen Juni 2014 und März 2015. In der Befragung ging es primär darum, reale Nutzungsdauer¹¹³ von Computerendgeräten in der Bundesverwaltung zu ermitteln sowie ein realitätsnahes Bild über die tatsächlich implementierten Maßnahmen zur Nutzungsdauerverlängerung (z.B. Reparatur, Aufrüstbarkeit von bestimmten Komponenten) in der Bundesverwaltung zu bekommen. Das Ziel war festzustellen, ob die technisch möglichen Optionen zur Nutzungsdauerverlängerung in der Realität in der Bundesverwaltung genutzt werden oder nicht. Dabei wurden den Zuständigen in den Behörden folgende Fragen gestellt:

- Wie hoch ist bisher die Gesamt-Nutzungsdauer von Desktop-PCs, Notebooks, Mini-PCs und Monitoren in den Behörden?
- Welche Maßnahmen zur Nutzungsdauerverlängerung von Desktop-PCs, Notebooks, Mini-PCs und Monitoren werden in den Behörden getroffen?
- Welche Komponenten werden bei Desktop-PCs, Notebooks, Mini-PCs und Monitoren getauscht, um deren Nutzungsdauer in den Behörden zu verlängern?

¹¹³ Die Definition der Nutzungsdauer in diesem Kapitel unterscheidet sich von der Definition im Kapitel 6. In diesem Kapitel wird die Nutzungsdauer im Sinne von Standzeiten (in Jahren) verstanden. Damit ist der Zeitraum gemeint, in dem das Gerät in der Bundesverwaltung bis zu seinem Ersatz genutzt wird. Eine Zweitnutzung wird im Rahmen dieses Vorhabens aufgrund von fehlenden Daten nicht erfasst.

- Wie oft werden die oben genannten Komponenten während der Gesamt-Nutzungsdauer von Desktop-PCs, Notebooks, Mini-PCs und Monitoren in den Behörden getauscht?
- Nach wie vielen Jahren erfolgt der erste Austausch von oben genannten Komponenten von Desktop-PCs, Notebooks, Mini-PCs und Monitoren in den Behörden?
- Wie hoch sind die durchschnittlichen Anschaffungskosten pro Gerät für Desktop-PCs, Notebooks, Mini-PCs und Monitore in den Behörden?
- Wie hoch sind die durchschnittlichen Reparatur- und Wartungskosten pro Jahr pro Gerät für Desktop-PCs, Notebooks, Mini-PCs und Monitore in den Behörden?
- In welcher Höhe liegen die Entsorgungskosten für Desktop-PCs, Notebooks, Mini-PCs und Monitore in den Behörden?

Die Informationen bezüglich der Nutzungsdauer von Desktop-PCs, Notebooks und Monitoren sind in Tabelle 77 zusammengefasst. Zur Nutzungsdauer von Mini-PCs wurden keine Angaben gemacht, da sie erst seit Kurzem in der Bundesverwaltung eingesetzt werden.

Tabelle 77: Standzeiten und Nutzungsdauer von IT Geräten

Desktop-PC	Notebooks	Monitore	Quelle
6 Jahre	4,5 Jahre	6 Jahre	Bundesagentur für Arbeit, 2014
5 Jahre	5 Jahre	5 Jahre	KBSt (2004): Richtlinie zur Nutzungsdauer, Aussonderung und Verwertung von IT-Geräten und Software, Koordinierungs- und Beratungsstelle der Bundesregierung für Informationstechnik (KBSt), 2004
5 Jahre	3 Jahre	5 Jahre	Rat der IT-Beauftragten (2013): Richtlinie zur Nutzungsdauer, Aussonderung und Verwertung von IT-Geräten und Software, Anlage zum Beschluss Nr. 2013/7 des Rats der IT-Beauftragten der Ressorts vom 6. Dezember 2013
3 Jahre	3 Jahre	3 Jahre	Bundesfinanzministerium (2000): Abschreibung für Abnutzung für allgemein verwendbare Anlagegüter (AfA-AV), 2000
5 Jahre	5 Jahre	5 Jahre	Arthur D. Little (o.J.): „Handbuch der Bundes-KLR“, Anhang 2, Nutzungsdauertabelle, Standard-Kosten- und Leistungsrechnung (Standard-KLR)
4 Jahre	2,5 Jahre	4 Jahre	DEFRA (2009): Non-Domestic Computers and Monitors, Market Transformation Programme, 2009

Weitere Informationen, wie Reparaturen, Aufrüstbarkeit von Komponenten und Bauteilen, Garantien und Gewährleistung in der Bundesverwaltung, sind in Tabelle 78 zusammengefasst. Auch hier liegen keine Informationen bezüglich der Mini-PCs vor:

Tabelle 78: Reparaturen und Gewährleistung in den Bundesbehörden

	Desktop-PC	Notebooks	Monitore	Quelle
Garantien und Gewährleistung				
Gewährleistung für alle gelieferten Systeme inkl. aller Komponenten (Erstlieferung)	3 Jahre	3 Jahre	3 Jahre	Expertenbefragung im Rahmen dieses Vorhabens am 15.07.2014
Gewährleistung für nachträglich eingebaute Einzelkomponenten	2 Jahre	2 Jahre	2 Jahre	Expertenbefragung im Rahmen dieses Vorhabens am 15.07.2014
Gewährleistung	4 Jahre	4 Jahre	4 Jahre	Bundesagentur für Arbeit, 2014

	Desktop-PC	Notebooks	Monitore	Quelle
Reparaturen				
Schadensfälle	6%	15%	2%	Bundesagentur für Arbeit, 2014; Schadensfälle (bezogen auf die Standzeiten, siehe Tabelle 77)
Reparatur nach der Gewährleistungsfrist	Wenn ein Defekt nicht durch den Service-Techniker behoben werden kann, wird das Gerät der Verwertung überführt. Es wird ein sogenannter Verwertungsvertrag mit den Lieferanten abgeschlossen, der die Technik entweder erneut vermarktet oder verschrotet. Stichpunktartig wird auch nachgefragt, wo die Geräte verblieben sind.			Bundesagentur für Arbeit, 2014
Welche Komponenten fallen häufig aus bzw. müssen repariert/ausgetauscht werden?	Festplattenlaufwerk, Arbeitsspeicher, Netzteil, Optisches Laufwerk	Festplattenlaufwerk, Akkus, interner Bildschirm, Tastatur	Keine Information	Prakash et al. 2016, JRC 2014, WRAP 2011 Seitens der Bundesverwaltung wurden in dieser Hinsicht keine Informationen vorgelegt.
Reparaturkosten				
	Wenn die Wartung/Pflege der Hardware durch einen externen Lieferanten erfolgt, liegt ein Vertrag vor, aus dem die Kosten hervorgehen. Andernfalls werden je Jahr als Näherungswert 10% der Anschaffungskosten angesetzt.			Bundesministerium des Innern (2007): Empfehlung zur Durchführung von Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen in der Bundesverwaltung, insbesondere beim Einsatz der IT
	Die angenommenen Reparaturkosten von 10% sind viel zu hoch (siehe die Zeile oben). Im Bund werden Verträge mit einer Gewährleistung von 4 Jahren gemacht. Das heißt, in den 4 Jahren können keine Reparaturkosten entstehen			Bundesagentur für Arbeit, 2014

Laut Meinung der im Rahmen dieses Vorhabens befragten Experten werden in den Behörden durchaus Massenspeicher (Festplatten) bei Desktop-PCs und Massenspeicher sowie Akkus bei den Notebooks ausgetauscht. Es wird davon ausgegangen, dass die Aufrüstaktion in der Regel nur einmal stattfindet und die Geräte später durch komplett neue Geräte ersetzt werden.

5.3 Modellannahmen

Die Modellierung für drei definierte Arbeitsplatzlösungen erfolgt folgendermaßen:

- Arbeitsplatzlösung 1 (Computerarbeitsplatz mit Desktop-PC): Desktop-PC + externer Monitor + externe Tastatur + Computer-Mouse
- Arbeitsplatzlösung 2 (Computerarbeitsplatz mit Notebook): Notebook (mit integriertem Monitor) + externer Monitor + Docking-Station + externe Tastatur + Computer-Mouse
- Arbeitsplatzlösung 3 (Computerarbeitsplatz mit Mini-PC): Mini-PC + externer Monitor + externe Tastatur + Computer-Mouse

Für die Untersuchung wurde der Betrachtungszeitraum von zehn Jahren ausgewählt (2014-2023), um mittel- bis langfristige Effekte aufgrund von unterschiedlichen Nutzungsdauern von IT-Geräten besser im Blick zu behalten. Je nach der angenommenen Nutzungsdauer der einzelnen Varianten und Komponenten müssen unterschiedlich häufig neue Geräte beschafft werden. Für die Nutzungsdauer wurden die vom IT-Rat empfohlenen Mindestnutzungszeiten

angenommen (Tabelle 79). Reparatur und Aufrüstung konnten aufgrund der unzureichenden Informationen nicht einbezogen werden. Diese wurden allerdings in der Sensitivitätsanalyse über den Vergleich der Notebooks mit 3 und 6 Jahre Nutzungsdauer (5.10.2) berücksichtigt.

Tabelle 79 Nutzungsdauer von IT-Geräten auf Basis der Empfehlungen des IT-Rates im Betrachtungszeitraum 2014-2023

IT-Gerät	Beschaffungszyklus	Angenommene Nutzungsdauer
Desktop-PC	Beschaffungszyklus 1	5 Jahre
	Beschaffungszyklus 2	5 Jahre
Notebook	Beschaffungszyklus 1	3 Jahre
	Beschaffungszyklus 2	3 Jahre
	Beschaffungszyklus 3	3 Jahre
	Beschaffungszyklus 4	1 Jahr ¹¹⁴
Mini-PC	Beschaffungszyklus 1	5 Jahre
	Beschaffungszyklus 2	5 Jahre
Monitor	Beschaffungszyklus 1	5 Jahre
	Beschaffungszyklus 2	5 Jahre

In der Berechnung der Ökobilanz wurde berücksichtigt, dass die IT Geräte unterschiedlich lange genutzt werden (vgl. Tabelle 79). Beispielsweise werden das Notebook nach 3 Jahren und der dazugehörige Monitor erst nach 5 Jahren ausgewechselt. Im Betrachtungszeitraum von 10 Jahren werden bei den Notebooks drei Beschaffungen voll eingerechnet und die vierte nur zu einem Drittel (inkl. Herstellung, Transporten und Entsorgung). Die aus der Nutzungsphase resultierende Umweltbelastung wird entsprechend der funktionellen Einheit per Jahr Nutzung eingerechnet. Bei Lebenszykluskosten wird der sogenannte Restwert als negativer Kostenanteil berücksichtigt, wenn die Nutzungsdauer nur zu einem Teil am Ende des Betrachtungszeitraumes erreicht wurde.

Tabelle 80 gibt die Allokationsfaktoren der Gerätetypen im jeweiligen Beschaffungszyklus wieder.

Tabelle 80: Allokationsfaktoren der Gerätetypen im jeweiligen Beschaffungszyklus (Betrachtungszeitraum 10 Jahre)

	Desktop-PC	Notebook	Mini-PC	Monitor
Beschaffung 1	1 (5 Jahre)	1 (3 Jahre)	1 (5 Jahre)	1 (5 Jahre)
Beschaffung 2	1 (5 Jahre)	1 (3 Jahre)	1 (5 Jahre)	1 (5 Jahre)
Beschaffung 3		1 (3 Jahre)		
Beschaffung 4		0,33 (1 Jahr)		

Es wird angenommen, dass ein defektes Gerät der Verwertung überführt wird.

¹¹⁴ Anteilige Nutzungsdauer, die innerhalb des zehnjährigen Betrachtungszeitraumes liegt.

5.4 Funktion und funktionelle Einheit

In einer Ökobilanz wird die betrachtete Funktion vereinheitlicht, um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse bei verschiedener technischer Ausstattung von Arbeitsplatzcomputern zu ermöglichen. Die vereinheitlichte Vergleichsgröße wird gemäß ISO 14040:2006 als funktionelle Einheit bezeichnet.

Da Arbeitsplatzcomputer je nach Einsatzzweck verschiedene Funktionen gleichzeitig erfüllen können (Multifunktionalität), wird im Rahmen dieser Studie ein Mix aus bürotypischen Nutzungen von Arbeitsplatzcomputern betrachtet. Dieser Mix enthält die Nutzung von Computeranwendungen wie Textverarbeitung, (client-seitigen) Datenbankzugriff, Tabellenkalkulation, Web-browsen und E-Mail etc. Dieser Anwendungsmix bestimmt die im Rahmen dieser Studie betrachtete Hardwareausstattung, die der eines durchschnittlichen Büro-Arbeitsplatzcomputers entspricht (Tabelle 81). Weitergehende Einflüsse der Software auf die Umweltauswirkungen der Arbeitsplatzcomputer sind nicht Gegenstand dieser Studie.

Die Nutzung von Arbeitsplatzcomputern in der öffentlichen Verwaltung richtet sich nach den jeweiligen Aufgabenstellungen in typischen Verwaltungsstrukturen. Die zur Erfüllung dieser Tätigkeiten bereitgestellten Arbeitsplatzcomputer ermöglichen vor allem stationäres Arbeiten im Büro. Nichtsdestotrotz findet die mobile Nutzung der Notebooks in der Bundesverwaltung in geringem Umfang statt. Dementsprechend wurde das mobile Nutzungsprofil im Arbeitspaket 1 (Kapitel 3) zusätzlich abgeleitet (Tabelle 25, Tabelle 26, Tabelle 27) und für die ökobilanzielle Modellierung in diesem Arbeitspaket herangezogen.

Aus diesen Vorüberlegungen leitet sich die Wahl der **funktionellen Einheit** in dieser Studie ab:

„Nutzung eines hauptsächlich stationären Arbeitsplatzcomputers für die Bearbeitung verwaltungstypischer Aufgaben für ein Jahr“.

Mit dieser Vergleichsgröße ist es möglich, die Ergebnisse aus der Berechnung verschiedenartiger Computermodelle gegenüber zu stellen. Die Computermodelle unterscheiden sich nicht nur hinsichtlich ihrer technischen Ausstattung, sondern auch hinsichtlich ihrer Nutzungsdauer und des Energieverbrauchs während der Nutzungsphase. Die Ökobilanz ordnet die jeweils erforderliche Menge an Material und Energie (den so genannten Referenzfluss) der funktionellen Einheit zu. Für diesen Zweck wird ein Betrachtungszeitraum von 10 Jahren zugrunde gelegt. Dieser Zeitraum ist geeignet, um die unterschiedliche Lebensdauer der betrachteten Arbeitsplatzlösungen in mehreren Beschaffungszyklen zu berücksichtigen. Für die Berechnungen wird davon ausgegangen, dass die Geräte nach der Nutzung in der Bundesverwaltung keine Zweitnutzung erfahren, sondern sofort verwertet werden.

Diese Ökobilanz berücksichtigt eine in der Bundesverwaltung typische Geräteausstattung von Büroarbeitsplätzen (Tabelle 81), inklusive Peripheriegeräten (Tastatur, Mouse, Dockingstation (bei Notebooks), externes Netzteil (bei Notebooks) sowie externer 22 Zoll-Monitor.

Tabelle 81: Hardwarespezifikationen der berücksichtigten Gerätemodelle

	Desktop-PC	Notebook	Mini-PC	Monitor
CPU	Intel Core i5 Prozessor (Die Fläche 0,94 cm ²)	Intel Core i5 Prozessor (Die Fläche 0,94 cm ²)	Intel Core i5 Prozessor (Die Fläche 0,94 cm ²)	-
HDD/ SSD	3,5 Zoll, 1 TB	2,5 Zoll, 1 TB (HDD) * 2,5 Zoll 800 GB (SSD)**	2,5 Zoll, 1 TB (HDD) * 2,5 Zoll/ 800 GB (SSD)**	-
Leiterplatte (unbestückt)	6 lagig, FR4, Ni-Au Beschichtung, 6 dm ²	6 lagig, FR4, Ni-Au Beschichtung, 1,6 dm ²	6 lagig, FR4, Ni-Au Beschichtung, 1,6 dm ²	6 lagig, FR4, Ni-Au Beschichtung, 6 dm ²
RAM	4 Gbyte	4 Gbyte	4 Gbyte	-
Akku	-	Lithium-Ionen-Polymer-Akkumulator ¹¹⁵	-	-
Docking Station	-	1/2 Notebookgehäuse, 100 g SMD bestückte Leiterplatte	-	-
Bildschirmgröße	-	15,4 Zoll (intern)	-	22,0 Zoll
Gewicht (ohne Verpackung)	11,2 kg	2,8 kg	3,1 kg	5,0 kg
Nutzungsdauer der Geräte	5 Jahre	3Jahre	5 Jahre	5 Jahre

* Erste Beschaffungszyklus; ** Zweiter Beschaffungszyklus

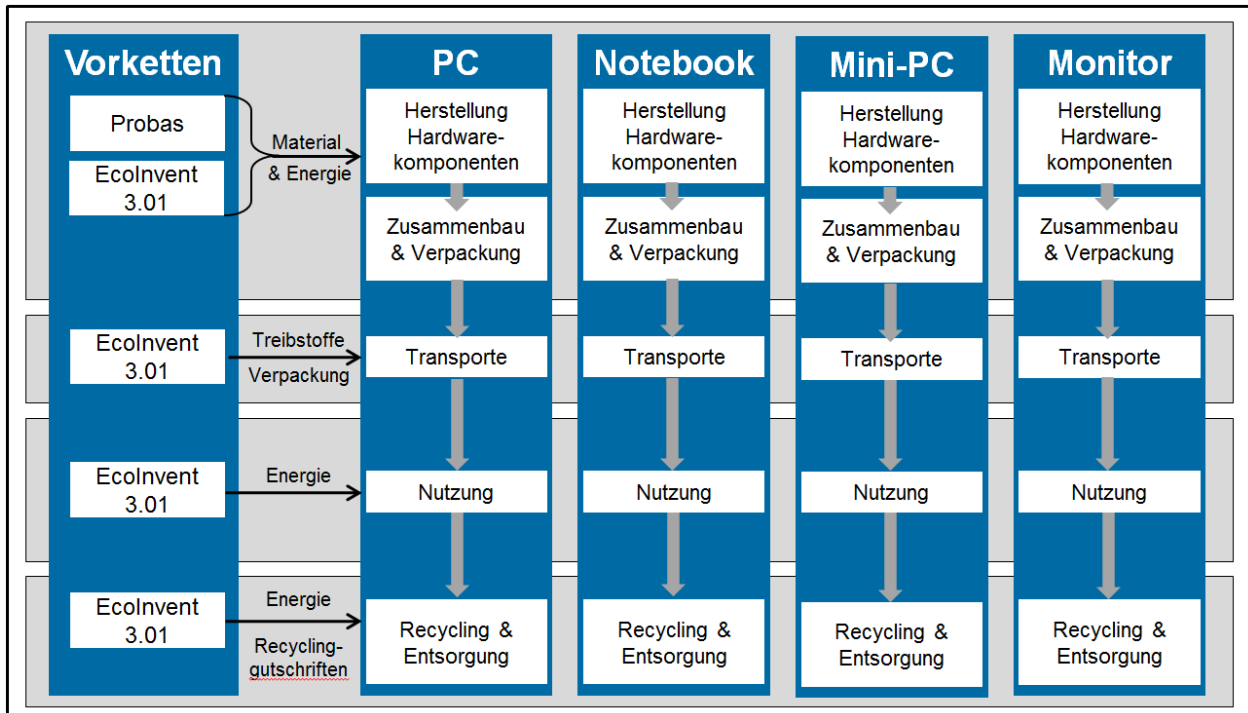
5.5 Festlegung der Systemgrenzen

Die Systemgrenze einer Ökobilanz markiert den Rahmen für die Berücksichtigung von Prozessen, die dem Untersuchungsgegenstand über dessen gesamten Lebenszyklus zuzuordnen sind. Die Systemgrenze der Sachbilanz umfasst demnach neben dem eigentlichen Produktsystem (hier: Computerausstattung von Büroarbeitsplätzen) auch vor- und nachgelagerte Prozesse der Herstellung, Transporte, Energiebereitstellung und Entsorgung. Die Abgrenzung zwischen berücksichtigten und nicht-berücksichtigten Aspekten orientiert sich am Zweck der Ökobilanz.

In dieser Studie wird die Systemgrenze entsprechend der in Abschnitt 5.2 aufgestellten Szenarien folgendermaßen dargestellt (Abbildung 23).

¹¹⁵ Bauform: Pouch; Zellchemie: Lithium-Kobaltoxid (LCO); Masse: 259,65 g; Kapazität: 7300 mAh; Nennspannung; 7,6 V; Energie: 55 Wh (Clemm et al. 2015)

Abbildung 23: Systemgrenze der Sachbilanz



Herstellungsphase enthält jeweils auch Mouse und Tastatur, Docking-Station (nur Notebook). Die Reparaturen sowie die Herstellung und die Distribution der Ersatzteile wurden nur in der Sensitivitätsanalyse (5.10.2) berücksichtigt.

Die gewählte Systemgrenze umfasst die gesamten Lebenszyklen der betrachteten Computerhardware, inklusive Herstellung, Distribution, Nutzungsphase sowie Entsorgungsphase mit Recycling (ohne Wiederverwendung von Geräten). Die Abbildung 23 verdeutlicht diese Lebenswegabschnitte in Form der horizontalen, grau hinterlegten Felder. Diese gelten einheitlich für alle drei Hardware-Szenarien, einschließlich der Peripheriegeräte und jeweiligen Ersatzteile. Ebenfalls berücksichtigt sind die Umweltauswirkungen der Prozesse in den jeweiligen Vorketten, wie z.B. Rohstoffgewinnung, vorgelagerte industrielle Fertigungsprozesse, Energiebereitstellung, und Betrieb von Transportmitteln. Diese Vorketten wurden auf Basis von Lebenszyklus-Inventar-Datenbanken (ProBas¹¹⁶, ecoinvent 3.01¹¹⁷) berücksichtigt. Dabei wurde eine Relevanzschwelle (cut-off) von einem Masseprozent des jeweiligen Referenzflusses angewandt¹¹⁸. Das heißt, vernachlässigt wurden alle Input/Output Flüsse mit weniger als 1% des gesamten Masseflusses im jeweiligen Unit-Prozess, sofern die Summe aller vernachlässigten Stoffe nicht mehr als fünf Masseprozent beträgt.

Folgende Aspekte wurden nicht berücksichtigt:

- Sonstige Ausstattung von Computerarbeitsplätzen (Möbel, Gebäude, Beleuchtung)
- Auswirkungen des Computerbetriebs auf die Gebäudeklimatisierung

¹¹⁶ <http://www.probas.umweltbundesamt.de/php/index.php>

¹¹⁷ <http://www.ecoinvent.org/>

¹¹⁸ Dies entspricht der üblichen Vorgehensweise in der Ökobilanzierung gemäß ISO 14044 (Klöpffer & Grahl 2014)

- Betrieb von Computernetzwerken und Netzwerkinfrastrukturen, Drucker etc.
- Externe Datenübertragung und Datenspeicherung
- Herstellung und Entsorgung der Produktionsmittel für Herstellung, Transport und Entsorgung.
- Transporte von Halbzeugen zwischen verschiedenen Produktionsstandorten (außer den bereits in ecoinvent Markt-Mix-Inventaren enthaltenen Transporten).
- Wiedervermarktung und Wiederverwendung von IT-Geräten
- Recycling von Kunststoffen und Spezialmetallen, wie z.B. seltene Erden.
- Reparaturen und Wartung [Nur für die Sensitivitätsanalyse (5.10.2)].

5.6 Berücksichtigte Wirkungskategorien

Im Einklang mit dem Ziel und dem Untersuchungsrahmen dieser Studie wurde bei der Wirkungsabschätzung die Methode „ReCiPe Midpoint (Hierarchist)“¹¹⁹ eingesetzt. Als primärer Indikator wird dabei das Treibhauspotenzial (Englisch: Global Warming Potential, GWP) vertieft analysiert und diskutiert. Das Treibhauspotenzial (THG-Potenzial) wird in der Einheit „kg CO₂e“ dargestellt, dies entspricht der Menge an Kohlendioxid-Äquivalenten.

5.7 Datengrundlage, Modellierung und Annahmen

Die Modellierung der Ökobilanz erfolgte mit Hilfe der Software „Umberto Next Universal V.7.01“. Es wurde zunächst ein parametrisiertes Basismodell des gesamten Lebenszyklus eines Arbeitsplatzcomputers erstellt. Damit ist es möglich, aus ein und demselben Modell verschiedene Modifikationen des Basismodells vorzunehmen. Somit kann für die jeweiligen Szenarien Hardwareausstattungen und Nutzungsintensität modifiziert werden, ohne jeweils ein komplett Neumodellierung vornehmen zu müssen. Diese Modellmodifikationen wurden ihrerseits entsprechend den Annahmen zu den jeweiligen Beschaffungszyklen variiert. Insgesamt umfasst die Ökobilanz acht separate Umberto-Modelle (2*Desktop-PC; 2*Mini-PC; 4*Notebook), welche jeweils separat ausgewertet wurden. Die folgenden Abschnitte erläutern zunächst die Modellannahmen des Basismodells sowie die jeweiligen Modifikationen entsprechend der Szenarien.

¹¹⁹ Eine der drei Perspektiven auf Entscheidungssituationen in der ReCiPe Methode, welche in wissenschaftlichen Modellen meistens angewandt wird. Die anderen zwei Perspektiven sind Individualist und Egalitarian.

5.7.1 Herstellungsphase

Die Herstellung der Computerhardware wurde im Basismodell folgendermaßen abgebildet (Tabelle 82, Tabelle 83, Tabelle 84, Tabelle 85):

Tabelle 82: Datensätze zur Modellierung der Herstellung des Desktop-PC

Hauptkomponente	Einzelkomponenten	Datenquelle
Hauptplatine 6 dm ² (Mainboard)	Unbestückte Leiterplatte Bestückung mit aktiven & passiven Bauteilen CPU-Kühlkörper mit Lüfter	Öko-APC Kapitel 4 ¹²⁰ ; Basisdaten: ecoinvent 3.01
Prozessor (CPU)	Herstellung 300mm Wafer Front End Prozesse Back End Prozesse Flip-Chip Assembly	ProBas (Prakash et al. 2013); Öko-APC Kapitel 4; Basisdaten: ecoinvent 3.01
Hauptspeicher 1 Gbyte (DRAM) DDR3 DIMM 4 Module	300mm Wafer Herstellung Front End Prozesse Back End Prozesse	ProBas (Prakash et al. 2013); Basisdaten: ecoinvent 3.01
Festplatte	Einzelkomponenten der 3.5" HDD	Öko-APC Kapitel 4; Basisdaten: ecoinvent 3.01
Weitere Komponenten	Gehäuse & Netzteil mit Lüfter (eigene Annahmen: Stahl (6 kg), Kunststoff (0,3 kg)) Mouse & Tastatur (eigene Annahmen s. Tabelle 87)CD/DVD Laufwerk Internes Netzteil	ecoinvent 3.01

Tabelle 83: Datensätze zur Modellierung der Herstellung des Mini-PC

Hauptkomponente	Einzelkomponenten	Datenquelle
Hauptplatine 1,6 dm ² (Mainboard)	Unbestückte Leiterplatte, Bestückung mit aktiven & passiven Bauteilen CPU Kühler mit Lüfter & Heatpipe (s. Tabelle 87)	Öko-APC Kapitel 4; Basisdaten: ecoinvent 3.01
Prozessor (CPU)	Herstellung 300mm Wafer Front End Prozesse Back End Prozesse Flip-Chip Assembly	ProBas (Prakash et al. 2013) Öko-APC Kapitel 4; Eigene Annahmen; ecoinvent 3.01
Hauptspeicher 1 Gbyte (DRAM) DDR3 DIMM 4 Module	300mm Wafer Herstellung Front End Prozesse Back End Prozesse	ProBas (Prakash et al. 2013) ecoinvent 3.01
Festplatte	Einzelkomponenten der 2.5" HDD 2.5" SSD (Seagate Pulsar 2; 800 GB) (ab 2. Beschaffung)	Öko-APC Kapitel 4; Seagate 2011; ecoinvent 3.01
Peripherie- und weitere Komponenten	Gehäuse (eigene Annahmen) Mouse & Tastatur (eigene Annahmen s. Tabelle 87) CD/DVD Laufwerk (nur bei 1. Beschaffung) Netzteil (ersatzweise als Notebook Netzteil)	ecoinvent 3.01

¹²⁰ Zur Vereinfachung wird der Titel dieses Vorhabens als „Öko-APC“ abgekürzt.

Tabelle 84: Datensätze zur Modellierung der Herstellung des Notebooks

Hauptkomponente	Einzelkomponenten	Datenquelle
Hauptplatine 1,6 dm ² (Mainboard)	Unbestückte Leiterplatte Bestückung mit aktiven & passiven Bauteilen CPU Kühlsystem mit Lüfter & Heatpipe (s. Tabelle 87)	Öko-APC Kapitel 4; ecoinvent 3.01; Eigene Annahmen
Prozessor (CPU)	Herstellung 300mm Wafer Front End Prozesse Back End Prozesse Flip-Chip Assembly	ProBas (Prakash et al. 2013); Öko-APC Kapitel 4; ecoinvent 3.01
Hauptspeicher 1 Gbyte (DRAM) DDR3 DIMM 4 Module	300mm Wafer Herstellung Front End Prozesse Back End Prozesse	ProBas (Prakash et al. 2013); ecoinvent 3.01
Festplatte	Einzelkomponenten der 2.5" HDD 2.5" SSD (Seagate Pulsar 2; 800 GB) (ab 2. Beschaffung)	Öko-APC Kapitel 4; Seagate, 2011; ecoinvent 3.01
Integrierter Bildschirm	Notebook Display 15,4" Elektronikkomponenten (Eigene Annahmen)	ProBas (Prakash et al. 2013); ecoinvent 3.01;
Peripheriekomponenten	Gehäuse (Eigene Annahmen zu Material und Gewicht) Dockingstation Mouse & externe Tastatur (Eigene Annahmen s. Tabelle 87) CD/DVD Laufwerk externes Notebook Netzteil	ecoinvent 3.01
Prismatischer Li-Ion Akku		Clemm et al. 2015

Tabelle 85: Datensätze zur Modellierung der Herstellung des externen Monitors

Hauptkomponente	Einzelkomponenten	Datenquelle
22" Desktop-Monitor	Datensatz zu TFT Display 15,4" skaliert (*2) Unbestückte Leiterplatte 6 dm ² Bestückung (aktive & passive Bauteile) Gehäuse & Sockel	ProBas (Prakash et al. 2013); Öko-APC Kapitel 4; Eigene Annahmen, ecoinvent 3.01

Ausgehend vom Basismodell wurden für die einzelnen Komponenten folgende Annahmen getroffen (Tabelle 86, Tabelle 87) und in den jeweiligen Modellen hinterlegt. Die Lebenszyklus-Inventardaten (LCI) für Material- und Energieflüsse der Herstellungsprozesse basieren generell auf ecoinvent 3.01. Sofern der genaue Produktionsstandort nicht bekannt war, wurde jeweils der Markt-Mix für Rohstoffe bzw. der globale Strom Mix zugrunde gelegt.

Tabelle 86: Datensätze zur Modellierung der Herstellung einer bestückten Leiterplatte

Einzelkomponente	enthalten in Hauptkomponenten	Datenquelle
Unbestückte Leiterplatte (parametrisiert auf 1m ²)	Mainboard, DIMM-Module, HDD, Desktop-Monitor	Öko-APC Kapitel4
Bestückung (parametrisiert auf 1m ²)	Mengenangaben zu aktiven Komponenten (ICs) und passiven Komponenten (enthalten in Mainboard, HDD, Monitor) leiten sich aus dem Datensatz für das Logic-board einer 3,5" HDD ab. Es wurde angenommen, dass Grafik- & Netzwerkfunktionen jeweils auf dem Mainboard integriert sind, d.h. Grafikprozessor, VRAM und andere Controller-ICs werden unter generischen logic-ICs der Leiterplattenbestückung subsumiert.	Öko-APC Kapitel4 Datenquelle für aktive und passive Bauelemente aus ecoinvent 3.01

Einzelkomponente	enthalten in Hauptkomponenten	Datenquelle
CPU-Kühlkörper & Lüfter (PC) Heat Pipe & Lüfter (Mini-PC)	zusätzlich auf dem Mainboard enthalten (besteht aus 50g Aluminium, 50g Kupfer, 250g rostfreier Stahl).	Eigene Annahmen; ecoinvent 3.01
Heat Pipe & Lüfter (Notebook)	zusätzlich auf dem Mainboard enthalten (besteht aus 122g Magnesium Legierung, 75g Kupfer).	Eigene Annahmen; ecoinvent 3.01
Weitere Leiterplatten	Dockingstation (100g SMD bestückte Leiterplatte) CPU Interposer (unbestückte Leiterplatte)	ecoinvent 3.01

Tabelle 87: Datensätze zur Modellierung der Herstellung von aktiven Elektronikbauteilen und anderer Komponenten

Einzelkomponente	Erläuterungen	Datenquelle
Hauptprozessor (CPU) (1 Die pro Modul)	Silizium-Wafer Herstellung Front-End Prozess Back-End Prozess Die Berechnung beruht auf der Annahme, dass die Vereinzlung der „Dies“ vom fertigen Wafer am Ende des Back-End Prozesses stattfindet.	ProBas (Prakash et al. 2013) Öko-APC Kapitel 4
Speicher Modul (1 DIMM 1 Gbyte) enthält 8 Stück 1 Gbit Dies pro Modul ¹²¹	Silizium-Wafer Herstellung Front-End Prozess Back-End Prozess: eigene Annahme: Vereinzlung findet am Anfang des Back-End Prozesses statt.	ProBas (Prakash et al. 2013), ergänzt durch eigene Annahmen.
Festplatte (HDD)	bei Desktop-PCs: 3,5 Zoll HDD; bei Notebooks und Mini-PCs auf 2,5 Zoll skaliert (per Gewicht; 2,5 Zoll HDD entspricht $\frac{1}{2}$ des Gewichts des 3,5 Zoll HDD)	Öko-APC Kapitel 4; ecoinvent 3.01
interner Notebook Bildschirm	Display modelliert nach ProBas; Anteil an Elektronikkomponenten im internen Bildschirm ergänzt durch eigene Annahmen	ecoinvent 3.01 (Datensatz für 10 g logictype IC)
externer Desktop-Monitor	Auf Grundlage von ProBas/ Prakash et al. 2013 (15,4 Zoll Notebook); hochskaliert auf 22 Zoll nach eigenen Annahmen (enthält 6 dm ² bestückte Leiterplatte, abgeleitet vom HDD-Datensatz aus AP2, Öko-APC)	
Notebook Akku	Prismatischer Li-Ion Akku, Masse 0,26 kg	Clemm et al. (2015)
Gehäuse PC / Mini-PC / Notebook	jeweils eigene Annahmen (enthält Notebookgehäuse (inkl. Deckel und Tastatur), (enthält Stahlkomponenten (0,5 kg), Kunststoff (0,8 kg))	ecoinvent 3.01
Dockingstation	Eigene Annahme (enthält $\frac{1}{2}$ Notebookgehäuse + Leiterplatte 100 g)	ecoinvent 3.01
Tastatur	eigenes Modell enthält 307g ABS + 173g PS (Gehäuse), 28g Folie + 0,5g Silber, 8g Leiterplatte, 60g Kabel)	Eigene Messung, ecoinvent 3.01
Mouse	eigenes Modell enthält 57g ABS; 20g Leiterplatte; 27g Kabel	Eigene Messung, ecoinvent 3.01

¹²¹ Der in Probas dokumentierte Speicherchip hat ein Speichervermögen von 1 Gigabit pro Die (Samsung Electronics, 2010). Zur Herstellung eines DRAM Speicherriegels mit 1 Gbyte Speichervermögen werden mindestens 8 Stück 1Gbit Dies benötigt (1 Byte = 8 Bit).

Datenlücken und Unsicherheiten bei der Modellierung der Herstellungsphase

Im Folgenden sind die Datenlücken und Unsicherheiten, die mit der Modellierung der Herstellungsphase verbunden sind, aufgeführt:

Datenlücken und Unsicherheiten

- Konkrete Angaben zur Größe und Bestückungsdichte der in verschiedenen Gerätemodellen verwendeten Leiterplatten waren nicht verfügbar. Die generischen Annahmen zur Leiterplattenbestückung (Ableitung vom Datensatz für HDD (Kapitel4)) repräsentieren nur unzureichend die tatsächliche Art, Zahl, und Dichte von aktiven und passiven Elektronikkomponenten auf verschiedenen Leiterplattentypen. Dadurch lassen sich die Umweltauswirkungen der verschiedenartig bestückten Modelle lediglich anhand der Leiterplattenfläche unterscheiden.
- Weil konkrete Bestückungslisten sowie LCI-Daten zum Chipsatz (Grafikprozessor, VRAM, Buscontroller, Northbridge, BIOS etc.) der jeweiligen Computermodelle nicht verfügbar waren, wurden diese Komponenten als generische Logic-type ICs bzw. Memory-type ICs modelliert. Verschiedene Technologiegenerationen konnten nicht unterschieden werden. Da sich die Integrationsdichte des jeweils verwendeten Chipsatzes sowie die Anzahl der in ICs integrierten Funktionen immer weiter erhöhen, kann dies zu einer Unterschätzung der Umweltauswirkungen dieser Komponenten führen.
- Die Herstellung der SSD konnte aufgrund fehlender Angaben über die genaue Anzahl der für SSDs verwendeten NAND-Flash Chips (Speicherbausteine) nicht lückenlos modelliert werden. Die ersatzweise als Datenquelle verwendeten Literaturangaben (Seagate, 2011) sind als wenig robust einzuschätzen. Um diese Datenlücke zu schließen, wurde die Studie „LCA of Semiconductors“ von Boyd (2009) ausgewertet. Allerdings umfasst die Systemgrenze dieser LCA-Daten nur die Front-End Prozesse der Wafer-Produktion von NAND-Flash Chips, nicht aber die der kompletten SSD. Es fehlen dort Informationen zu den Back-End Prozessen sowie zur funktionellen Größe der Chips (sprich, wie viele GBits pro Die). Noch dazu fehlen Angaben zur Anzahl der Dies per GByte Flash IC sowie Anzahl der ICs pro 100 GByte in der SSD. Zudem beziehen sich die Daten von Boyd (2009) auf die 45nm Technologiegeneration während in 2015 bereits eine 22nm Technologie mit anderen Chipgrößen pro Wafer auf dem Markt war. Daraus folgt, dass die Daten von Boyd (2009) im Rahmen dieser Studie nicht direkt genutzt werden konnten.
- Es lagen keine aktuellen LCI-Datensätze zu 2,5“ HDDs vor. Die ersatzweise angenommenen LCI-Datensätze zur 3,5“ HDD wurden nach Gewicht auf 2,5“ HDD skaliert (Umrechnungsfaktor 25% auf alle I/O Flüsse). Dies ist nur als grobe Näherung zu betrachten weil sich die beiden Typen von Massenspeicher in ihren technologischen Grundlagen (Material des Speichermediums) und Herstellungstechnologien unterscheiden. Allerdings gilt die gleiche Aussage für 2,5“ HDDs unterschiedlicher Hersteller und Technologiegenerationen. Aus diesem Grund wurde in Absenz konkreter Produktinformationen zu 2,5“ HDDs eine Abweichung zur Diskussion in Abschnitt 4.2.6 (Skalierbarkeit des Datensatz zur 3,5“ HDD) in Kauf genommen. Die resultierende Datenunsicherheit wurde im Kontext der LCA Modellierung für unvermeidbar eingeschätzt.
-

- Angaben über Sammelquoten von IKT Altgeräten in der Bundesverwaltung lagen bei der Berechnung der Ökobilanz nicht vor. Es wurde vereinfachend angenommen, dass alle Altgeräte in einen generischen WEEE Prozess (ecoinvent 3.01) gelangen und nach der 50/50-Allokationsregel für THG-Gutschriften für die Sekundärrohstoffe sowie das THG-Potenzial der Recyclingprozesse bewertet wurden. Auf das Gesamtergebnis hat eine Variation dieser Annahme allerdings keinen wesentlichen Einfluss.
- Bei der Chipherstellung (CPU und DRAM) gibt es Interpretationsspielraum bezüglich der Abgrenzung von Front-End-Prozessen und Back-End-Prozessen. Dies ist bedingt durch sich stetig verändernde Herstellungstechnologien sowie unzureichende Datenquellen hinsichtlich Back-End Prozessen. Insbesondere die Prozessabfolge bei Bonding bzw. Flip-chip-Technologien und Die-Vereinzelung ließ sich im konkreten Modell nicht eindeutig klären.
- Die Chipausbeute (Good-dies) per Wafer bei CPU und DRAM variiert durch sich stetig verändernde Herstellungstechnologie und Chip-Generationen (z.B. abnehmende Strukturbreiten, zunehmende Chipfläche, Ausschussrate). Außerdem konnten die verschiedenen Qualitäten der Good-dies am Ende des Herstellungsprozesses nicht berücksichtigt werden.
- Bei Datensätzen zu komplexen Elektronikbauteilen sind die verfügbaren Informationen z.B. zu Technologiegeneration, Hersteller, Preisklasse aus der ecoinvent Datenbank für eine detaillierte Beitragsanalyse oft nicht ausreichend. Zudem existieren für viele in der Chipherstellung verwendete Spezialchemikalien keine ecoinvent-Datensätze. In diesen Fällen wurden generische LCI-Datensätze (organische/ anorganische Chemikalien) verwendet.
- Aufwand für das Hardware-Rollout sowie für die Service-Technik zum Zweck der Reparaturen wurde nicht berücksichtigt.

5.7.2 Transport (Distribution und Feinverteilung)

Die Ökobilanz beruht auf einem generischen Modell für die Transportvorgänge der Neugeräte in ihrer Transportverpackung (Abbildung 24). Demnach werden die Geräte ab Werkstor an ihrem Produktionsstandort (China) zunächst per LKW über eine mittlere Distanz von 500 km zum Überseehafen Shanghai transportiert¹²². Dort erfolgt der Umschlag auf ein Containerschiff¹²³. Der Schiffstransport erfolgt via Suez-Kanal nach Hamburg über eine Distanz von 11.043 nautische Meilen (20.000 km)¹²⁴. Von dort erfolgt die regionale Verteilung mittels LKW zu den verschiedenen Einsatzorten in der Bundesverwaltung über eine geschätzte Distanz¹²⁵ von 1.000 km.

¹²² Eigene Annahme

¹²³ Umschlagprozesse sind außerhalb der Systemgrenze

¹²⁴ Datenquelle: <http://www.sea-distances.org/>

¹²⁵ Datenquelle für alle Transportvorgänge: ecoinvent 3.01

Abbildung 24: Modellskizze zu Transportvorgängen bei Neugeräten (Desktop-PCs, Notebooks, Mini-PC und Monitore)



Unter der Sensitivitätsanalyse 2 (5.10.2) wurden Ersatzteile unabhängig von den Neugeräten gemäß dem oben skizzierten Transportmodell nachgeliefert. Dabei gelten folgende veränderte Annahmen:

- Lieferung der Ersatz-HDD bzw. SSD sowie Speicherriegel per Luftfracht aus China, 8.877 km (Shanghai-Frankfurt)¹²⁶
- Lieferung des Ersatz Akkus für Notebooks erfolgt per Containerschiff, 18.705 km (China-Rotterdam) und 1.700 km LKW Transport (Feinverteilung). Daten für den Akkutransport wurden aus einer EU-Studie¹²⁷ abgeleitet.

Transportverpackungen werden nach Auslieferung am Zielort entfernt und entsorgt (inklusive Recycling)¹²⁸. Die Tabellen Tabelle 88 und Tabelle 89 geben Details über die im LCA-Modell verwendeten Datensätze und die zugrundeliegenden Emissionsfaktoren.

Tabelle 88: Datensätze zur Modellierung der Distribution und Feinverteilung - Datenquellen

Input	Datensätze	Zeitbezug	Ortsbezug	Quelle
Transport von Produktionsstandorten zum Frachthafen	market for transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EUR05	2013	global	ecoinvent 3.01
Überseetransport (Seeweg) für Grundgeräte	market for transport, freight, sea, transoceanic ship	2013	global	ecoinvent 3.01
Überseetransport (Luftfracht) für Ersatzteile	market for transport, freight, aircraft	2013	global	ecoinvent 3.01
Feinverteilung (vom Frachthafen zum Einsatzort)	market for transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EUR05	2013	global	ecoinvent 3.01

Tabelle 89: Datensätze zur Modellierung der Distribution und Feinverteilung - Emissionsfaktoren

Input	Emissionsfaktoren (GWP-Werte)	Einheit
LKW Transport 16-32 t EUR05	0,174	kg CO ₂ e/tkm
Überseetransport (Seeweg)	0,012	kg CO ₂ e/tkm
Überseetransport (Luftfracht)	1,126	kg CO ₂ e/tkm

¹²⁶ Datenquelle: <https://www.world-airport-codes.com>

¹²⁷ Europäische Kommission (2011)

¹²⁸ Datenquelle: ecoinvent 3.01

5.7.3 Nutzungsphase

Die Nutzungsphase der verschiedenen APC-Modelle wurde entsprechend der in Abschnitt 5.2 beschriebenen Szenarien mit Modifikationen für die jeweiligen Beschaffungszyklen modelliert. Strom ist der alleinig relevante Input während der Nutzungsphase. Die Modellannahmen berücksichtigen den gegenwärtigen deutschen Strom-Mix (Niederspannung) mit einem Emissionsfaktor von 0,665 kg CO₂e/kWh¹²⁹. Veränderungen im deutschen Strom-Mix bis zum Ende des Betrachtungszeitraums (2024) werden vernachlässigt.

Die folgende Tabelle 90 zeigt die angewendeten Stromverbrauchswerte (kWh/ Jahr) für die Modellierung der Nutzungsphase:

Tabelle 90: Stromverbrauch (kWh/Jahr) in der Nutzungsphase

	Computerendgeräte (kWh/Jahr)					Arbeitsplatzlösungen (kWh/Jahr) mit		
	Desktop-PC	Notebook	Mini-PC	Monitor mit Desktop/Mini-PC	Monitor mit Notebook ¹³⁰	Desktop-PC	Notebook-	Mini-PC-
2014	46,46	14,70	27,34	25,35	19,77	71,80	34,47	52,69
2015	46,46	14,70	27,34	25,35	19,77	71,80	34,47	52,69
2016	46,46	14,70	27,34	25,35	19,77	71,80	34,47	52,69
2017	46,46	12,61	27,34	25,35	19,77	71,80	32,38	52,69
2018	46,46	12,61	27,34	25,35	19,77	71,80	32,38	52,69
2019	35,95	12,61	21,15	19,61	15,30	55,56	27,91	40,76
2020	35,95	10,81	21,15	19,61	15,30	55,56	26,11	40,76
2021	35,95	10,81	21,15	19,61	15,30	55,56	26,11	40,76
2022	35,95	10,81	21,15	19,61	15,30	55,56	26,11	40,76
2023	35,95	9,27	21,15	19,61	15,30	55,56	24,57	40,76

Neuanschaffungen fanden in den Jahren mit grauschattierten Feldern statt.

Die Nutzungsprofile bzw. die zeitliche Verteilung der einzelnen Betriebszustände wurden aus dem Arbeitspaket 1 (Kapitel 3; Tabelle 20; Tabelle 21; Tabelle 25; Tabelle 26) entnommen. Dabei wurde die mittlere Nutzung für die Berechnungen herangezogen. Die durchschnittlichen Leistungsaufnahmen (W) für die einzelnen Computerendgeräte, die zur Berechnung der in Tabelle 90 dargestellten jährlichen Energieverbräuche herangezogen wurden, sind in folgender Tabelle 91 dargestellt:

¹²⁹ ecoinvent 3.01

¹³⁰ Beim Computerarbeitsplatz mit Notebook wurde auch die mobile Nutzung des Notebooks berücksichtigt. Dadurch verringert sich die Zeit der stationären Nutzung bei dieser Arbeitsplatzlösung. Bei der mobilen Nutzung kommt der externe Monitor nicht zum Einsatz. Daher liegt der Verbrauch des Monitors mit Notebook um 5,58 kWh niedriger als der des Monitors mit Desktop-PC oder Mini-PC.

Tabelle 91: Durchschnittliche Leistungsaufnahme von Computerendgeräten in der Bundesverwaltung

	Aktiv/Leerlauf	Ruhe	Schein-Aus	Quelle
Desktop-PC	32,39 Watt	2,08 Watt	0,79 Watt	Kaufhaus des Bundes, 2014
Notebook	9,04 Watt	0,735 Watt	0,46 Watt	Kaufhaus des Bundes, 2015
Mini-PC	16,27 Watt	1,72 Watt	0,91 Watt	Kaufhaus des Bundes, 2015
Monitor	18,82 Watt	0,5 Watt	0,3 Watt	Kaufhaus des Bundes, 2015

Die Berechnung des Stromverbrauchs bemisst sich an der durchschnittlichen Nutzung von Arbeitsplatzcomputern in der deutschen Bundesverwaltung. Demnach beläuft sich die aktive Betriebsphase auf 203 Arbeitstage (à 8 Stunden) im Jahr. Weitere 162 Tage befinden sich die Geräte im ausgeschalteten Zustand. Dabei existiert keine vollständige Trennung vom Stromnetz, sodass Stand-by-Verluste auftreten. Diese sind in den Modellen der Nutzungsphase berücksichtigt.

Die Nutzungsdauer der Arbeitsplatzcomputer wurde gemäß der in Abschnitt 5.2 beschriebenen Szenarien wie folgt festgelegt (Tabelle 92, siehe auch Tabelle 80).

Tabelle 92: Angenommene Nutzungsdauer der verschiedenen Gerätetypen

	Desktop-PC	Notebook	Mini-PC	Monitor
Beschaffung 1	5 Jahre	3 Jahre	5 Jahre	5 Jahre
Beschaffung 2	5 Jahre	3 Jahre	5 Jahre	5 Jahre
Beschaffung 3		3 Jahre		
Beschaffung 4		1 Jahr		

Während der Nutzungsdauer der jeweiligen Geräte bleibt der Stromverbrauch konstant. Allerdings berücksichtigt das Modell eine progressive, aber vereinfachte Zunahme der Energieeffizienz von 5% pro Jahr durch technischen Fortschritt für alle Geräte.

5.7.4 End-of-Life

Das Modell der Entsorgungsphase berücksichtigt ein Recycling und anschließende Entsorgung der obsoleten Computerhardware. Tabelle 93 gibt die angenommenen Massen je APC-Kategorie wieder. Dabei gilt eine lineare Allokationsregel bei Überschneidung von Nutzungsdauer und Betrachtungszeitraum. Transportvorgänge in der Entsorgungskette werden pauschal, d.h. unabhängig vom der Art des Elektroschrotts, mit parametrisierten Werten veranschlagt¹³¹. Es werden drei parallele Prozessketten für die WEEE-Entsorgung basierend auf ecoinvent 3.01 modelliert:

- Manuelle Zerlegung vor dem Recycling (1/3 der Menge)
- Mechanische Zerlegung vor dem Recycling (2/3 der Menge).

¹³¹ Annahmen zu Transportvorgängen in der Entsorgungskette basieren auf dem Unit-Datensatz „market for used desktop computer“ in ecoinvent 3.01

- Separate Entsorgung gebrauchter Notebook-Akkus¹³².

Tabelle 93: Angenommene Elektroschrottmengen* der verschiedenen Gerätetypen

	Desktop-PC	Notebook**	Mini-PC
Beschaffung 1	16,24 kg	5,8 kg	8,1 kg
Beschaffung 2	16,24 kg	5,8 kg	8,1 kg
Beschaffung 3	-	5,8 kg	
Beschaffung 4		1,95 kg	

* Mengenangaben enthalten jeweils den Anteil an Elektroschrott für den externen Monitor via Allokation auf dessen Nutzungsdauer. Das heißt, alle Entsorgungsprozesse wurden anteilig pro Kalenderjahr angerechnet und per Allokation auf die Beschaffungen verteilt.

** Beim 4. Beschaffungszeitraum: Mengenangaben mit Allokation der Nutzungsdauer auf Betrachtungszeitraum

Für das wertstoffliche Recycling von Metallen aus WEEE gelten die folgenden Annahmen:

- 100 % Sammelquote für WEEE in der Bundesverwaltung¹³³
- Recyclingquoten: Stahl 96%, Aluminium 68%, Kupfer 57%, Kobalt 76%, Gold 65%, PGM 65%, Silber 65%¹³⁴.
- Angenommene THG Substitutionspotenziale pro kg Sekundärrohstoff¹³⁵:
 - Stahl 2 kg CO₂e
 - Aluminium 14,6 kg CO₂e
 - Kupfer 4,6 kg CO₂e
 - Kobalt 10,8 kg CO₂e
 - Gold 10.603 kg CO₂e
 - PGM 10.192 kg CO₂e
 - Silber 141 kg CO₂e
- 50/50-Allokationsregel für THG-Gutschriften für Sekundärrohstoffe sowie das THG-Potenzial der Recyclingprozesse

Die Berechnung der gesamten Recyclinggutschriften stützt sich auf die Annahme, dass die Wiederverwendung der Sekundärrohstoffe zu einer Substitution von primären Rohstoffen führt. Ausgewiesen wird die Summe der eingesparten THG Potenziale der substituierten Primärmetalle abzüglich des THG Potenzials der Recyclingprozesse.

¹³² ecoinvent 3.01

¹³³ Diese Annahme stellt ein optimistisches Szenario dar. Die tatsächliche Sammelquote für WEEE in der Bundesverwaltung war im Rahmen dieser Studie nicht bekannt.

¹³⁴ Buchert et al. 2012

¹³⁵ ecoinvent 3.01

5.8 Ergebnisdarstellung und Auswertung

Dieses Kapitel präsentiert die Ergebnisse der vergleichenden Ökobilanzen für die drei Varianten von Arbeitsplatzlösungen: (1) Computerarbeitsplatz mit Desktop-PC, (2) Computerarbeitsplatz mit Notebook, (3) Computerarbeitsplatz mit Mini-PC. Die Auswertung der Umweltauswirkung erfolgt nach der Wirkungskategorie „Globale Erwärmung“ und wird in Form des „Treibhausgas (THG)-Potenzials“¹³⁶ angegeben. Alle nachfolgend präsentierten Ökobilanzresultate beziehen sich jeweils auf die in dieser Studie verwendete funktionelle Einheit:

„Nutzung eines hauptsächlich stationären Arbeitsplatzcomputers für die Bearbeitung verwaltungstypischer Aufgaben für ein Jahr“

Die folgenden drei Abschnitte (5.8.1–5.8.3) zeigen jeweils die Treibhausgasemissionen der einzelnen Phasen im gesamten Lebenszyklus von Computerhardware (Herstellungsphase (cradle-to-gate), Distributionsphase, Nutzungsphase, Entsorgungsphase). Dabei werden die Teilergebnisse für die Herstellung der Hardwarekomponenten jeweils gesondert ausgewiesen.

5.8.1 Gesamtbewertung

Das kumulierte Treibhausgaspotenzial aller Lebenszyklusphasen der jeweiligen Arbeitsplatzlösungen über den Betrachtungszeitraum von 10 Jahren ist in Abbildung 25 und Tabelle 94 abgebildet. Entsprechend der Modellannahmen stellt dieses Ergebnis die gesamte Emission von Treibhausgasen dar, welche der bestimmungsgemäßen Verwendung eines Computerarbeitsplatzes für Büroanwendungen über 10 Jahre zuzurechnen ist. Die Recyclinggutschriften aus der Rückgewinnung von Rohstoffen wurden berücksichtigt. Die Gesamtaussagen ändern sich dadurch nicht.

¹³⁶ Englische Bezeichnung: Global Warming Potential (GWP)

Abbildung 25: Vergleich des gesamten Treibhausgaspotenzials (THG100) der drei Arbeitsplatzlösungen aufgeschlüsselt nach Lebenszyklusphasen (kg CO₂e); kumuliert über 10 Jahre (mit Gutschriften)

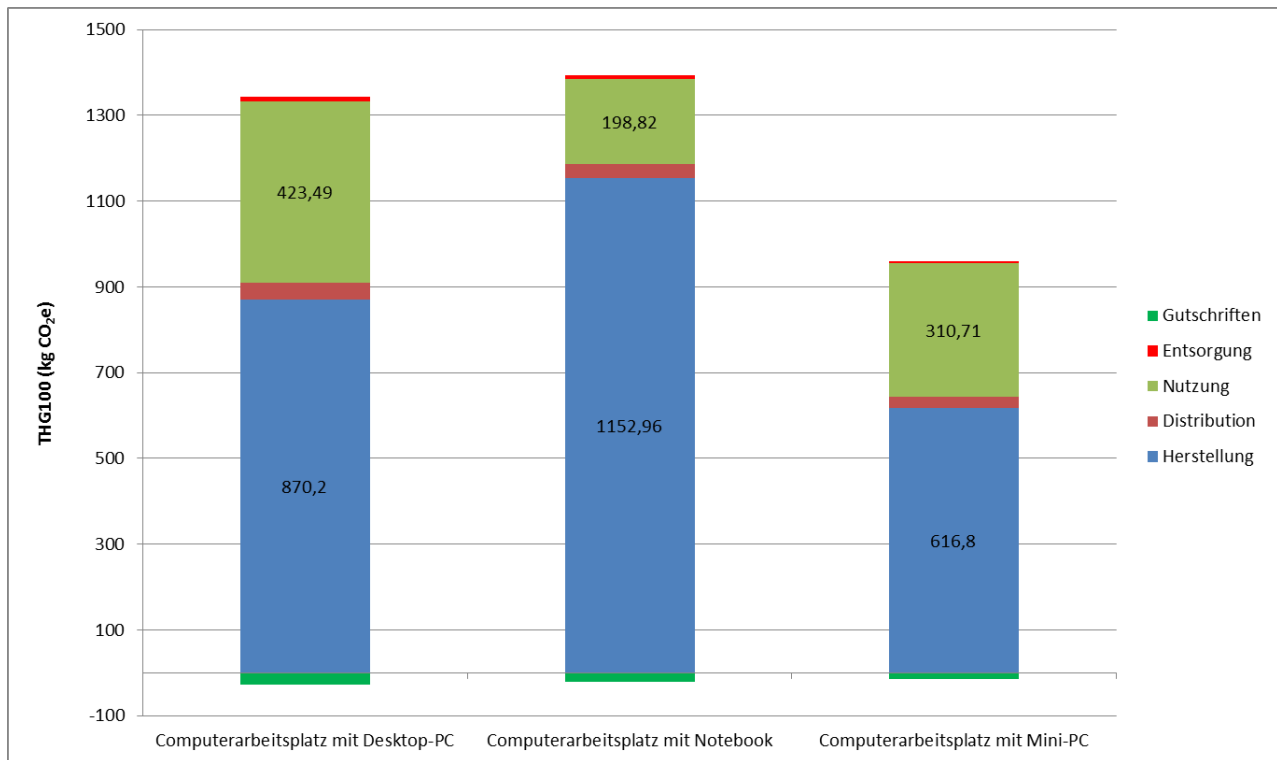


Tabelle 94: Treibhausgaspotenzial der drei Arbeitsplatzlösungen (kg CO₂e), kumuliert über 10 Jahre

	Computerarbeitsplatz mit Desktop-PC	Computerarbeitsplatz mit Notebook	Computerarbeitsplatz mit Mini-PC
Herstellung	870,2	1152,96	616,8
Distribution	39,6	33,70	26,8
Nutzung	423,49	198,82	310,71
Entsorgung	9,6	8,10	4,8
Gutschriften	-27,0	-22,0	-15,0
Summe (ohne Gutschriften)	1343	1394	959
Summe (mit Gutschriften)	1316	1372	944

Abbildung 25 und Tabelle 94 zeigen, dass die Herstellung und Nutzung der Computerhardware nennenswerte Treibhausgasemissionen verursachen. Insbesondere die Bereitstellung von Elektrizität für die Herstellung der mikroelektronischen Hardwarebauteile sowie die Bereitstellung des in der Nutzungsphase verbrauchten Stroms tragen die größten Anteile am Treibhausgaspotenzial der Computerarbeitsplätze bei.

Es wird deutlich, dass der größte Anteil der gesamten Treibhausgasemissionen auf die Hardwareherstellung zurückzuführen ist. Die Ergebnisse verdeutlichen den Einfluss des Computertyps auf das gesamte THG-Potenzial eines Computerarbeitsplatzes. Beim Computerarbeitsplatz mit Notebook macht die Herstellungsphase über 82% der Gesamttreibhausgasemissionen dieser Arbeitsplatzlösung aus. Anders als in einigen Studien (wie z.B. EuP 2007 dargestellt, hat sogar bei einem Computerarbeitsplatz mit Desktop-PC die Herstellungsphase und nicht die Nutzungs-

phase den höchsten Anteil (64,80%) an Gesamttreibhausgasemissionen (Abbildung 26 und Tabelle 95).

Abbildung 26: Prozentualer Anteil der Lebenszyklusphasen am Treibhausgaspotenzial der drei Arbeitsplatzlösungen (ohne Recyclinggutschriften)

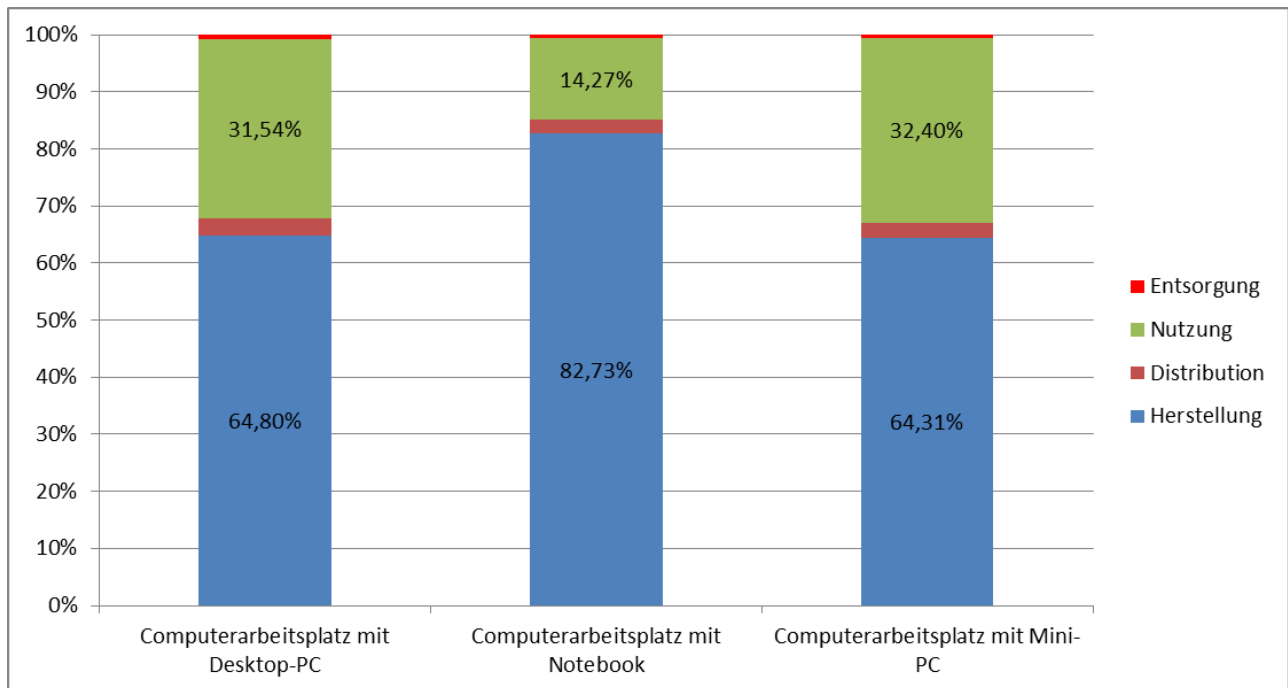


Tabelle 95: Prozentualer Anteil der Lebenszyklusphasen am Treibhausgaspotenzial der drei Arbeitsplatzlösungen (ohne Recyclinggutschriften)

	Computerarbeitsplatz mit Desktop-PC	Computerarbeitsplatz mit Notebook	Computerarbeitsplatz mit Mini-PC
Herstellung	64,80%	82,73%	64,31%
Distribution	2,95%	2,42%	2,79%
Nutzung	31,54%	14,27%	32,40%
Entsorgung	0,71%	0,58%	0,50%

Das höchste absolute THG-Potenzial hat ein mit Notebook ausgestatteter Computerarbeitsplatz (1.394 kg CO₂e ohne Recyclinggutschriften). Der Grund ist die mehrfache Anschaffung bzw. Herstellung der Hardware im Betrachtungszeitraum. Jedoch bewirkt der Einsatz von Notebooks anstelle des Desktop-PCs im Rahmen der in dieser Ökobilanz getroffenen Annahmen¹³⁷ nur marginale Erhöhung des THG-Potenzials, was auf den hohen Herstellungsaufwand des höher dimensionierten Desktop-PCs und seinen hohen Energieverbrauch in der Nutzung zurückzuführen ist. Hingegen weist der Computerarbeitsplatz mit Mini-PC ein etwa 31% geringeres THG-Potenzial als der Computerarbeitsplatz mit Notebook und ca. 28% geringeres THG-Potenzial als der Computerarbeitsplatz mit Desktop-PC auf. Insgesamt hat ein Computerarbeitsplatz

¹³⁷ V.a. Annahmen zu Nutzungsdauer, Hardwareausstattung und Energieeffizienz der jeweiligen Gerätetypen.

mit Mini-PC über den Betrachtungszeitraum von 10 Jahren die geringsten Treibhausgasemissionen von 959 kg CO₂e (ohne Recyclinggutschriften). Auch bei dieser Lösungsvariante macht die Herstellungsphase mit 64,31 % den größten Anteil der Gesamttreibhausgasemissionen aus.

Obwohl Notebooks insgesamt deutlich leichter sind als Desktop-PCs, fällt die Masseersparnis in der THG-Bilanz kaum ins Gewicht, weil die größten Beiträge zum THG-Potenzial von den aktiven Mikroelektronikkomponenten (z.B. DRAM) herrühren. Die verschiedenen Geräte-Modelle weisen im Kontext der hier zugrundeliegenden funktionellen Einheit eine äquivalente Ausstattung mit diesen Komponenten (je 4 Gbyte DRAM) auf. Allerdings haben Notebooks im hier angenommenen Szenario eine kürzere Nutzungsdauer (3 Jahre) als Desktop-PCs (5 Jahre) und müssen dementsprechend häufiger ersetzt werden. Zur Gewährleistung einer funktionellen Äquivalenz im gesamten Betrachtungszeitraum von 10 Jahren werden demnach 2,0 Desktop-PCs bzw. 3,33 Notebooks benötigt¹³⁸. Vereinfacht ausgedrückt benötigt der Computerarbeitsplatz mit Desktop-PC in 10 Jahren beispielsweise 8 Stück DRAM Speicherriegel von je 1 GByte, während der Computerarbeitsplatz mit Notebook im gleichen Zeitraum 13,32 Stück benötigt. Der hohe Herstellungsaufwand eines DRAM Speicherriegels und anderer mikroelektronischen Komponenten (siehe 5.8.2) gekoppelt mit einer kürzeren Nutzungsdauer von Notebooks ist der Hauptgrund dafür, dass ein Computerarbeitsplatz mit Notebook-trotz vergleichsweise besserer Energieeffizienz insgesamt schlechter abschneidet als ein Computerarbeitsplatz mit Desktop-PC. Desktop-PCs verursachen höhere Treibhausgasemissionen als Mini-PCs, weil sie in der Nutzung weniger effizient und in der Herstellung aufwändiger sind.

Aus den zuvor diskutierten Ökobilanzergebnissen lässt sich zusammenfassend schlussfolgern, dass leichtere und sparsamere Hardware gegenüber dem Desktop-PC nicht zwangsläufig zu ökologischen Vorteilen führen. Die kurze Nutzungsdauer von Notebooks resultiert sogar in höheren Treibhausgasemissionen im Vergleich zu den Computerarbeitsplätzen mit Desktop-PCs. Die geringsten Treibhausgasemissionen eines Computerarbeitsplatzes mit Mini-PC sind ebenfalls darauf zurückzuführen, dass die Mini-PCs eine vergleichbare längere Nutzungsdauer von 5 Jahren aufweisen.

5.8.2 Beitragsanalyse

In diesem Abschnitt werden die Ursachen des THG-Potenzials im Lebenszyklus der drei Arbeitsplatzlösungen näher analysiert. Die Beitragsanalyse beleuchtet die Anteile der verschiedenen Komponenten bzw. Prozesse an den Umweltauswirkungen der einzelnen Lebenszyklusphasen.

Die drei untersuchten Arbeitsplatzlösungen setzen sich aus verschiedenen Hardwarekomponenten zusammen. Das Ökobilanzmodell unterscheidet zwischen dem Grundgerät und den Peripheriegeräten (Monitor, Tastatur, Mouse und Docking-Station).

Die folgenden Abschnitte präsentieren die Beiträge der Lebenszyklusphasen zur gesamten THG Bilanz, aufgeschlüsselt nach dem THG Anteil der jeweiligen Hardwarekomponenten. Teilweise

¹³⁸ Die nicht ganzzahligen Werte ergeben sich durch die Allokation der Nutzungsdauer der Geräte auf den Betrachtungszeitraum von 10 Jahren. Die Ökobilanz berücksichtigt bei den zuletzt beschafften Geräten nur den im Betrachtungszeitraum liegenden Anteil der Nutzungsdauer. Entsprechend wird der jeweilige THG-Anteil der Herstellungsphase bei diesen Geräten nur anteilig berücksichtigt.

gibt es erhebliche Unterschiede bei dem THG-Beitrag der einzelnen Komponenten zwischen den drei Arbeitsplatzlösungen (z.B. DVD-Laufwerk, Netzteil), was auf die verwendeten Datensätze aus der zugrunde gelegten Datenbank zurückzuführen ist. Eine Detailprüfung von einzelnen Datensätzen konnte im Rahmen der Studie nicht gewährleistet werden.

Treibhausgaspotenzial der Herstellung eines Computerarbeitsplatzes mit Desktop-PC

Ein Desktop-PC verursacht in seiner Herstellung ein THG-Potenzial von 346,9 kg CO₂e (inkl. Mouse und Tastatur).

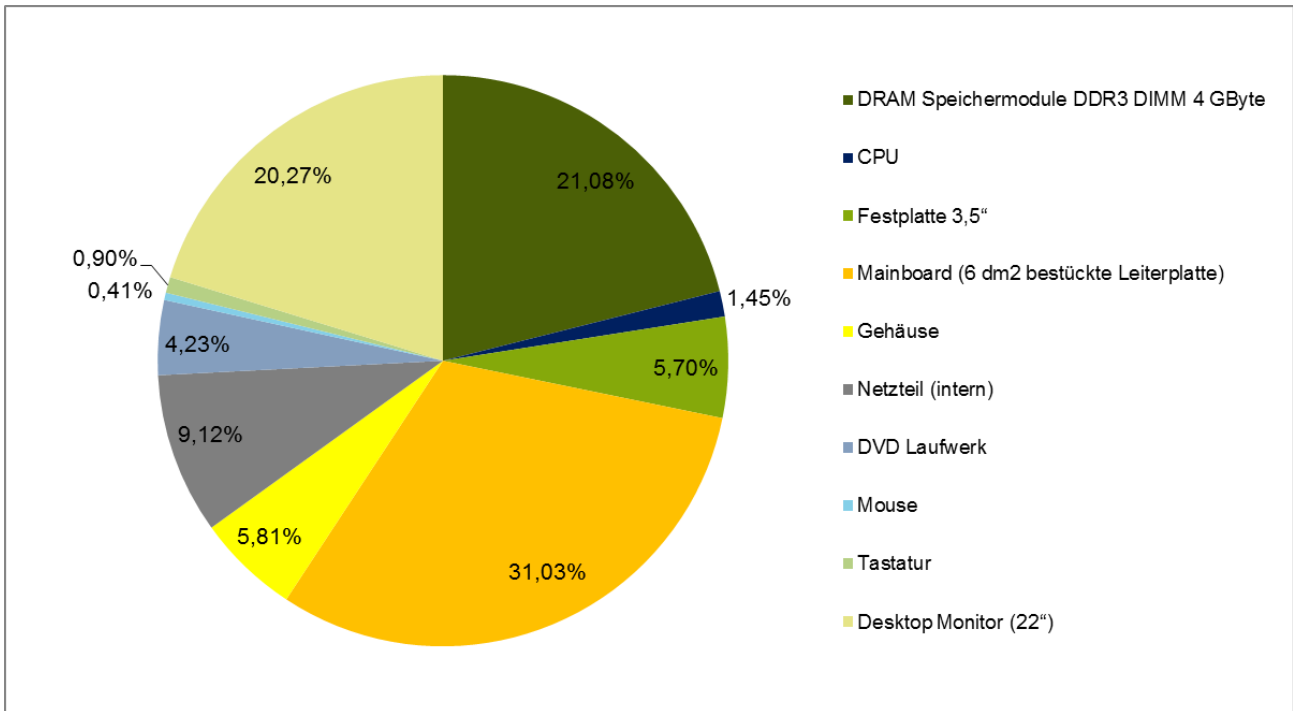
Tabelle 96: Treibhausgaspotenzial (THG100) der Herstellung eines Computerarbeitsplatzes mit Desktop-PC

Desktop-PC	THG (kg CO ₂ e)	THG - Summe (kg CO ₂ e)
DRAM-Speichermodule DDR3 DIMM 4 GByte	91,7	
CPU	6,3	
Festplatte 3,5"	24,8	
Mainboard (6 dm ² bestückte Leiterplatte)	135	
Gehäuse	25,3	
Netzteil (intern)	39,7	
DVD-Laufwerk	18,4	
Mouse	1,8	
Tastatur	3,9	
THG-Potenzial der Herstellung eines Desktop-PCs		346,9
THG-Potenzial der Herstellung eines Computerarbeitsplatzes mit Desktop-PC (inkl. externer Monitor) über einen Betrachtungszeitraum von 10 Jahren (Tabelle 80)		870,2

Zu einem Computerarbeitsplatz gehört auch ein externer Monitor. Dieser hat einen zusätzlichen Herstellungsaufwand von 88,2 kg CO₂e. Berechnet über den Betrachtungszeitraum von 10 Jahren resultiert die Herstellung eines Computerarbeitsplatzes mit Desktop-PC (inkl. externer Monitor) in ein THG-Potenzial von 870,2 kg CO₂e.

Die folgende Abbildung 27 stellt die prozentualen Anteile einzelner Hardware THG-Beiträge grafisch dar.

Abbildung 27: Anteil von Hardwarekomponenten am THG-Potenzial der Herstellung eines Computerarbeitsplatzes mit Desktop-PC (inkl. externer Desktop-Monitor) (%)



Beim Computerarbeitsplatz mit Desktop-PC hat das 6 dm² große Mainboard den größten Anteil (31%) am THG-Potenzial und die DRAM-Module den zweit höchsten Anteil (21%). Der relativ hohe Beitrag des Desktop-Monitors (20%) resultiert ebenfalls aus der im Modell angenommenen Leiterplatte sowie den mit dem TFT-Display verbundenen Ansteuerchips. Zusammenfassend zeigen die Ökobilanzergebnisse der Herstellungsphase, dass die größten THG-Beiträge aus der Herstellung aktiver Elektronikkomponenten stammen. Hingegen leisten passive Elektronikkomponenten und Supportmaterialien nur verhältnismäßig geringe Beiträge zum THG-Potenzial der Hardware.

Treibhausgaspotenzial der Herstellung eines Computerarbeitsplatzes mit Notebook

Ein Notebook mit HDD verursacht in seiner Herstellung ein THG-Potenzial von 251,7 kg CO₂e (inkl. Docking-Station, Mouse und Tastatur). Wenn ein Notebook ein SSD enthält statt einer HDD, liegt das THG-Potenzial bei 311,1 kg CO₂e (Tabelle 97).

Tabelle 97: Treibhausgaspotenzial (THG100) der Herstellung eines Computerarbeitsplatzes mit Notebook

Notebook	THG (kg CO ₂ e)	THG-Summe (kg CO ₂ e)
DRAM-Speichermodule DDR3 DIMM 4 GByte	91,7	
CPU	5,9	
Festplatte 2,5" (HDD / SSD)	6,2 / 65,6 ¹³⁹	
Mainboard (1,6 dm ² bestückte Leiterplatte mit Heatpipe)	84,4	
Gehäuse	10,0	
Display (15,4 Zoll)	13,9 ¹⁴⁰	
Netzteil (extern)	4,0	
DVD-Laufwerk	5,8	
Akku	5,5 ¹⁴¹	
Dockingstation	18,6	
Mouse (extern)	1,8	
Tastatur (extern)	3,9	
THG-Potenzial eines Notebooks (mit HDD)		251,7
THG-Potenzial eines Notebooks (mit SSD)		311,1
THG-Potenzial der Herstellung eines Computerarbeitsplatzes mit Notebook (inkl. externer Monitor) über einen Betrachtungszeitraum von 10 Jahren (Tabelle 80)		1152,96

Berechnet man den zusätzlichen Herstellungsaufwand von 88,2 kg CO₂e eines externen Monitors und berücksichtigt man den Betrachtungszeitraum von 10 Jahren, verursacht die Herstellung eines Computerarbeitsplatzes mit Notebook (inkl. externer Monitor) ein THG-Potenzial von 1152,96 kg CO₂e.

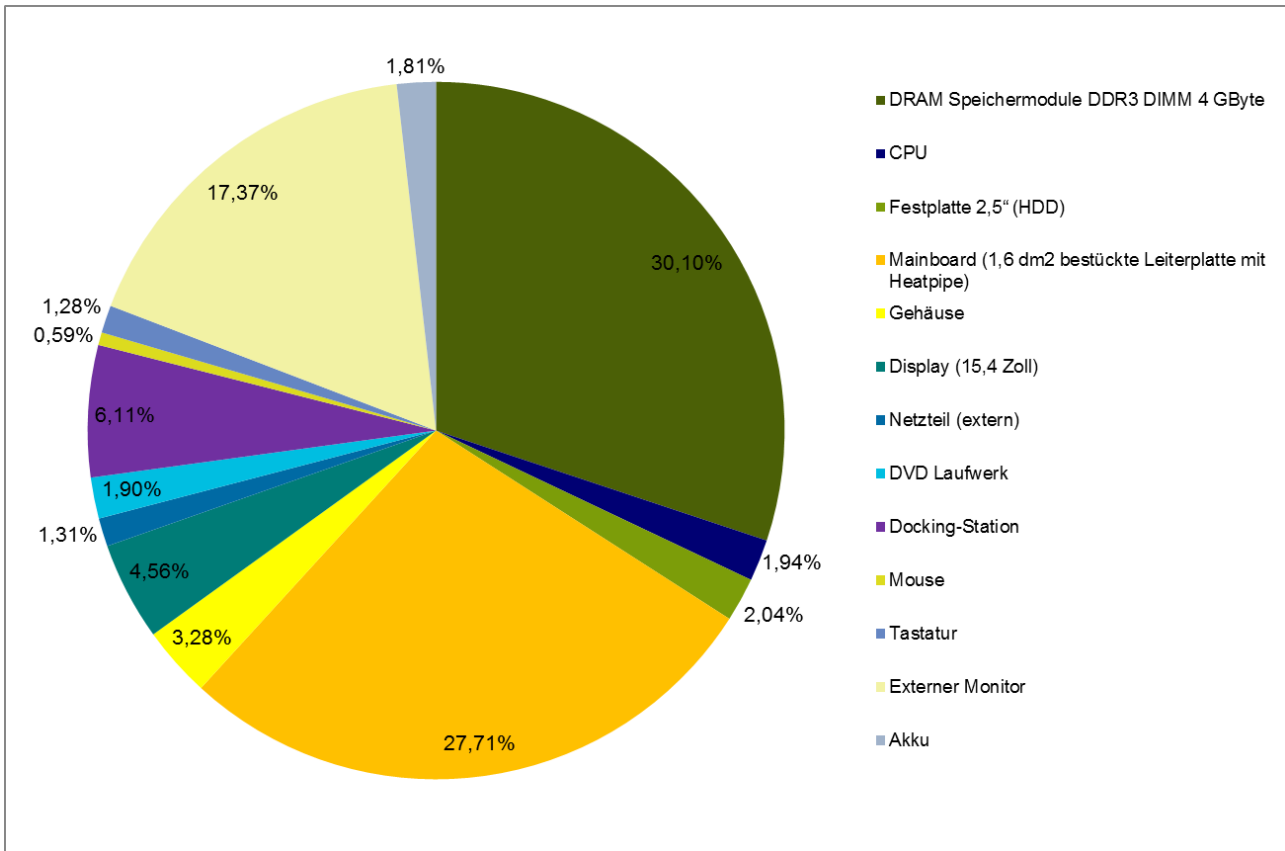
Die folgende Abbildung 28 stellt die prozentualen Anteile einzelner Hardwarekomponenten zu den THG-Beiträgen eines Computerarbeitsplatzes mit Notebook- (mit HDD) grafisch dar.

¹³⁹ HDD wurde im ersten Beschaffungszyklus und SSD ab dem zweiten Beschaffungszyklus eingesetzt. Der große Unterschied in der Treibhausgasbilanz zwischen HDD und SSD ist auf die Unsicherheit beim Skalierungseffekt zurückzuführen. Diese Unsicherheit wurde unter Datenlücken und Unsicherheiten bei der Modellierung der Herstellungsphase auf Seite 164 erläutert.

¹⁴⁰ In Prakash et al. (2012) wurde das Treibhausgaspotenzial der Herstellung eines 15,4 Zoll Bildschirmmoduls mit 35,11 kg CO₂e ermittelt. Der hier berechnete Wert von 13,9 kg CO₂e für die Herstellung eines 15,4 Zoll Bildschirmmoduls ist damit deutlich geringer. Die Abweichung des Treibhausgaspotenzials zwischen den beiden Studien ist voraussichtlich auf die unterschiedliche Versionen der ecoinvent-Datenbank zurückzuführen, die für die Bilanzierung herangezogen wurden. In Prakash et al. (2012) wurde ecoinvent 2.2 und in diesem Vorhaben wird ecoinvent 3.01 für die Bilanzierung verwendet. Eine detaillierte Ursachenforschung in den Datensätzen war im Rahmen dieses Vorhabens nicht möglich.

¹⁴¹ Clemm et al. (2015) haben das Treibhausgaspotenzial der Herstellung eines Notebook-Akkus mit 6,03 kg CO₂e gerechnet.

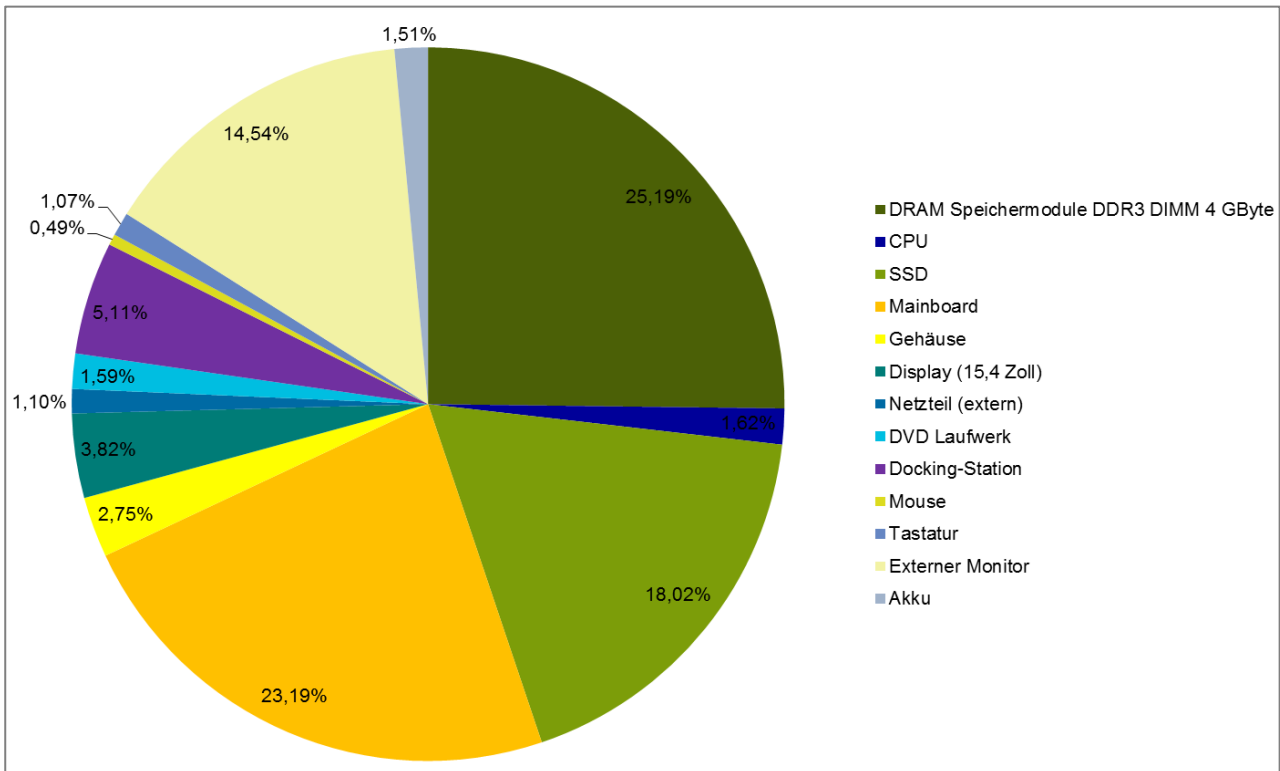
Abbildung 28: Anteil von Hardwarekomponenten am THG-Potenzial der Herstellung eines Computerarbeitsplatzes mit Notebook (mit HDD) (%)



Beim Computerarbeitsplatz mit Notebook-(mit HDD) haben die DRAM-Module den größten Anteil am THG-Potenzial (30%), während das 1,6 dm² große Mainboard mit höherer IC-Dichte und Heatpipe den zweithöchsten Anteil (27%) trägt. Das THG-Potenzial des externen Monitors hat mit rund 17% ebenfalls einen großen Anteil am THG-Potenzial der gesamten Hardware.

In Tabelle 97 wurde gezeigt, dass die Notebooks mit einer SSD statt HDD ein höheres THG-Potenzial in der Herstellung aufweisen. Die Herstellung einer SSD ist mit 65,6 kg CO₂e deutlich aufwändiger als die Herstellung einer HDD. Dementsprechend zeigt die folgende Abbildung 29, dass die Herstellung einer SSD 18% des THG-Potenzials der Herstellung eines Computerarbeitsplatzes mit Notebook ausmacht. Im Gegensatz dazu machte die Herstellung einer HDD lediglich 2,04% des THG-Potenzials der Herstellung eines Computerarbeitsplatzes mit Notebook aus (Abbildung 28). Bei einem Computerarbeitsplatz mit Notebook mit SSD verringern sich die Anteile der DRAM-Module (25%) sowie des Mainboards (23%) am THG-Potenzial im Vergleich zum Computerarbeitsplatz mit Notebook mit HDD.

Abbildung 29: Anteil von Hardwarekomponenten am THG-Potenzial der Herstellung eines Computerarbeitsplatzes mit Notebook (mit SSD) (%)



Treibhausgaspotenzial der Herstellung eines Computerarbeitsplatzes mit Mini-PC

Beim Mini-PC-beträgt das THG-Potenzial der Herstellung 190,5 kg CO₂e mit HDD und 249,9 kg CO₂e mit SSD (Tabelle 98).

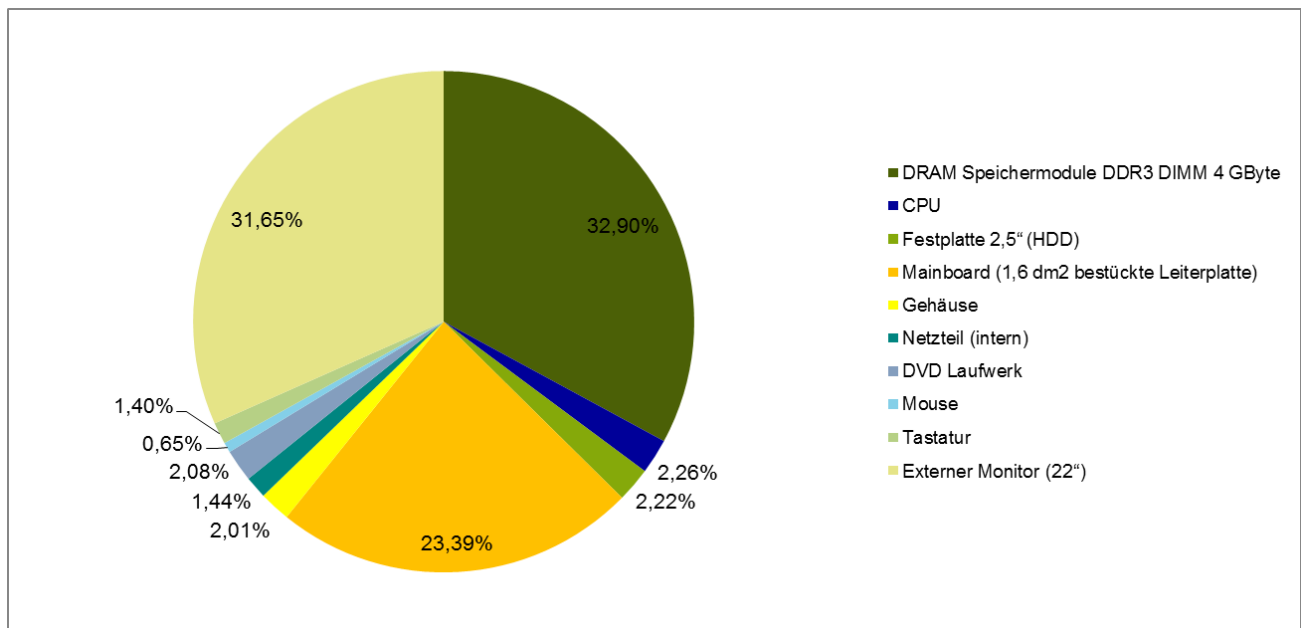
Tabelle 98: Treibhausgaspotenzial (THG100) der Herstellung eines Computerarbeitsplatzes mit Mini-PC

Mini-PC	THG (kg CO ₂ e)	THG-Summe (kg CO ₂ e)
DRAM-Speichermodule DDR3 DIMM 4 GByte	91,7	
CPU	6,3	
Festplatte 2,5" (HDD / SSD)	6,2 / 65,6	
Mainboard (1,6 dm ² bestückte Leiterplatte)	65,2	
Gehäuse	5,6	
Netzteil (intern)	4,0	
DVD Laufwerk	5,8	
Mouse	1,8	
Tastatur	3,9	
THG-Potenzial eines Mini-PC- (mit HDD)		190,5
THG-Potenzial eines Mini-PC- (mit SSD)		249,9
THG-Potenzial der Herstellung eines Computerarbeitsplatzes mit Mini-PC (inkl. externer Monitor) über einen Betrachtungszeitraum von 10 Jahren (Tabelle 80)		616,8

Berechnet man den zusätzlichen Herstellungsaufwand von 88,2 kg CO₂e eines externen Monitors und berücksichtigt man den Betrachtungszeitraum von 10 Jahren, verursacht die Herstellung eines Computerarbeitsplatzes mit Mini-PC (inkl. externer Monitor) ein THG-Potenzial von 616,8 kg CO₂e.

Die folgende Abbildung 30 stellt die prozentualen Anteile einzelner Hardware THG-Beiträge eines Computerarbeitsplatzes mit Mini-PC-(mit HDD) grafisch dar.

Abbildung 30: Anteil von Hardwarekomponenten am THG-Potenzial der Herstellung eines Computerarbeitsplatzes mit Mini-PC (mit HDD) (%)

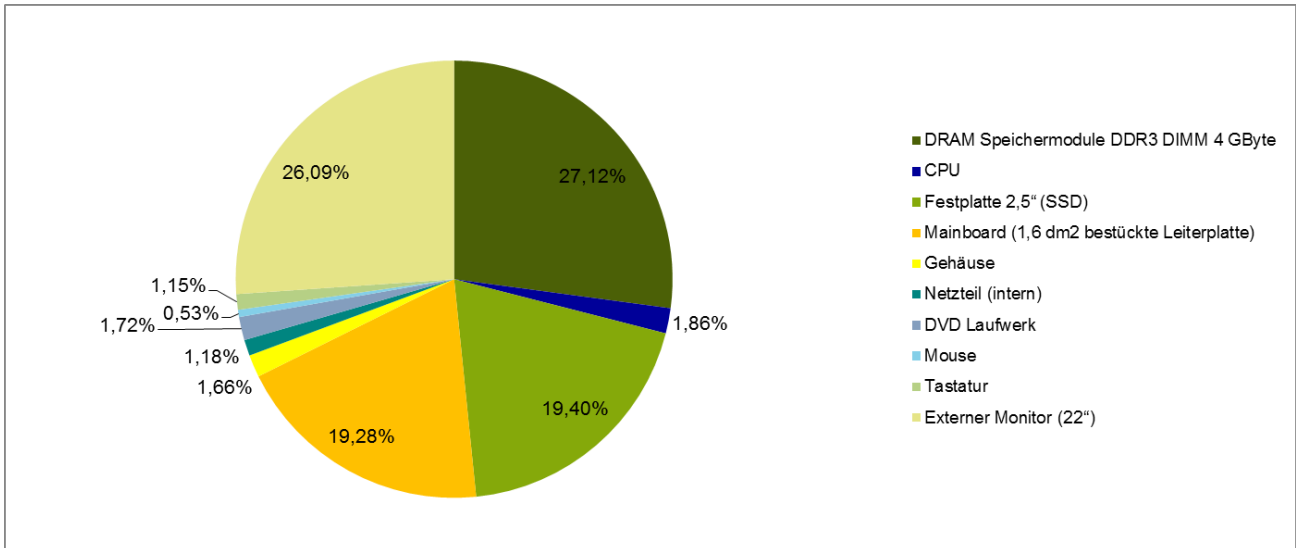


Beim Computerarbeitsplatz mit Mini-PC haben die DRAM-Module den höchsten Anteil (33%) am THG-Potenzial, gefolgt vom Desktop-Monitor (32%) und dem Mainboard (23%). Das Mainboard verursacht allerdings im Vergleich zu dem Mainboards eines Notebooks geringere Emissionen. Die höheren THG-Emissionen eines Notebook-Mainboards sind auf die Magnesiumlegierung im Heatpipe zurückzuführen. Beim Computerarbeitsplatz mit Mini-PC werden ebenso wie beim Computerarbeitsplatz mit Notebook die ökobilanziellen Auswirkungen eines Technologiewechsels deutlich: Der Ersatz einer HDD durch eine SSD im Austauschmodell bewirkt etwa eine Verzehnfachung des THG-Potenzials dieser Hardwarefunktion (nichtflüchtige Datenspeicherung). Die Modellannahme¹⁴² spiegelt jedoch einen real existierenden Trend in der Hardwareausstattung dieser Geräte wider. Die folgende Abbildung 31 zeigt, dass der Herstellungsaufwand von einer SSD 19% des herstellungsbedingten des THG-Potenzials eines Computerarbeitsplatzes mit Mini-PC ausmacht. Im Gegensatz dazu hatte eine HDD nur einen Anteil von 2% am THG-Potenzial der Herstellung eines Computerarbeitsplatzes mit Mini-PC. Demensprechend

¹⁴² In der Logik der Ökobilanz verursacht diese Modellannahme allerdings eine Veränderung des Funktionsumfangs des Nachfolgegeräts mit SSD im Vergleich zum Grundgerät mit HDD (z.B. schnellerer Datenzugriff). Diese Unschärfe in der Auslegung der funktionellen Einheit wird hier in Kauf genommen, um die Vergleichsrechnung nicht unnötig zu verkomplizieren.

verringern sich die Anteile von anderen wichtigen Komponenten, wie DRAM-Module (27%), Mainboard (19%) und Externer Monitor (26%) am THG-Potenzial.

Abbildung 31: Anteil von Hardwarekomponenten am THG-Potenzial der Herstellung eines Computerarbeitsplatzes mit Mini-PC (mit SSD) (%)



Treibhausgaspotenzial der Distributionsphase

Die Distributionsphase hat bei allen drei Arbeitsplatzlösungen einen relativ geringen Anteil am Gesamt-THG-Potenzial im Lebenszyklus der betrachteten Geräte.

Tabelle 99: Treibhausgaspotenzial (THG100) der Distribution (inkl. Peripheriegeräte) in kg CO₂e

	Computerarbeitsplatz mit Desktop-PC	Computerarbeitsplatz mit Notebook*	Computerarbeitsplatz mit Mini-PC
Beschaffung 1	19,8	10,11	13,4
Beschaffung 2	19,8	10,11	13,4
Beschaffung 3	-	10,11	-
Beschaffung 4**	-	3,35	-
Summe (10 Jahre)	39,6	33,69	26,8

* Die Treibhausgasemissionen (THG) wurden aus der Summe der jährlichen THG Anteile pro Beschaffungszyklus ermittelt. Diese jährlichen THG Anteile enthalten auch die THG des Monitors durch Allokation, unabhängig vom Beschaffungszeitpunkt, um den Bezug zur funktionellen Einheit der Ökobilanz zu behalten.

** Vierte Beschaffung des Notebooks wurde nur anteilig angerechnet.

Treibhausgaspotenzial der Nutzungsphase

Während der Nutzungsphase entstehen die Treibhausgasemissionen der einzelnen Arbeitsplatzlösungen ausschließlich in den Vorketten der Stromerzeugung. Bei allen drei Arbeitsplatzlösungen ist das THG-Potenzial in der Nutzungsphase im Gesamtzeitraum von 10 Jahren geringer als in der Herstellungsphase. Die in Tabelle 100 verzeichneten Resultate beziehen sich auf eine jeweils verschiedene Nutzungsdauer von Geräten und lassen sich daher – mit Ausnahme der letzten Zeile, in der die Gesamtemissionen für zehn Jahre angegeben sind – nicht direkt miteinander vergleichen. Zudem wird dem jeweils letzten Ersatzgerät nur ein innerhalb des Betrachtungszeitraums liegender Anteil des Stromverbrauchs zugerechnet (Allokation).

Tabelle 100: Treibhausgaspotenzial (THG100) der Nutzungsphase (inkl. Peripheriegeräte) in kg CO₂e

	Computerarbeitsplatz mit Desktop-PC	Computerarbeitsplatz mit Notebook	Computerarbeitsplatz mit Mini-PC
Beschaffung 1	238,75	68,77	175,18
Beschaffung 2	184,74	61,62	135,53
Beschaffung 3	-	52,09	-
Beschaffung 4*	-	16,34	-
Summe (10 Jahre)	423,29	198,82	310,71

* Allokation für den 4. Beschaffungszeitraum beim Notebook

Treibhausgaspotenzial der Elektroschrottentsorgung ausgemusterter Geräte

Die Recycling- und Entsorgungsprozesse haben nur einen unerheblichen Anteil am Gesamtergebnis des THG-Potenzials der Arbeitsplatzcomputer über den gesamten Betrachtungszeitraum (Tabelle 101). Jedoch ergibt sich durch die Rückführung einer Anzahl der Sekundärmaterialien ein nennenswertes Substitutionspotenzial für Primärrohstoffe. Diese Substitution bewirkt neben ökonomischen Vorteilen auch eine Einsparung im THG-Potenzial nachfolgender Wertschöpfungszyklen. Diese THG-Einsparung wird in der Ökobilanz entsprechend einer 50/50 Allokationsregel dem hier betrachteten Produktsystem gutgeschrieben (s. Abschnitt 5.7.4 und Tabelle 102).

Tabelle 101: Treibhausgaspotenzial (THG100) der Entsorgung (inkl. Peripheriegeräte) in kg CO₂e

	Computerarbeitsplatz mit Desktop-PC	Computerarbeitsplatz mit Notebook	Computerarbeitsplatz mit Mini-PC
Beschaffung 1	4,8	2,4	2,4
Beschaffung 2	4,8	2,4	2,4
Beschaffung 3	-	2,4	-
Beschaffung 4*	-	0,8	-
Summe (10 Jahre)	9,6	8,07	4,8

* Allokation für den 4. Beschaffungszeitraum beim Notebook

Tabelle 102: Recyclinggutschriften in kg CO₂e

	Computerarbeitsplatz mit Desktop-PC	Computerarbeitsplatz mit Notebook	Computerarbeitsplatz mit Mini-PC
Stahl	13,6	6,2	6,3
Aluminium	7,5	7,9	4,0
Kupfer	1,1	1,4	0,3
Kobalt	-	0,9	-
Gold	4,0	3,3	2,7
Platingruppenmetalle	0,9	1,8	1,6
Silber	0,2	0,1	0,0
Summe	27,0	22,0	15,0

5.8.3 Diskussion der Ergebnisse

Die Ökobilanzergebnisse verdeutlichen die hohe Relevanz der Umweltauswirkungen durch die Herstellung der Computerhardware. Obwohl der Fokus der Ökobilanzberechnungen auf die Wirkungskategorie THG-Potenzial gelegt wurde, konnten weitere im Rahmen dieses Vorhabens durchgeführte Berechnungen gleiche Trends für andere Umweltwirkungskategorien zeigen. Das gilt für das Versauerungspotenzial, Eutrophierungspotenzial, Potenzial zur Schädigung der Ozonschicht und fossiler Ressourcenverbrauch. Aus diesem Grund kann das THG-Potenzial für den Untersuchungsgegenstand als guter Indikator für andere Umweltwirkungskategorien bezeichnet werden.

Die größten Beiträge zu den Treibhausgasemissionen liefern die aktiven Halbleiterteilbauelemente, insbesondere die DRAM-Speicherchips, SSD-Speichermedien sowie der Prozessor. Ebenfalls einen relevanten Beitrag liefert die Herstellung des externen Monitors mit 88 kg CO₂e. Davon entfallen 34% auf die Herstellung des TFT-Displays und 34% die Herstellung der bestückten Leiterplatte (inklusive Elektronikkomponenten). Weitere Anteile entfallen auf die Gehäusekomponenten (Stahl: 12%; Kunststoffteile: 14%; Aluminium: 6%). Erwartungsgemäß hat das Motherboard einen hohen Anteil am Gesamttreibhausgaspotenzial der Arbeitsplatzcomputer.

Infolge der hohen Umweltrelevanz der Hardwareherstellung wirkt sich die Nutzungsdauer der Geräte deutlich auf die gesamten Umweltauswirkungen im Betrachtungszeitraum aus. Dabei gilt die Regel: je kürzer die Nutzungsdauer der Geräte, desto mehr Hardware muss in einem gegebenen Zeitraum hergestellt werden. Ein häufiger Austausch der Hardware vergrößert also die Umweltauswirkungen auch dann, wenn die neuen Gerätegenerationen infolge technischer Verbesserungen energieeffizienter in der Nutzung sind.

Diese Regel bestätigt sich besonders deutlich beim Vergleich des Computerarbeitsplatzes mit Notebook mit dem Computerarbeitsplatz mit Desktop-PC-. Infolge der kürzeren angenommenen Nutzungsdauer des Notebooks wird im Modell ein Notebook häufiger ersetzt als der Desktop-PC. Dadurch fallen die in Abbildung 25 dargestellten Anteile der Herstellungsphase am gesamten Treibhausgaspotenzial über den gesamten Betrachtungszeitraum viel stärker ins Gewicht.

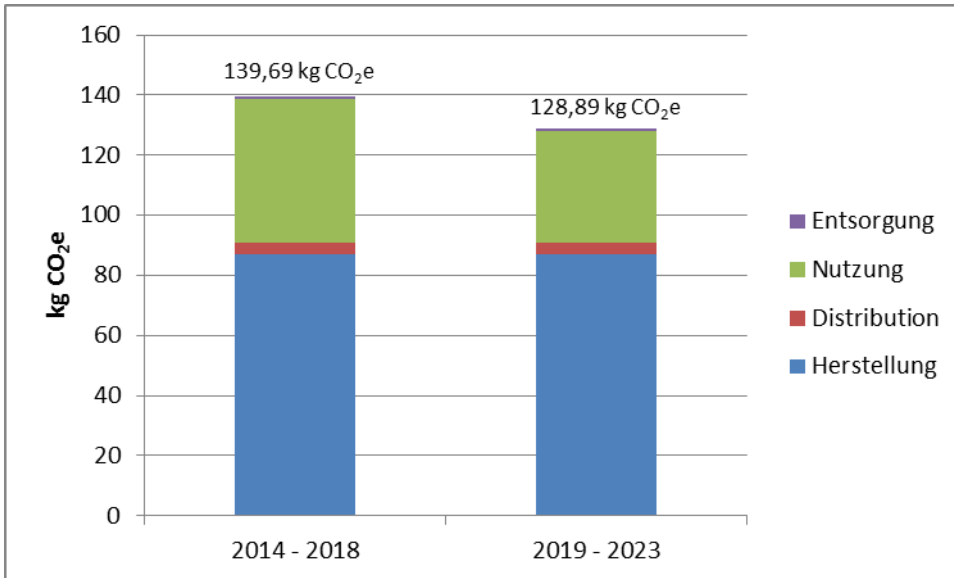
Die folgenden Abbildungen (Abbildung 32, Abbildung 33 und Abbildung 34) stellen die Anteile der einzelnen Beschaffungszyklen am THG-Potenzial der jeweiligen Arbeitsplatzlösungen grafisch dar. Die Darstellung der Diagramme entspricht dem Anteil eines Jahres¹⁴³ innerhalb der Nutzungsdauer der jeweiligen Geräte.

Der Betrieb eines Computerarbeitsplatzes mit Desktop-PC hat (inkl. Herstellung, Distribution, Nutzung, Entsorgung) im gesamten Betrachtungszeitraum von 10 Jahren ein THG-Potenzial von 1.343 kg CO₂e. Abbildung 32 zeigt, wie sich die jährlichen THG-Potenziale in den beiden Beschaffungszyklen zusammensetzen. Die Balken im Diagramm zeigen jeweils den Anteil eines Jahres während der Nutzungsdauer des Grundgeräts. Infolge der verbesserten Energieeffizienz hat das Zweitgerät ein geringeres THG-Potenzial in der Nutzung, während die Herstellung,

¹⁴³ Vergl. Definition der Funktionellen Einheit (Kapitel 5.4)

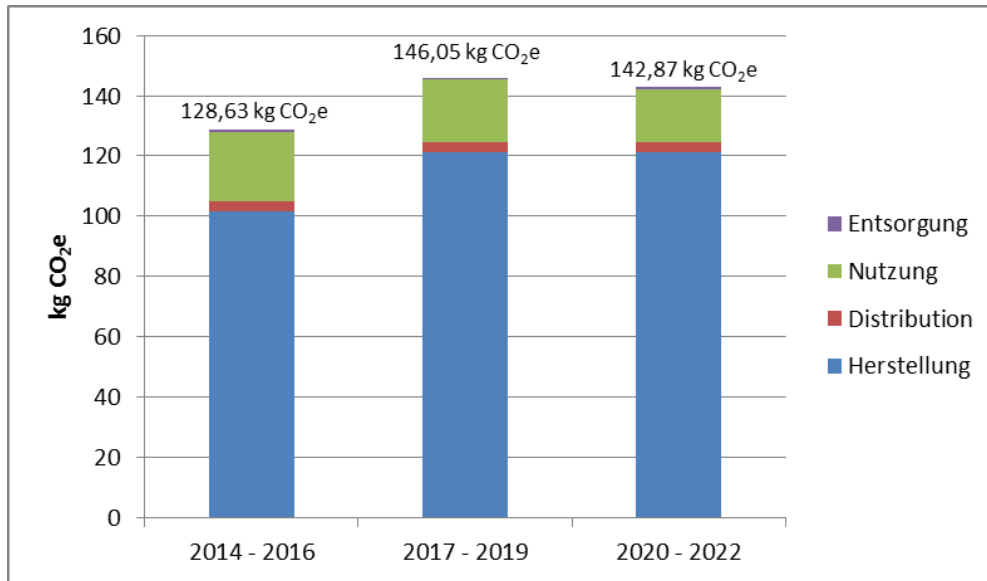
Distribution und Entsorgung unverändert bleiben (gleiche Hardwareausstattung und gleiche Nutzungsdauer wie beim Erstgerät).

Abbildung 32: Treibhausgaspotenzial (THG100) eines Computerarbeitsplatzes mit Desktop-PC (anteilig per Kalenderjahr)



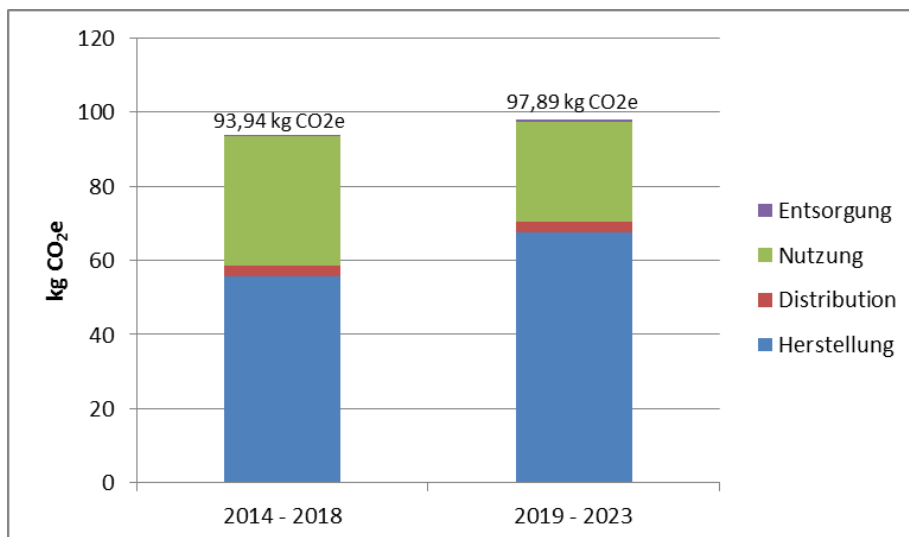
Beim Computerarbeitsplatz mit Notebook liegt das gesamte THG-Potenzial im Zehnjahreszeitraum mit 1.394 kg CO₂e etwas höher als beim Computerarbeitsplatz mit Desktop-PC. Der Einsatz des Notebooks führt damit trotz seiner besseren Energieeffizienz nicht zu einer Entlastung der Umweltauswirkungen. Dies ist eine Folge der angenommenen kürzeren Nutzungsdauer von 3 Jahren sowie des Wechsels von HDD auf SSD ab der zweiten Beschaffung (Abbildung 33). Ab der zweiten Beschaffung hat ein Computerarbeitsplatz mit Notebooks aufgrund der kürzeren Nutzungsdauer von nur 3 Jahren und dem Einsatz von SSD eine höhere jährliche Treibhausgasemissionen als ein Computerarbeitsplatz mit Desktop-PC. Die vierte Beschaffung wird in Abbildung 33 nicht dargestellt, denn sie wäre nur zu einem Drittel angerechnet.

Abbildung 33: Treibhausgaspotenzial (THG100) eines Computerarbeitsplatzes mit Notebook (anteilig per Kalenderjahr)¹⁴⁴



Der Computerarbeitsplatz mit Mini-PC weist im Gesamtzeitraum von 10 Jahren ein THG-Potenzial von 959 kg CO₂e auf. Damit stellt der Computerarbeitsplatz mit Mini-PC die ökologisch günstigste Variante der drei Arbeitsplatzlösungen dar. Innerhalb des gesamten Betrachtungszeitraums von 10 Jahren sind im Modell zwei Beschaffungen angenommen worden. Ähnlich wie beim Computerarbeitsplatz mit Desktop-PC hat das Zweitgerät infolge der verbesserten Energieeffizienz geringere Treibhausgasemissionen in der Nutzung. Allerdings wirkt der Einsatz von SSD statt HDD insgesamt negativ auf die Umweltbilanz aus. Daher ist das THG-Potenzial der zweiten Beschaffung höher als bei der ersten Beschaffung.

Abbildung 34: Treibhausgaspotenzial (THG100) eines Computerarbeitsplatzes mit Mini-PC (anteilig per Kalenderjahr)



¹⁴⁴ Die Treibhausgasemissionen wurden aus der Summe der jährlichen Anteile des Betrachtungszeitraums ermittelt. Diese jährlichen Anteile enthalten auch den Anteil des Monitors durch Allokation, unabhängig vom Beschaffungszeitpunkt, um den Bezug zur funktionellen Einheit der Ökobilanz zu behalten.

5.9 Ökonomische Vergleichsrechnungen

Datengrundlage

Die Lebenszykluskostenrechnung (englisch: life cycle costing, LCC) erfasst und bewertet alle Kosten, die mit einem bestimmten Produkt über den gesamten Lebensweg verbunden sind und die durch Akteure im Lebenszyklus dieses Produkts getragen werden (vgl. Griebhammer et al. 2004 und 2007; Hunkeler et al. 2008). Ein wichtiges Grundprinzip ist die Berücksichtigung des gesamten (physikalischen) Lebenszyklus des betrachteten Produkts (d.h. in der Regel einer Produkteinheit), der im Wesentlichen die Phasen Herstellung, Nutzung, Entsorgung und ggf. Transporte umfasst. Bei der Kostenrechnung werden entsprechend Kosten der Herstellung bzw. der Anschaffung, des Vertriebs und/oder der Beschaffung, der Nutzung, der Entsorgung und ggf. weiterer Transporte berücksichtigt (Rüdenauer 2011).

Lebenszykluskosten müssen akteurspezifisch berechnet werden, es werden also beispielsweise alle Kosten erfasst, die für den Produzenten oder für den Konsumenten bzw. Nutzer des Produkts relevant sind. Wesentlich bei der Durchführung von Lebenszykluskostenrechnungen ist – wie bei Ökobilanzen – die Orientierung am zu erfüllenden Nutzen, der eindeutig festgelegt werden muss und der mithilfe der funktionellen Einheit quantifiziert wird (vgl. auch die Normen zur Ökobilanz: DIN EN ISO 14040:2006 und DIN EN ISO 14044:2006). Die funktionelle Einheit dient als Bezugspunkt für alle Berechnungen und Ergebnisse (Rüdenauer 2011).

In der Literatur wird zwischen drei Haupttypen von Lebenszykluskosten unterschieden: (1) Conventional LCC, (2) Environmental LCC, (3) Societal LCC (UNEP/ SETAC 2011). Ein wesentliches Unterscheidungsmerkmal dieser Grundtypen ist der Einbezug externer Effekte (z.B. gesellschaftliche Kosten der Stromproduktion). Bei der Conventional LCC werden keine externen Kosten einbezogen. Bei der Environmental LCC werden solche (noch) externen Kosten einbezogen, deren Internalisierung im entscheidungsrelevanten Zeitraum erwartet wird. Bei der Societal LCC werden schließlich alle externen Effekte und die damit zusammenhängenden Kosten berücksichtigt, auch wenn diese schwierig monetarisierbar sind und ggf. qualitativ einbezogen werden müssen (Rüdenauer 2011).

Die in der vorliegenden Studie verwendete Lebenszykluskostenrechnung kann methodisch zwischen der Conventional und Environmental LCC zugeordnet werden.

Die in der vorliegenden Studie verwendeten Kostenelemente einer Lebenszykluskostenrechnung werden folgendermaßen dargestellt (Tabelle 103):

Tabelle 103: Lebenszykluskosten aus der Sicht eines Konsumenten

Akteur	Lebenszykluskosten		
	Anschaffung	Nutzung	Entsorgung
Bundesverwaltung	Kaufpreis ggf. Lieferung / Installation	Betriebskosten <ul style="list-style-type: none"> • Stromkosten • Wasserkosten • etc. Folgekosten (nur bei der Sensitivitätsanalyse unter 5.10.2) <ul style="list-style-type: none"> • Wartung • Reparaturen 	Sammlung Recycling

Die Berechnung der Lebenszykluskosten erfolgt nach einem dynamischen Verfahren. Das bedeutet, dass der zeitliche Anfall von Einnahmen und Ausgaben berücksichtigt wird¹⁴⁵ und alle Geldflüsse¹⁴⁶ während der gesamten Nutzungsdauer erfasst werden. Die zu unterschiedlichen Zeitpunkten anfallenden Geldflüsse werden mit Hilfe eines bestimmten Zinsfaktors (Diskontsatz) auf einen einheitlichen Vergleichszeitpunkt ab oder aufgezinst (diskontiert). Für die Beschaffung bedeutet dies, dass der Wert aller Kosten zum Investitionszeitpunkt t_0 bestimmt wird und alle zukünftigen Geldflüsse wie beispielsweise Stromkosten dann auf den sogenannten Barwert¹⁴⁷ abgezinst werden. Hierdurch wird berücksichtigt, dass das nicht verwendete Geld, falls die Anschaffung zum Zeitpunkt t_0 nicht getätigt würde, verzinst angelegt werden könnte (Gröger et al. 2015).

Der Barwert rechnet Kosten, die zu unterschiedlichen Zeitpunkten anfallen, auf einen bestimmten Zeitpunkt um, indem er den Zeitwert des Geldes berücksichtigt. Dies erfolgt durch die Diskontierung/Abzinsung der zukünftigen Kosten. Gewöhnlich werden alle Kosten auf den aktuellen Zeitpunkt, meist den Zeitpunkt des Beschaffungsvorgangs t_0 , bezogen. Mit Hilfe dieser Methode kann berechnet werden, wie hoch die Zahlungen über die gesamte Nutzungsdauer einer Beschaffungsvariante sind. Die Investitionskosten müssen nicht diskontiert werden, da sie sofort – also zum Zeitpunkt t_0 – anfallen. Die Berechnung der Barwerte erfolgt für jedes Jahr, indem ein Produkt genutzt oder eine Dienstleistung in Anspruch genommen wird. Dafür werden alle Kosten, die in einem Jahr anfallen, durch Multiplikation mit dem Barwertfaktor¹⁴⁸ auf den heutigen Barwert umgerechnet. Die Summe aller jährlichen Barwerte entspricht dann den Lebenszykluskosten (Gröger et al. 2015).

Durch die Diskontierung der zukünftigen Kosten wird im Rahmen der Lebenszykluskostenrechnung dem Umstand Rechnung getragen, dass zu Beginn einer Beschaffung eventuell höhere Kosten anfallen können. Dies ist insbesondere bei der Beschaffung von umweltverträglichen Produkten und Dienstleistungen der Fall, die oft höhere Anschaffungskosten haben, im Gegenzug aber geringere Betriebskosten aufweisen. Bei gegebenem Jahresbudget kann dies bei den Beschaffungsstellen gegebenenfalls zu Liquiditätsengpässen führen, da das zusätzlich benötigte Kapital vom Kapitalmarkt aufgenommen werden muss. Durch die dynamische Lebenszykluskostenrechnung wird der hierfür aufzubringende Zins und Zinseszins mitberücksichtigt. Die Ergebnisse der Lebenszykluskostenrechnung sind somit trotz einer eventuell notwendigen Kreditaufnahme gültig (Gröger et al. 2015).

Tabelle 104 fasst die Kostenelemente, die zur Berechnung der Lebenszykluskosten der untersuchten Arbeitsplatzcomputerlösungen herangezogen wurden, zusammen:

¹⁴⁵ Bei statischen Verfahren hingegen wird der zeitliche Anfall von Einnahmen und Ausgaben nicht berücksichtigt, d. h. unabhängig vom Zeitpunkt, wann bestimmte Ausgaben, beispielsweise Energiekosten, anfallen, gehen diese ohne Umrechnung in das Ergebnis ein. Gegenüber der Realität ist dies eine wesentliche Vereinfachung, da aufgrund von Zinseffekten der zeitliche Anfall durchaus einen finanziellen Unterschied machen kann.

¹⁴⁶ Unter Geldflüssen werden hier Einnahmen und Ausgaben verstanden. In der Regel werden bei Lebenszykluskostenrechnungen innerhalb des Beschaffungswesens und hierzu anwendbaren Rechentools nur Ausgaben berücksichtigt.

¹⁴⁷ Der Barwert ist der Wert einer Zahlung in der Zukunft bezogen auf den heutigen Zeitpunkt. Er wird durch Abzinsung der zukünftigen Zahlungen und anschließendes Summieren ermittelt.

¹⁴⁸ Der Barwertfaktor ist $1/(1+i)^n$, i =Diskontsatz, n =Periode, in der die Kosten anfallen

Tabelle 104: Kostenelemente zur Ermittlung der Lebenszykluskosten für die untersuchten Arbeitsplatzlösungen

Kostenelemente	Wert	Einheit	Quelle / Annahme
Nominale Preissteigerungsrate Energie (Strom, Gas u.a. Brennstoffe)	6,47	%/ Jahr	Statistisches Bundesamt, Fachserie 17 Reihe 7, Verbraucherpreisindizes für Deutschland, Mai 2014, Sondergliederung, Durchschnitt 2011-2013
Diskontsatz/Kalkulationszinssatz	1,7	%/ Jahr	Durchschnittszinssatz Bundesfinanzministerium "Personal- und Sachkosten für Kostenberechnungen/Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen (PKS)"
Reale Preissteigerungsrate Energie (Strom, Gas u.a. Brennstoffe)	4,69	%/ Jahr	Berechnet aus der nominalen Preissteigerungsrate Energie und dem Diskontsatz/ Kalkulationszinssatz ¹⁴⁹
Strompreis (Gewerbe, Niederspannung)	0,2015	€/kWh	Quelle: Verivox Dezember 2014: Durchschnittspreis ohne MWSt. (Grundpreis+Arbeitspreis) der 20 günstigsten Anbieter im 1. Jahr Suchmaske: Niederspannungsebene (< 50.000 kWh), Gewerbe: Büro werktags 8-18 Uhr, PLZ 10115, Verbrauch 100.000 kWh/Jahr
Kaufpreis ¹⁵⁰ Desktop-PC	312,49	€ (Brutto)	Expertenbefragung im Rahmen dieses Vorhabens
Kaufpreis Notebook	431,16 ¹⁵¹	€ (Brutto)	Expertenbefragung im Rahmen dieses Vorhabens
Kaufpreis Mini-PC	324,87	€ (Brutto)	Expertenbefragung im Rahmen dieses Vorhabens
Kaufpreis Monitor	189,31	€ (Brutto)	Expertenbefragung im Rahmen dieses Vorhabens
Kaufpreis HDD/ SSD ¹⁵² (Notebook)	89,25	€ (Brutto)	www.ideal.de
Kaufpreis Arbeitsspeicher (Notebook)	60,00	€ (Brutto)	www.ideal.de
Kaufpreis Akku (Notebook)	74,97	€ (Brutto)	www.ideal.de

Die zugrunde gelegten Bilanzierungsszenarien sowie angenommenen Stromverbräuche sind unter 5.7 beschrieben. Informationen über die Entsorgungskosten lagen nicht vor und konnten nicht berücksichtigt werden.

Ergebnisse und Auswertung

Zur Berechnung der Lebenszykluskosten wurden die Daten aus der Tabelle 104 in das LCC Excel-Tool des Öko-Instituts eingetragen.

Abbildung 35 stellt das Ergebnis der Berechnung der Lebenszykluskosten für die untersuchten Arbeitsplatzlösungen über einen Betrachtungszeitraum von 10 Jahren dar. Demnach hat der Arbeitsplatzcomputer mit Notebook die höchsten Kosten, was auf die mehrfache Anschaffung von Notebooks aufgrund seiner kürzeren Nutzungsdauer zurückzuführen ist. Zusätzlich hat ein Notebook einen höheren Kaufpreis als ein Mini-PC und ein Desktop-PC. Im Vergleich zu einem Computerarbeitsplatz mit Mini-PC verursacht ein Computerarbeitsplatz mit Notebook ca. 744 €

¹⁴⁹ Die nominale Preissteigerungsrate und der Diskontsatz werden zur Ermittlung der realen Energiekosten in der Zukunft herangezogen.

¹⁵⁰ Die Anschaffungskosten von Endgeräten, wie Desktop-PCs und Notebooks, sind mit konstanten Kosten gerechnet worden. Denn die allgemeine Preissteigerungsrate von Endgeräten ist in der Regel aufgrund des zugrunde liegenden Diskontsatzes zu vernachlässigen.

¹⁵¹ Der Preis enthält Docking-Station, Computermaus und Tastatur.

¹⁵² Die Ersatzteilkosten sind nur in der Sensitivitätsanalyse (5.10.2) berücksichtigt worden. Die Kosten für den Service-Techniker lagen nicht vor und konnten deshalb nicht berücksichtigt werden.

Mehrkosten in 10 Jahren. Der Computerarbeitsplatz mit Mini-PC hat geringste Lebenszykluskosten unter den drei untersuchten Arbeitsplatzlösungen. Dieser hat marginale geringere Lebenszykluskosten als ein Arbeitsplatz mit Desktop-PC, denn ein Computerarbeitsplatz mit Mini-PC verfügt über energiesparsamere Komponenten, verbraucht in der Nutzung weniger Strom und verursacht somit geringere Stromkosten. Allerdings ist der angenommene Kaufpreis in diesem Fall entscheidend. Würde der Kaufpreis eines Mini-PCs höher, würde diese Variante höhere Lebenszykluskosten aufweisen als der Computerarbeitsplatz mit Desktop-PC.

Abbildung 35: Lebenszykluskosten für untersuchte Arbeitsplatzlösungen über 10 Jahre

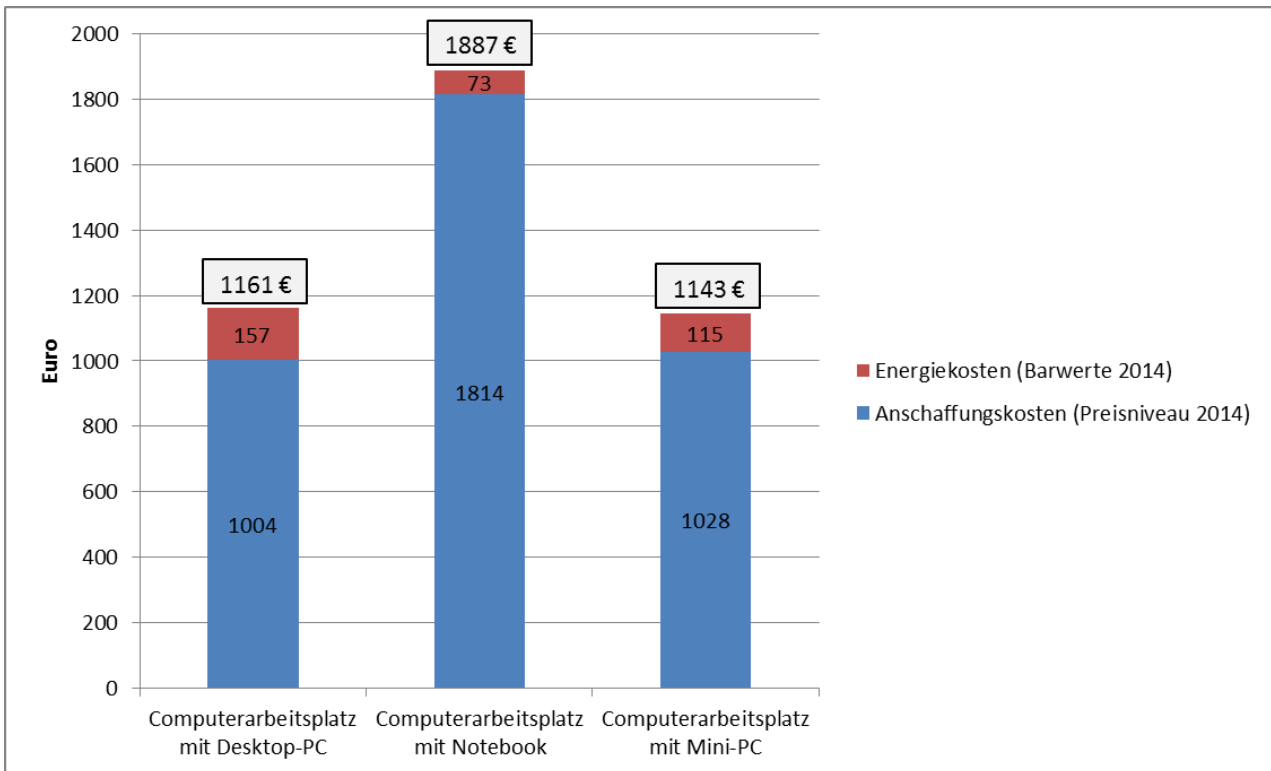
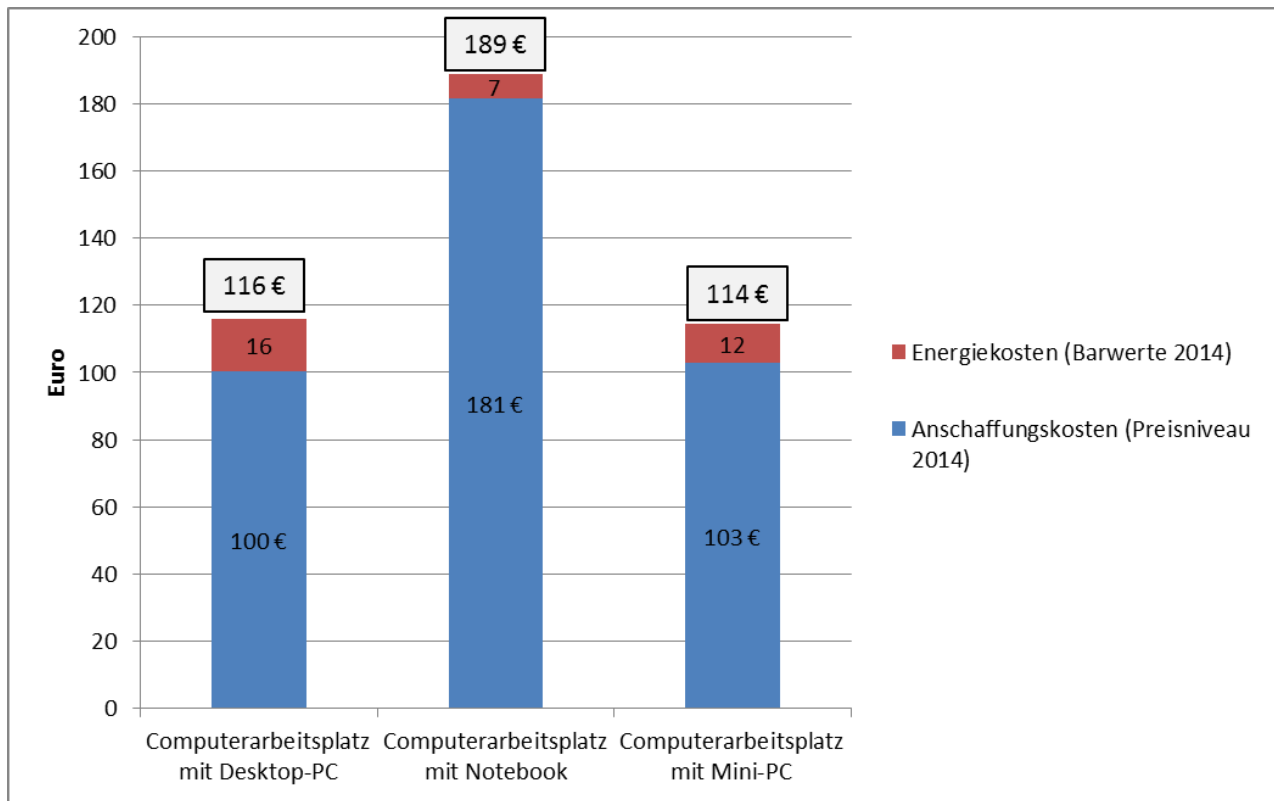


Abbildung 36 zeigt die jährlichen Gesamtkosten für untersuchte Arbeitsplatzlösungen. Die jährlichen Gesamtkosten setzen sich aus den anteiligen Anschaffungskosten und sonstigen Betriebs- und Folgekosten zusammen.

Abbildung 36: Jährliche Gesamtkosten für untersuchte Arbeitsplatzlösungen (Werte gerundet)



Die jährlichen Gesamtkosten eines Arbeitsplatzcomputers mit Mini-PC sind am geringsten und die des Arbeitsplatzcomputers mit Notebook am höchsten.

5.10 Sensitivitätsanalysen

5.10.1 Sensitivitätsanalyse 1: Auswirkungen unterschiedlicher Anteile der drei Arbeitsplatzlösungen auf den Energieverbrauch in der Nutzungsphase sowie auf die jährlichen Gesamtkosten und die jährlichen lebenszyklusbezogenen Treibhausgasemissionen¹⁵³

In dieser Sensitivitätsanalyse wird gezeigt, wie der Gesamtenergieverbrauch sowie die jährlichen Gesamtkosten und die jährlichen lebenszyklusbezogenen Treibhausgasemissionen der Arbeitsplatzcomputer in der öffentlichen Bundesverwaltung mit unterschiedlichen Anteilen der Arbeitsplatzcomputer zusammenhängen. Dafür werden die in Tabelle 105 angenommene Anteile der Arbeitsplatzcomputer für die Berechnung des jährlichen Energieverbrauchs in der Nutzungsphase sowie der jährlichen Gesamtkosten und der jährlichen lebenszyklusbezogenen Treibhausgasemissionen zugrunde gelegt¹⁵⁴.

¹⁵³ Jährliche Gesamtkosten setzen sich zusammen aus den anteiligen Investitionskosten und jährlichen Kosten für Energie und Entsorgung.

¹⁵⁴ Im Jahr 2014 gab es in der Bundesverwaltung insgesamt 548.501 Computerarbeitsplätze (laut Informationen des Umweltbundesamtes).

Tabelle 105: Angenommene Anteile von Arbeitsplatzcomputern in der öffentlichen Bundesverwaltung und entsprechender Energieverbrauch in der Nutzungsphase sowie jährliche Gesamtkosten

	Desktop-PC	Notebook	Mini-PC	Jährlicher Energieverbrauch in der Nutzungsphase in der Bundesverwaltung (GWh/Jahr)	Jährliche Gesamtkosten in der Bundesverwaltung (Mio. €)	Jährliche Treibhausgasemissionen des gesamten Lebenszyklus (t CO ₂ e/Jahr)
Szenario 1	90%	10%	0%	33,08 GWh/Jahr	67,65 Mio. €	73.935,56 t CO ₂ e/Jahr
Szenario 2	0%	10%	90%	24,70 GWh/Jahr	66,79 Mio. €	54.990,22 t CO ₂ e/Jahr
Szenario 3	25%	50%	25%	23,34 GWh/Jahr	83,36 Mio. €	69.785,33 t CO ₂ e/Jahr
Szenario 4	33%	33%	34%	25,65 GWh/Jahr	76,49 Mio. €	67.418,04 t CO ₂ e/Jahr

Aus Tabelle 105 wird deutlich, dass der Energieverbrauch in der Nutzung am geringsten ist, wenn Notebooks ca. 50% und Mini-PCs 25% des Gesamt-PC-Bestandes ausmachen (Szenario 3). Betrachtet man die Lebenszykluskosten, also die Investitionskosten und Kosten, die während der Nutzung anfallen, ist dies jedoch die Variante, bei denen die jährlichen Gesamtkosten am höchsten sind. Was die jährlichen lebenszyklusbezogenen Treibhausgasemissionen angeht, sind sie im Szenario 1 am höchsten. Hier tragen die Herstellung und die Nutzung von Desktop-PCs maßgeblich zu Treibhausgasemissionen bei. Dagegen zeigt Tabelle 105, dass die wirtschaftlichste Variante mit einem hohen Anteil von Mini-PCs (90%) und einem geringen Anteil von Notebooks (10%) zu erreichen ist (Szenario 2). Das ist auch die Variante, in der die jährlichen lebenszyklusbezogenen Treibhausgasemissionen am geringsten sind. Im Grunde kann festgehalten werden: je höher der Anteil der Notebooks in der Bundesverwaltung, umso höher sind die Lebenszykluskosten, und je höher der Anteil der Mini-PCs, umso geringer die Treibhausgasemissionen.

Aus diesem Grund ist empfehlenswert, stationäre Arbeitsplätze nicht mit Notebooks, sondern mit Mini-PCs auszustatten. Derzeit sind in der Bundesverwaltung rund 90% aller Computerarbeitsplätze mit Desktop-PCs ausgestattet, der Rest mit Notebooks (Szenario 1). Würden in der Bundesverwaltung statt Desktop-PCs Mini-PCs zu Einsatz kommen (Szenario 2), ließen sich jährlich ca. 8,37 GWh, 18.945 t CO₂e und Kosten von ca. 0,85 Millionen Euro einsparen. Würde hingegen Szenario 3 mit einem Anteil von 50% Notebooks umgesetzt, so wären die jährlichen Kosten 16,56 Millionen Euro höher als in Szenario 2. Realistischer ist evtl. der Vergleich zwischen Szenarien 3 und 4. Im Szenario 4 (Anteil Notebooks 33%) lassen sich im Vergleich zum Szenario 3 (Anteil Notebooks 50%) jährlich ca. 6,86 Millionen Euro einsparen. Allerdings liegt der jährliche Energieverbrauch (nur Nutzungsphase) des Szenarios 4 ca. 2,31 GWh höher als im Szenario 3. Berücksichtigt man aber die jährlichen lebenszyklusbezogenen Treibhausgasemissionen, ist Szenario 4 insgesamt klimafreundlicher.

Für die untersuchten Varianten der Arbeitsplatzcomputer ist aus Sicht des Klimaschutzes sowie der Wirtschaftlichkeit Szenario 2 die beste Lösung.

5.10.2 Sensitivitätsanalyse 2: Verlängerung der Nutzungsdauer von Notebooks auf 6 Jahre

Die Ergebnisse der Ökobilanz und Lebenszykluskostenrechnung identifizieren die Verkürzung der Nutzungsdauer der Computerhardware, insbesondere bei Notebooks, als wichtigen Einflussfaktor auf die Umweltauswirkungen und Gesamtkosten der Arbeitsplatzlösungen.

Eine Möglichkeit zur Verringerung der Umweltwirkungen sowie der Gesamtkosten wäre die Beschaffung von Notebookmodellen mit möglichst langer Lebensdauer bzw. die Nutzung von Notebooks über längere Zeiträume. Aspekte, wie die einfache Aufrüstbarkeit sowie Möglichkeit zur Reparatur nach einigen Jahren Benutzung, sollten deswegen schon bei der Beschaffung der Geräte berücksichtigt werden.

Diese Sensitivitätsanalyse testet den Einfluss einer Verlängerung der Nutzungsdauer bei Notebooks von 3 Jahren (Basisszenario) auf 6 Jahre. Im Ökobilanz- sowie im Lebenszyklusmodell geschieht die Nutzungsdauerverlängerung durch eine Aufrüstung des Arbeitsspeichers von 4 auf 8 GByte, den Ersatz der originalen HDD mit SSD sowie Austausch des Akkus.

Die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse werden in Abbildung 37 und Tabelle 106 sowie Abbildung 38 dargestellt.

Abbildung 37: Sensitivitätsanalyse: THG-Potenzial (kg CO₂e) Computerarbeitsplatz mit Notebook: Vergleich Baseline (Nutzungsdauer 3 Jahre) vs. Sensitivität (Nutzungsdauer 6 Jahre); ohne Recyclinggutschriften

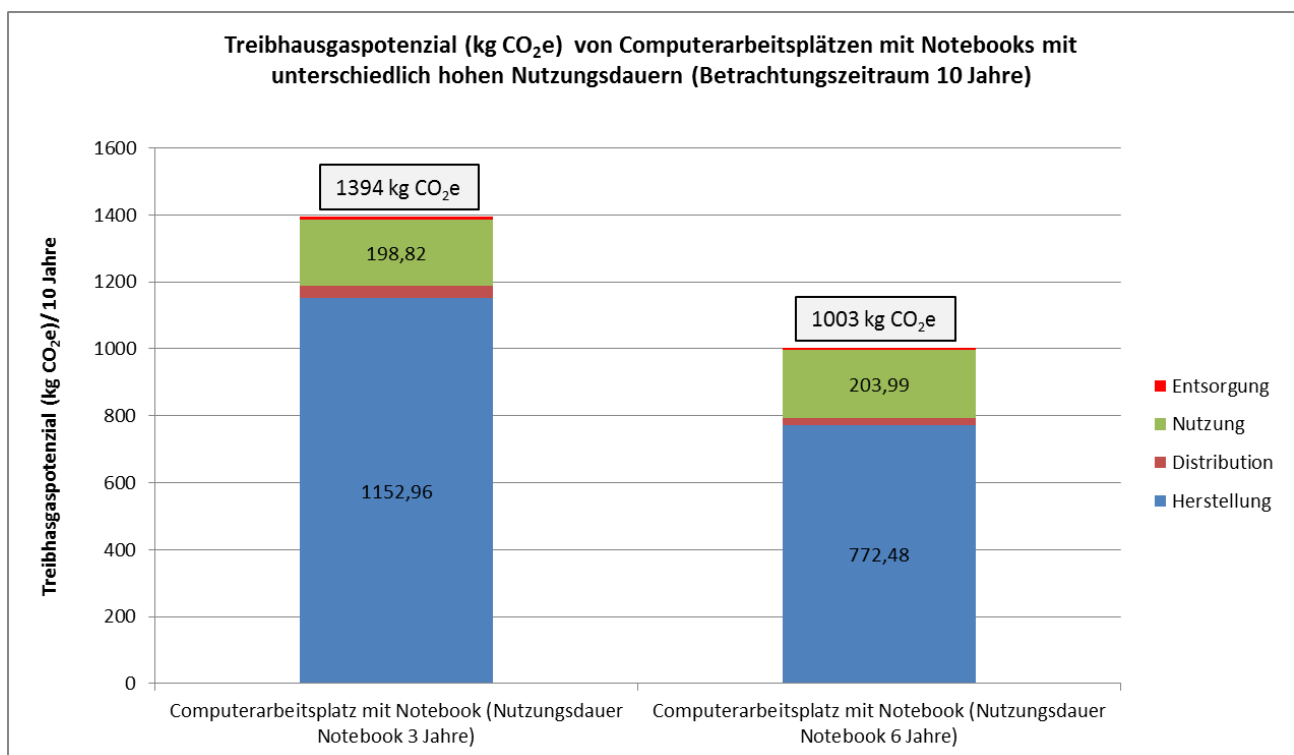
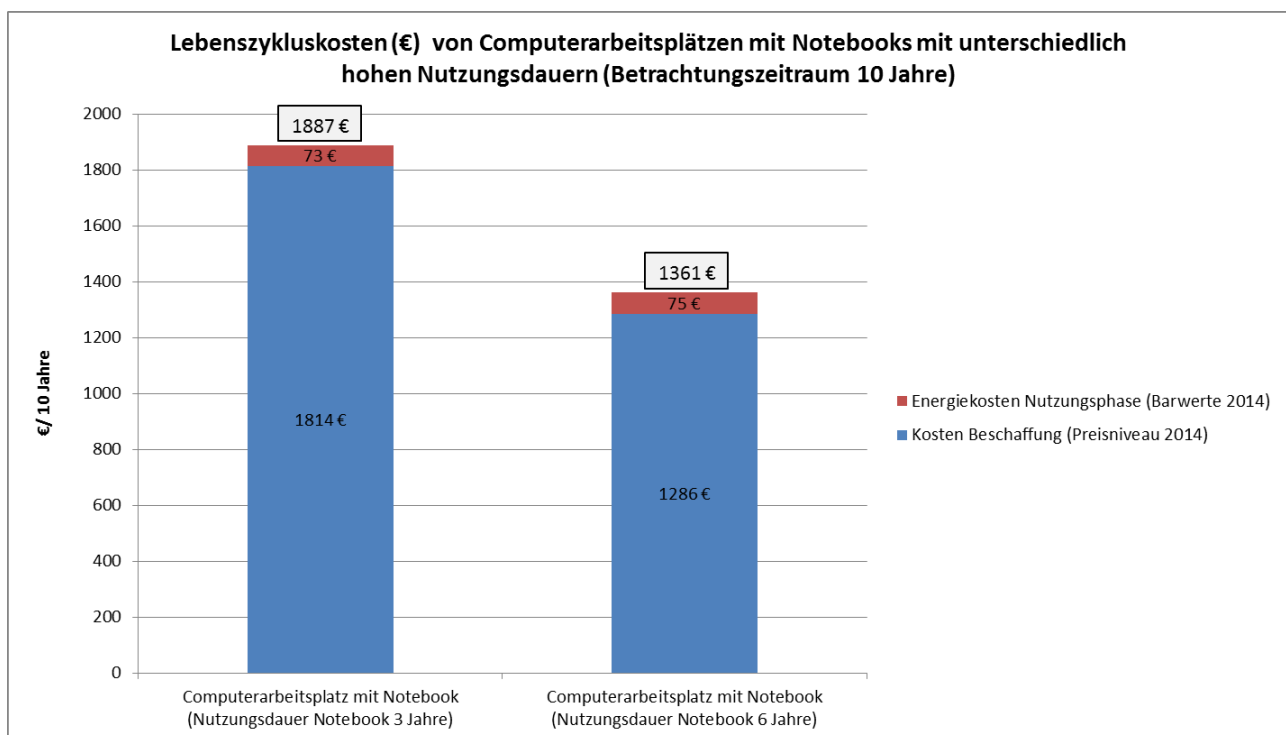


Tabelle 106: Sensitivitätsanalyse: THG-Potenzial (kg CO₂e) Computerarbeitsplatz mit Notebook: Vergleich Baseline Szenario (Nutzungsdauer 3 Jahre) vs. Sensitivität (Nutzungsdauer 6 Jahre)¹⁵⁵

(kg CO ₂ e)	Computerarbeitsplatz mit Notebook (Nutzungsdauer 3 Jahre)	Computerarbeitsplatz mit Notebook (Nutzungsdauer 6 Jahre)
Herstellung	1152,96	772,48
Distribution	33,70	20,07
Nutzung	198,82	203,99
Entsorgung	8,10	6,26
Summe	1394	1003

Abbildung 38: Sensitivitätsanalyse: Lebenszykluskosten (€) Computerarbeitsplatz mit Notebook: Vergleich Baseline Szenario (Nutzungsdauer 3 Jahre) vs. Sensitivität (Nutzungsdauer 6 Jahre)



Es zeigt sich, dass bei einer Verlängerung der Nutzungsdauer das Treibhauspotenzial mit 1.003 kg CO₂e und die Lebenszykluskosten mit 1.361 € insgesamt niedriger ausfallen. Das sind Einsparungen von ca. 390 kg CO₂e und etwa 527 € pro Computerarbeitsplatz für einen Betrachtungszeitraum von 10 Jahren. Diese Einsparungen treten selbst dann ein, wenn bei 50% der Geräte Komponenten zur Erreichung einer 6-jährigen Nutzungsdauer aufgerüstet (z.B. +4 GByte DRAM) oder neu gekauft (z.B. SSD, Akku) werden müssten. Bei einem Anteil von 33% der Computerarbeitsplätze mit Notebooks in der Bundesverwaltung ließe sich ca. 95 Millionen Euro und Treibhausgasemissionen von ca. 71.000 Tonnen CO₂e in 10 Jahren einsparen, wenn die Nutzungsdauer von Notebooks von 3 auf 6 Jahre verlängert würde.

¹⁵⁵ Aus der Rückgewinnung der Wertstoffe aus dem Elektronikschrott entstehen Recyclinggutschriften von -21,7 kg CO₂e für den Computerarbeitsplatz mit Notebook mit Nutzungsdauer 3 Jahre und -13,4 kg CO₂e für den Computerarbeitsplatz mit Notebook mit Nutzungsdauer 6 Jahre.

Die Berechnungen zeigen erneut, dass es sinnvoller ist, Notebooks so lange wie möglich zu nutzen und gegebenenfalls aufzurüsten oder zu reparieren, als in kurzen Intervallen neue Notebooks zu beschaffen. Dadurch verzögern sich die erneute Belastung der Umwelt sowie des Haushaltes. Neue, womöglich energieeffizientere Computergenerationen, werden dadurch erst später in Betrieb genommen. Dadurch wird zwar in der Nutzung geringfügig mehr Strom verbraucht – über zehn Jahre macht das 2 € Stromkosten und ca. 6 kg CO₂e pro Gerät aus. Dieser Mehraufwand an Kosten und Treibhausgasemissionen wird allerdings durch die Nutzungsdauerverlängerung der Hardware überkompensiert, wie die Berechnungen bestätigen.

5.10.3 Sensitivitätsanalyse 3: Nutzung der Berechnungsmethodik der Ökodesign-Verordnung (617/2013) im Vergleich zur Berechnungsmethodik des Vorhabens Öko-APC

In dieser Sensitivitätsanalyse wird gezeigt, wie der berechnete Energieverbrauch (Nutzungsphase) von Arbeitsplatzlösungen in der Bundesverwaltung von der zugrunde gelegten Berechnungsmethodik abhängt. Außerdem wird gezeigt, welche Auswirkungen die zugrunde gelegte Berechnungsmethodik auf die ermittelten Einsparungen hat, wenn der Ersatz von Desktop-PCs durch Notebooks berechnet wird. Als Vergleichsmethodik wird hier die Berechnungsmethodik der Ökodesign-Verordnung (617/2013) analysiert.

Die Energieverbrauchswerte, wie sie im Vorhaben Öko-APC berechnet wurden, sind in der Tabelle 90 dargestellt. Die Berechnung der Energieverbräuche für die Ökodesign-Verordnung erfolgt nach den folgenden Formeln:

Desktop-PC und Mini-PC

$$E_{\text{TEC}}: (8760/ 1000) * (0,55 * P_{\text{Off}} + 0,05 * P_{\text{Sleep}} + 0,40 * P_{\text{Idle}})$$

Notebook

$$E_{\text{TEC}}: (8760/ 1000) * (0,60 * P_{\text{Off}} + 0,10 * P_{\text{Sleep}} + 0,30 * P_{\text{Idle}})$$

E_{TEC} stellt den jährlichen Energieverbrauch dar und P_{Off} , P_{Sleep} und P_{Idle} repräsentieren jeweils die Leistungsaufnahmen in den Betriebszuständen Schein-Aus, Ruhemodus und Aktiv-/ Leerlaufzustand. Die Leistungsaufnahmewerte wurden, wie beim Öko-APC, aus der Tabelle 91 herangezogen. Für den Monitor wird dieselbe Berechnungsmethodik angenommen, wie beim Vorhaben Öko-APC (Tabelle 21 und Tabelle 26), denn die Ökodesign-Regelungen sind für diese Produktgruppe Ende 2015 noch nicht in Kraft getreten.

Die folgende Tabelle 107 zeigt die ermittelten Energieverbräuche von den drei Arbeitsplatzlösungen als Ergebnis von zwei unterschiedlichen Berechnungsmethoden. Die Ergebnisse zeigen, dass die ermittelten Energieverbräuche mit der Berechnungsmethodik der Ökodesign-Verordnung zu deutlich höheren Werten führen als diejenigen, die mit der Berechnungsmethodik des Vorhabens Öko-APC berechnet wurden.

Tabelle 107: Energieverbrauch (kWh) in der Nutzungsphase von drei Arbeitsplatzlösungen im Betrachtungszeitraum von 10 Jahren (2014-2023)

Energieverbrauch (kWh)	Computerarbeitsplatz mit Desktop-PC (kWh/ 10 Jahre)	Computerarbeitsplatz mit Notebook (kWh/ 10 Jahre)	Computerarbeitsplatz mit Mini-PC (kWh/ 10 Jahre)
Vorhaben Öko-APC	636,82	298,98	467,23
Ökodesign Verordnung (617/2013)	1256,15	392,90	765,59

5.11 Amortisationsrechnung aus ökologischer Sicht

In diesem Abschnitt wird ermittelt, wann es aus ökologischen Gesichtspunkten am sinnvollsten ist, einen alten und weniger energieeffizienten Desktop-PC durch ein neues und energieeffizienteres Gerät (Notebook oder Mini-PC) zu ersetzen. Konkret sollen folgende Fragen untersucht werden:

- (1) Wann amortisieren sich die Umweltauswirkungen von Herstellung, Distribution und Entsorgung eines energieeffizienten Notebooks, wenn es einen älteren Desktop-PC ersetzt?
- (2) Wann amortisieren sich die Umweltauswirkungen von Herstellung, Distribution und Entsorgung eines energieeffizienten Mini-PCs, wenn es einen älteren Desktop-PC ersetzt?

Zur Berechnung der Amortisationszeit (in Jahren) wird ermittelt, wie groß die Einsparung in der Nutzungsphase pro Jahr ist, wenn das neue Gerät effizienter ist als das alte. Die geschieht durch folgende Formel:

$$GWP_{\text{Einsparpotenzial}} = GWP_{\text{Nutzung}} [\text{kg CO}_2\text{e/Jahr/Funktionelle Einheit}]_{\text{ALT}} - GWP_{\text{Nutzung}} [\text{kg CO}_2\text{e/Jahr/Funktionelle Einheit}]_{\text{NEU}}$$

wobei

GWP_{Nutzung} (kg CO₂e/Jahr/Funktionelle Einheit) die jährlichen Treibhausgasemissionen des alten und des neuen Geräts in der Nutzungsphase abbildet.

Die entsprechenden Amortisationszeiten (Jahre) lassen sich wie folgt berechnen: die Treibhausgasemissionen der Herstellung, der Distribution und der Entsorgung wird durch die aufgrund der Energieeffizienzsteigerung eingesparten Treibhausgasemissionen (Einsparung in der Nutzung gegenüber dem alten Gerät) des neuen Geräts dividiert.

$$GWP_{\text{Herstellung, Distribution, Entsorgung}} / GWP_{\text{Einsparpotenzial}}$$

Die ökologische Amortisationszeit (**Referenzjahr 2014**) für den Ersatz von Desktop-PC durch ein neues und energieeffizienteres **Notebook** (mit HDD) beträgt:

$$\begin{aligned} &= GWP_{\text{Herstellung, Distribution, Entsorgung}} (\text{Notebook}) / GWP_{\text{Einsparpotenzial}} (\text{Ersatz Desktop-PC durch Notebook}) \\ &= 251,2^{156} \text{ kg CO}_2\text{e} / 22,47^{157} \text{ kg/Jahr CO}_2\text{e} \\ &= 11,20 \text{ Jahre.} \end{aligned}$$

Dieser Zeitraum liegt deutlich über der zu erwartenden Nutzungsdauer von drei Jahren von Notebooks in der öffentlichen Bundesverwaltung.

Wenn man ein Modell mit SSD für die Vergleichsrechnung wählt, verlängert sich die Amortisationszeit zusätzlich.

Die ökologische Amortisationszeit (**Referenzjahr 2014**) für den Ersatz von Desktop-PC durch einen neuen und energieeffizienteren **Mini-PC** (mit HDD) beträgt:

¹⁵⁶ inkl. Docking-Station.

¹⁵⁷ Siehe Tabelle 94.

$$= \mathit{GWP}_{\text{Herstellung, Distribution, Entsorgung}}(\text{Mini-PC}) / \mathit{GWP}_{\text{Einsparpotenzial}}(\text{Ersatz Desktop-PC durch Mini-PC})$$

$$= 190,89 \text{ kg CO}_2\text{e} / 11,28 \text{ kg CO}_2\text{e}$$

$$= 16,93 \text{ Jahre.}$$

Auch beim Mini-PC liegt der Amortisationszeitraum deutlich über die zu erwartende Nutzungsdauer von Arbeitsplatzcomputern in der öffentlichen Bundesverwaltung.

Die Amortisationsberechnungen zeigen, dass die ökologisch sinnvollste Option eine möglichst lange Nutzung von Arbeitsplatzcomputern ist. Selbst hohe Energieeffizienzsteigerungen in der Nutzung können den hohen Herstellungsaufwand der bestehenden Geräte nicht kompensieren.

6 Diskussion der Ergebnisse

Das Vorhaben hatte sich zum Ziel gesetzt, die Umweltauswirkungen und Lebenszykluskosten von verschiedenen Varianten von Arbeitsplatzcomputern zu untersuchen, die typischerweise in Verwaltungen eingesetzt werden. Dazu wurden zunächst die existierenden Konzepte und Berechnungsstandards zur Ermittlung des durchschnittlichen elektrischen Stromverbrauchs von Arbeitsplatzcomputern dahingehend analysiert, ob sie für die spezifische Situation in der öffentlichen Bundesverwaltung in Deutschland anwendbar sind. Darauf aufbauend wurden im Rahmen dieses Vorhabens eine geeignete Berechnungsmethode sowie realitätsnähere Nutzerprofile für die öffentliche Bundesverwaltung in Deutschland entwickelt. Anschließend wurden für ausgewählte IKT-Komponenten, nämlich unbestückte Leiterplatte, CPU und HDD, aktuellere Sachbilanzdaten für die vor- und nachgelagerten Produktionslebensphasen erhoben und aufbereitet, weil diese bislang nicht in ausreichender Qualität vorlagen. Zielsetzung war es, Unsicherheiten und Ungenauigkeiten der bestehenden Datenlage soweit wie möglich zu bereinigen. Mit verbesserten Daten ließen sich richtungssichere Empfehlungen für Verwaltungen und Produktpolitik aussprechen, um langfristig die Gesamt-Umweltauswirkungen der Computerarbeitsplätze in der Bundesverwaltung zu reduzieren.

Die derzeit verfügbaren Daten, die auch im Rahmen europäischer produktpolitischer Instrumente (z.B. Ökodesign-Richtlinie oder EU-Energy Star) für die Modellierung des Umweltaufwandes der IKT-Produkte eingesetzt werden, nicht den heutigen Stand der Technik und die typische Nutzung in den Verwaltungen abbilden.

Nutzungsprofile in der Bundesverwaltung

Die Nutzungsintensität von Computern in der Verwaltung unterscheidet sich erheblich von der privaten Nutzung. Mit einem geeigneten Berechnungsverfahren soll eine wirklichkeitsnahe Aussage zum Energieverbrauch in der Nutzung der Arbeitsplatzcomputer in der Verwaltung getroffen werden. Die Auswertung der am Umweltbundesamt durchgeführten Messungen von Arbeitsplatzcomputern zeigte, dass die Nutzung der Technik über den Arbeitstag stark fluktuiert und die Nichtnutzungszeit (z.B. Besprechungen, Pausenzeiten) eine bedeutende Rolle spielt.

Einige der untersuchten Berechnungsverfahren nehmen unrealistisch lange Nutzungszeiten an. Andere Verfahren berücksichtigen die Wochenenden, Feiertage und durchschnittliche Urlaubs- und Krankheitszeiten nicht, was zu einer zeitlichen Überbewertung der aktiven Nutzungsdauer der Computer in Verwaltungen und zu einer deutlichen Ergebnisverschiebung führen kann. Berechnungsverfahren, die die obengenannten Aspekte berücksichtigen, kommen in ihren Ergebnissen den realen Messergebnis aus der Messung im Umweltbundesamt recht nahe.

Da Computer heute über vergleichsweise gute Energiemanagementsysteme und Niedrigenergiezustände verfügen, gewinnt die aktive Nutzung neben den Leerlaufphasen aus Sicht des Strombedarfs zunehmend an Bedeutung. Gleichzeitig sinkt der Gesamtstromverbrauch in der Nutzungsphase durch Energieeffizienzsteigerung bei den Geräten, was wiederum die lebenszyklusbezogene Umweltbilanz beeinflusst und dazu führt, dass die Herstellungsphase anteilig an Bedeutung gewinnt.

Es konnte auch gezeigt werden, dass die aktive Nutzungsdauer von Arbeitsplatzcomputern in Behörden über ein Jahr gerechnet vergleichsweise recht kurz ist. So liegt der Berechnungsformel des Energy Star Programms (Version 6.0) eine zeitlich etwa dreifach längere aktive

Nutzungsdauer zugrunde als real in der Bundesverwaltung in Deutschland vorkommt. Dieser Umstand erklärt auch, warum in der Vergangenheit die potentiellen Stromverbräuche der Arbeitsplatzcomputer häufig überschätzt wurden. Die vorliegende Untersuchung lässt den Schluss zu, dass es sinnvoll ist, in den Berechnungsmethoden zukünftig nach geschäftlicher und privater Nutzung zu unterscheiden, um eine möglichst realitätsnahe Einschätzung zum Energieverbrauch der IT-Technik treffen zu können.

Erhebung von Sachbilanzdaten der Herstellungsphase

Die Erhebung der Lebenszyklusdaten für unbestückte Leiterplatte, CPU und HDD stellte das Projektteam vor unterschiedlich hohe Herausforderungen.

In dieser Studie wurde die Umweltwirkung der CPU-Fertigung für einen 300-mm-Wafer und aktuelles BGA-Design betrachtet, welches insbesondere für Notebook-CPU's eingesetzt wird. Die Datenlage für die CPU-Fertigung ist immer noch, wie in Kapitel 4.3 beschrieben, extrem lückenhaft. Daher konnte in diesem Vorhaben kein vollständiger Datensatz geschaffen werden, aber die einzelnen Fertigungsprozesse wurden, u.a. mithilfe von Herstellern und Halbleiterverband, sehr ausführlich beschrieben. Allerdings führte der Austausch mit den Industrievertretern höchstens zu einer Einschätzung der Datenqualität und nicht unbedingt zu einer Verbesserung der Datenlage. Hier ist weitere Forschung, vor allem im Hinblick auf die Back-End-Prozesse, notwendig.

Der Datensatz für unbestückte Leiterplatten basiert auf der Prozessbilanz eines europäischen Leiterplattenherstellers (aus Ergebnissen des EU-Projektes „LCA to go“ extrahiert) und wird sowohl von der Qualität der Datenaufnahme als auch von der Aktualität her als gut eingeschätzt. Allerdings wird mit einem europäischen Produktionsstandort nicht der Marktdurchschnitt abgebildet, da der Großteil der Leiterplatten, vor allem für Consumer-Elektronik, in Asien gefertigt wird. Mit dem Fokus auf Arbeitsplatzcomputer ist eine 6-lagige FR4-Leiterplatte mit Nickel-Gold-Beschichtung gewählt worden, was dem gängigen Stand der Technik entspricht. Der Datensatz ist über die Fläche skalierbar und daher gut für die Bewertung unterschiedlicher Arbeitsplatzcomputer mit unterschiedlichen Leiterplattengrößen und -formaten nutzbar. Der Datensatz ist von den Grundzügen her übertragbar auf Leiterplatten gleichen Typs (gleiches Substratmaterial und gleiche Beschichtung) mit anderer Lagenzahl. Da jedoch nur ein Datensatz vorliegt, ist keine direkte Skalierung möglich. Dazu müsste mindestens ein zweiter Datensatz für eine andere Lagenzahl vorliegen. Hier wären weitere Projekte mit der Aufnahme von Primärdaten von Leiterplatten unterschiedlicher Lagenzahl wünschenswert.

Für den HDD-Datensatz konnten alle wesentlichen Informationen und Materialdaten erhoben werden. Die Daten repräsentieren somit den technologischen Hintergrund der Jahre 2008-2012. Insgesamt kann die Datenqualität des Datensatzes als gut eingestuft werden. Die gewonnenen Daten und Kenntnisse in dieser Studie bieten zusätzlich eine Grundlage für die weitere Verbesserung des Datensatzes sowie auch für die Erstellung von neuen Datensätzen für Festplatten mit einem Formfaktor von 2,5“. Was die Skalierbarkeit des Datensatzes angeht, lässt sich ein Datensatz für 2,5“-Festplatten vor allem aufgrund einer anderen Materialzusammensetzung, einer anderen Packaging-Fläche für den Motor-Controller-Chip und fehlender proportionaler Relation zum Gewicht, nicht auf den Datensatz für 3,5“-Festplatten skalieren. Eine Skalierbarkeit ist allerdings innerhalb des Festplattentyps (nach Speicherkapazität oder Anzahl der Medien) des erstellten 3,5“-Festplatten-Datensatzes durchaus möglich.

Ökologische Auswirkungen der Arbeitsplatzcomputer

Die Ermittlung der ökologischen Auswirkungen anhand des Treibhausgaspotenzials der Arbeitsplatzcomputer auf der Grundlage der in diesem Vorhaben erhobenen Daten zeigt ein eindeutiges Bild, dass die Herstellungsphase den größten Teil der Gesamtumweltauswirkungen eines Arbeitsplatzcomputers ausmacht. Das gilt für alle untersuchten Produktvarianten. Die im Rahmen dieses Vorhabens ermittelten Umweltauswirkungen der Herstellung der Arbeitsplatzcomputer liegen teilweise über den in anderen Studien berechneten Umweltauswirkungen. Beispielsweise betragen die herstellungsbedingten Treibhausgasemissionen eines Notebooks 227 kg CO₂e (mit HDD) bzw. 287 kg CO₂e (mit SSD). Im Vergleich zu den Ergebnissen der Ökodesign-Studie (EuP Lot 3), wo die herstellungsbedingten Treibhausgasemissionen eines Notebooks mit nur 81 kg CO₂e modelliert wurden, werden sie in diesem Vorhaben mit einem Faktor 2,8 bis 3,5 höher bewertet.

Laut dieser Studie verursacht bereits der Herstellungsaufwand allein des modellierten Notebook-Motherboards 84,4 kg CO₂e. Der Herstellungsaufwand von Speichermodulen eines Notebooks verursacht weitere 91,7 kg CO₂e. Damit wird bestätigt, dass die Umweltauswirkungen der Herstellungsphase der IKT-Geräte in der Ökodesign-Studie massiv unterschätzt wurden. Interessant ist auch die Erkenntnis, dass ein Desktop-PC als Einzelgerät höhere Treibhausgasemissionen in der Herstellung verursacht als ein Notebook, wie oft eingeschätzt wurde. Das liegt vor allem an der großzügigen Dimensionierung der Komponenten der Desktop-PCs, wie zum Beispiel des Motherboards. Die Herstellung eines Desktop-PCs verursacht nach der Modellierung in dieser Studie Treibhausgasemissionen von ca. 341 kg CO₂e. Die Herstellung eines Motherboards eines Desktop-PCs verursacht ca. 135 kg CO₂e, was knapp 40% der herstellungsbedingten Treibhausgasemissionen bedeutet. Berücksichtigt man auch noch die Speichermodule, sind die beiden Komponente für ca. 67% der herstellungsbedingten Treibhausgasemissionen eines Desktop-PCs verantwortlich. Im Fall von Notebooks machen die SSD, das Motherboard und die Speichermodule zusammen mehr als 84% der herstellungsbedingten Treibhausgasemissionen eines Notebooks aus.

Ein Mini-PC weist aufgrund seiner kompakten Form, seinen Notebook-ähnlichen Komponenten sowie einfacherer Konfiguration und Dimensionierung die geringsten herstellungsbedingten Treibhausgasemissionen von 185 kg CO₂e (mit HDD) bzw. 244 kg CO₂e (mit SSD) auf.

Während der Herstellungsaufwand von Arbeitsplatzcomputern wie oben beschrieben von anerkannten Berechnungsmethoden systematisch unterschätzt wird, wie z.B. der Ökodesign-Richtlinie, werden entsprechend die Energieverbräuche der Nutzungsphase systematisch überschätzt. In dieser Studie konnte auf Basis der getroffenen Annahmen gezeigt werden, dass der berechnete Energieverbrauch durch die Berechnungsmethode der Ökodesign-Verordnung die Nutzungsphase bei Arbeitsplatzcomputern mit Desktop-PC mit einem Faktor 2,7 überschätzt (Abschnitt 3.3). Der resultierende Fokus der Maßnahmen der Ökodesign-Verordnung auf den Energieverbrauch der Nutzungsphase ist deswegen nur als eine Konsequenz der veralteten und schlechten Datenlage zu den Umweltauswirkungen der Herstellungsphase zu verstehen. Mit dieser Studie wurde die Datenlage, zumindest im Bereich der öffentlichen Verwaltung und für verwaltungsähnliche Arbeitsweisen, in Deutschland deutlich verbessert und dient als eine robustere Datengrundlage für zukünftige produktpolitische Entscheidungen.

Nutzungsdauer von Arbeitsplatzcomputern beeinflusst maßgeblich die Umweltbilanz

Trotz der höheren Energieeffizienz von Notebooks im Vergleich zu Mini-PCs und Desktop-PCs schneidet in der vorliegenden Studie ein Arbeitsplatzcomputer mit Notebook in der lebenszyklusbezogenen Umweltbilanz deutlich schlechter ab. Das liegt vor allem an den getroffenen Annahmen bezüglich der Nutzungsdauer von Arbeitsplatzcomputern in der Bundesverwaltung. In der Studie wurde angenommen, dass die Notebooks eine Nutzungsdauer von nur 3 Jahren aufweisen. Der Hintergrund dieser Annahmen war die Richtlinie zur Nutzungsdauer, Aussonderung und Verwertung von IT-Geräten und Software, Anlage zum Beschluss Nr. 2013/7 des Rats der IT-Beauftragten der Ressorts vom 6. Dezember 2013 (Rat der IT-Beauftragten 2013), in der eine Mindestnutzungsdauer von 3 Jahren für mobile-IT Geräte empfohlen wird. Infolge der hohen Umweltrelevanz der Hardwareherstellung wirkt sich die Verkürzung der Nutzungsdauer von Notebooks deutlich negativ auf die Umweltbilanz aus. Dabei gilt die Regel: je kürzer die Nutzungsdauer der Geräte, desto mehr Hardware muss in einem gegebenen Zeitraum hergestellt werden. Bei Desktop-PCs und Mini-PCs wird für die Modellrechnung die Nutzungsdauer ebenfalls aus den Empfehlungen der oben genannten Richtlinie abgeleitet. Sie beträgt für Desktop-PCs und Mini-PCs 5 Jahre.

Die hohen Treibhausgasemissionen eines Arbeitsplatzcomputers mit Notebook im Zeitraum von 10 Jahren sind außerdem auch darauf zurückzuführen, dass das Notebook ab dem zweiten Beschaffungszyklus mit einem SSD modelliert wurde. Im Vergleich dazu wurde ein Desktop-PC auch im zweiten Beschaffungszyklus weiterhin mit einer HDD bilanziert. Die Herstellung einer SSD ist mit 65,6 kg CO_{2e} deutlich aufwändiger als die Herstellung einer HDD (6,2 kg CO_{2e}). Obwohl der Mini-PC ab dem zweiten Beschaffungszyklus ebenfalls mit einer SSD bilanziert wurde, schneidet der Computerarbeitsplatz mit Mini-PC wegen der höheren Nutzungsdauer von 5 Jahren insgesamt besser ab als ein Computerarbeitsplatz mit Notebook.

Aufgrund der in dieser Studie getroffenen Modellannahmen bezüglich der unterschiedlichen Nutzungsdauer sowie Aktualisierung und Verbesserung der Lebenszyklusdaten von Arbeitsplatzcomputern konnte festgestellt werden, dass eine Verlängerung der Nutzungsdauer von Arbeitsplatzcomputern die effektivste Strategie ist, die Gesamtumweltauswirkungen der Computerarbeitsplätze zu reduzieren. In diesem Zusammenhang wird dargestellt, dass die Herstellungsphase eines Arbeitsplatzcomputers, unabhängig vom eingesetzten Gerät, die dominante Lebenszyklusphase ist. Mit einem Desktop-PC macht sie knapp 65%, mit einem Notebook ca. 83% und mit einem Mini-PC ca. 65% der Gesamtreibhausgasemissionen eines Arbeitsplatzcomputers aus. Mit gleichzeitiger Verbesserung der Energieeffizienz der Computergeräte in der Nutzungsphase, sei es bedingt durch die Ökodesign-Verordnung, Energy Star Kennzeichnung oder das Umweltzeichen Blauer Engel, verschiebt sich der relevante Anteil an den Gesamtumweltauswirkungen eines Arbeitsplatzcomputers weiter in Richtung Herstellungsphase. Dies sollte daher auch bei künftigen Maßnahmen der Produktpolitik berücksichtigt werden.

In Bezug auf die Lebenszykluskosten ist Computerarbeitsplatz mit Notebook aufgrund der oben erwähnten Effekte der angenommenen Nutzungsdauern die teuerste Variante. Wenn es sich also um reine stationäre Arbeitsplätze handelt, sollten diese nicht mit Notebooks eingerichtet werden. Ein Computerarbeitsplatz mit Mini-PC hat nur dann geringere Lebenszykluskosten als ein Computerarbeitsplatz mit Desktop-PC, wenn die Nutzungsdauern von PC-Endgeräten in der gleichen Größenordnung liegen und der angenommene Kaufpreis eines Mini-PCs nicht wesentlich teurer ist. Hat ein Mini-PC deutlich niedrigere Nutzungsdauer als ein Desktop-PC oder ein

wesentlich teurer Kaufpreis, würden die Lebenszykluskosten eines Computerarbeitsplatzes mit Mini-PC höher als die eines mit Desktop-PC liegen.

Reflektion der Ergebnisse vor dem Hintergrund der Datenunsicherheiten (Arbeitstitel)

Für die Modellierung der ökologischen Auswirkungen der drei Arbeitsplatzlösungen wurde soweit wie möglich auf eigene Datenerhebungen und aktuelle Datensätze zurückgegriffen. Die aus Umweltsicht wichtigen Komponenten, wie der Arbeitsspeicher, das Motherboard, die Festplatte, das Display, der CPU und der Akku, wurden somit mit durch Experten abgesicherten oder durch das Forscherteam geprüften Daten modelliert. Einige weitere Komponenten, wie die Mouse, die Tastatur und die Docking-Station, wurden im Hinblick auf die Materialzusammensetzung aktualisiert und somit in Bezug auf ihre Umweltwirkung realistischer eingeschätzt als in älteren Datensätzen. Allerdings musste ein Teil der Komponenten, wie z.B. DVD-Laufwerk und Netzteile, mit teilweise älteren Datensätzen bilanziert werden, die nicht mehr dem Stand der Technik entsprechen. Der Anteil dieser Komponenten an Gesamttreibhausgasemissionen betrug unter 5% bei Notebooks und Mini-PCs und ca. 13% bei Desktop-PCs. Somit spielt die Unsicherheit solcher veralteten Datensätze nur eine untergeordnete Rolle bei der Ermittlung von Gesamtumweltauswirkungen.

Zweit weitere Datenunsicherheiten, die nennenswert sind, sind die Skalierung des Datensatzes zu 3,5“ HDD auf 2,5“ HDD und die Modellierung der SSDs. Die Umrechnung von 3,5“ HDD zu 2,5“ HDD mit dem Gewichtungsfaktor 25% auf alle I/O Flüsse führte zu einem auffällig geringeren Umweltaufwand der 2,5“ HDD (6,2 kg CO₂e) im Vergleich zu einer 3,5“ HDD (24,8 kg CO₂e). Auf der anderen Seite weisen die Ökobilanz-Inventardaten zur SSD eine hohe Unsicherheit auf, da die zur Verfügung stehenden Quellen nur hoch aggregierte Angaben enthalten und zudem die zugrunde liegenden Produktspezifikationen möglicherweise nicht mehr dem aktuellen Stand der Technologie entsprechen. Für detaillierte ökobilanzielle Bewertungen der Auswirkungen eines Ersatzes von HDD durch SSD bedarf es weitergehender Untersuchungen der aktuellen Flash-Speicher Technologie, um den Herstellungsaufwand realistischer einschätzen zu können.

In der Studie wurde außerdem angenommen, dass sich die Energieeffizienz in der Nutzung von Arbeitsplatzcomputern jährlich um 5% verbessert. Diese Annahme mag für Desktop-PCs in vielen Fällen zutreffen, könnte aber unter Umständen bei Notebooks und Mini-PCs zu einer Überschätzung geführt haben. Allerdings führte diese Annahme trotz einer möglichen Überschätzung des Energieeffizienzsteigerungspotenzials bei Notebooks und Mini-PCs keineswegs zu abweichenden Ergebnissen. Beispielsweise hätte eine Energieeffizienzsteigerung von 1% pro Jahr bei Notebooks nur zu einem Mehrverbrauch von weniger als 1 kWh pro Jahr in der Nutzung geführt.

Im Bereich der Lebenszykluskosten spielen die Anschaffungskosten von den Arbeitsplatzlösungen eine entscheidende Rolle. So lag der angenommene Kaufpreis von Mini-PCs und Desktop-PCs ziemlich nah bei einander. Trotz einer deutlich höheren Energieeffizienz von Mini-PCs war der Unterschied in den Lebenszykluskosten von beiden Arbeitsplatzlösungen nicht nennenswert. In Fällen, wo der Anschaffungspreis von Mini-PCs deutlich teurer ist im Vergleich zu Desktop-PCs, kann erwartet werden, dass diese nicht zwangsläufig die ökonomischste Variante darstellen. Darüber hinaus wurde in der Modellberechnung angenommen, dass die Mini-PCs die gleiche Nutzungsdauer wie Desktop-PCs aufweisen. Würden die Mini-PCs aber kürzer genutzt und mehrfach angeschafft als Desktop-PCs, würden sie möglicherweise zu höheren Lebenszykluskosten führen.

7 Schlussfolgerung und Empfehlungen

Die im Rahmen dieser Studie durchgeführten ökobilanziellen Modellierungen haben bestätigt, dass eine Nutzungsdauerverlängerung von Arbeitsplatzcomputern zu deutlichen Umweltentlastungseffekten in der Bundesverwaltung führen kann. Im Folgenden werden daher verschiedene politische Maßnahmen empfohlen, die dazu beitragen, dass die Gesamtnutzungsdauer von Computergeräten in der Bundesverwaltung verlängert wird.

In dieser Hinsicht ist es zunächst dringend geboten, eine höhere Mindestnutzungsdauer von Arbeitsplatzcomputern in der Bundesverwaltung vorzuschreiben. Der erste Schritt für die Einführung einer höheren Mindestnutzungsdauer von Computergeräten in der Bundesverwaltung wäre die Revision der durch den Rat der IT-Beauftragten der Ressorts empfohlenen Nutzungsdauer in der aktuellen Richtlinie zur Nutzungsdauer, Aussonderung und Verwertung von IT-Geräten und Software. Die dort empfohlenen Nutzungsdauern müssen im Hinblick auf die in diesem Vorhaben ermittelten ökologischen und ökonomischen Vorteile einer längeren Nutzung nach oben korrigiert werden. Längere Nutzungszeiten als vom IT-Rat empfohlen sind aus technischer und funktionaler Sicht möglich. In diesem Zusammenhang zeigen Prakash et al. (2016), dass die durchschnittliche Erst-Nutzungsdauer von privaten Notebooks in Deutschland, die in den Jahren 2010-2012 aufgrund eines Defektes ersetzt wurden, zwischen 5,7 und 5,4 Jahren lag (Prakash et al. 2016). Die Erst-Nutzungsdauer umfasst die Zeitspanne der Nutzung nur durch den Erstnutzer. Das heißt, die Erst-Nutzungsdauer beinhaltet nicht eine weitere Nutzung des Geräts nach möglichen Reparaturen. Die Business-Notebooks sind in der Regel robuster und haltbarer als die privaten Consumer-Notebooks. Deswegen kann davon ausgegangen werden, dass die Business-Notebooks eine noch längere Nutzungsdauer erreichen können. Die Erfahrungen in den letzten Jahren zeigen, dass bei einem Wechsel der Software ein Austausch der Geräte aufgrund von technischen Anforderungen nicht mehr notwendig erscheint. Das kürzlich auf dem Markt angebotene Betriebssystem Windows 10 stellt beispielsweise keine hohen Anforderungen an die technischen Anforderungen der Systeme, somit können auch viele ältere Computer und Notebooks mit dem neuen Betriebssystem ausgestattet werden.

Außerdem erscheint es sinnvoll, dass sich die Behörden vor der Beschaffung von Arbeitsplatzcomputern genauere Profile ihrer Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter herausarbeiten. Wenn es sich in einer Behörde primär um stationäre Arbeitsplätze handelt und die Anforderungen an die Computergeräte nicht besonders hoch sind, erweisen sich Arbeitsplatzcomputer mit Mini-PC sowohl aus ökologischen als auch aus ökonomischen Gründen als die beste Option. Diese Botschaft könnte beispielsweise in einer breiten bundesweiten Kampagne an die öffentlichen Verwaltungen und Behörden übermittelt werden.

Was mobile Nutzung angeht, gelten andere Anforderungen an die Geräte. Bei mobiler Nutzung der Notebooks können Schäden durch den Transport, wechselnde Witterungsbedingungen und sonstige Umwelteinflüssen entstehen, die die Lebensdauer negativ beeinflussen. Um die positiven Umweltwirkungen einer längeren Lebensdauer auch bei Notebooks zu realisieren, ist es daher unerlässlich, dass die Beschaffung von mobilen Computerendgeräten mit strengen Anforderungen an die Umweltverträglichkeit, die Qualität und Haltbarkeit von Geräten und Komponenten, wie HDD/ SSD, Arbeitsspeicher, Akku und Motherboard, verbunden ist.

Die Anforderungen der Beschaffungsempfehlungen¹⁵⁸ für umweltfreundliche Produkte der IKT greifen bereits viele Kriterien zur Lebensdauererlängerung auf.

Allerdings existieren bis dato wenig bis keine Leitlinien, wie solche Anforderungen ausgelegt werden sollen. Bestehende Standards und Normen für die Prüfung der Lebensdauer sind kaum bekannt oder bisher wenig etabliert. Aus diesem Grund wird empfohlen, die technischen Leitlinien zur Bestimmung der Qualitäts- und Haltbarkeitskriterien von mobilen IT-Geräten, aber auch sonstigen Computergeräten, herauszuarbeiten. Neben technischen Kriterien sollen diese Leitlinien die Umsetzbarkeit von weiteren lebensdauererlängernden Maßnahmen praxisnah beschreiben, die zum Beispiel in den Kriterien des Blauen Engels für Produkte der Informationstechnik formuliert sind, wie beispielsweise Reparaturfähigkeit, Auf- und Nachrüstbarkeit und Ersatzteilverfügbarkeit. Diese Leitlinien sollen gemeinsam mit den Industrieverbänden, wie BITKOM, Standardisierungs- und Normungsinstitutionen, Behördenvertreter, Umweltverbänden und unabhängigen wissenschaftlichen Einrichtungen entwickelt werden.

Weiterer Forschungsbedarf besteht außerdem bei der Entwicklung von Modellen zur Förderung von Wiederverwendung von Computerendgeräten nach dem Nutzungsende in der Bundesverwaltung. Interessant wäre zu prüfen, wie die Prozesse in den Verwaltungen unter den bestehenden rechtlichen Rahmen gestaltet werden müssten, um eine sinnvolle Zweitverwendung von Altgeräten zu verpflichten. Prüfbedarf besteht auch bei der Identifizierung von Fördermöglichkeiten, wenn es um Kooperationen mit professionellen Wiederaufbereitern, wie z.B. ReUse e.V. und vergleichbare Einrichtungen, geht. In diesem Zusammenhang soll eruiert werden, ob die Entwicklung und Etablierung einer Zertifizierung von professionellen Wiederaufbereitern im Sinne der Qualität und Zuverlässigkeit eine sinnvolle Option sein könnte.

Nicht zuletzt gilt auch zu erforschen, welche innovativen Dienstleistungsverträge mit Recycling- und Entsorgungsunternehmen abgeschlossen und welche Fördermechanismen und Rahmenbedingungen geschaffen werden können, um die Ressourcenrückgewinnung aus Arbeitsplatzcomputern effizienter zu gestalten.

Aus obengenannten Gründen schlägt diese Studie einen 6-Punkte-Plan für den Einsatz von Computerarbeitsplätzen in den Bundesbehörden vor, durch den Bundeshaushaltsmittel eingespart und die angekündigten Ziele der Bundesregierung im Rahmen der nationalen Nachhaltigkeitsstrategie, der Digitalen Agenda 2014-2017 und des Deutschen Ressourceneffizienzprogrammes unterstützt werden:

¹⁵⁸ Empfehlungen und Leitfäden zur umweltfreundlichen Beschaffung des Umweltbundesamtes:
<https://www.umweltbundesamt.de/themen/wirtschaft-konsum/umweltfreundliche-beschaffung>

Maßnahme 1: Erhöhung der empfohlenen Mindestnutzungsdauer in der Bundesverwaltung

Alle Arbeitsplatzcomputer, stationär und mobil, sollten eine Mindestnutzungsdauer von 6 Jahren haben.

Maßnahme 2: Qualität und Haltbarkeit als Kernanforderung der öffentlichen Beschaffung

Die Berücksichtigung von Umweltkriterien bei der Anschaffung garantiert gute Qualität und Haltbarkeit von Arbeitsplatzcomputern. Die Beschaffungsleitfäden des Umweltbundesamtes und die Kriterien des Blauen Engel sind eine gute Orientierungshilfe. Damit kann eine Mindestnutzungsdauer von 6 Jahren möglichst ohne Reparaturen realisiert werden.

Maßnahme 3: Vorausschauende Beschaffung zur Vermeidung von häufigen Gerätewechseln

Bei einer Neuanschaffung sollte stets abgeschätzt werden, ob die zum Kauf erwogenen Arbeitsplatzcomputer den Ansprüchen der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter sowie der Software und Betriebssysteme auch in den nächsten 6 Jahren noch genügen werden.

Maßnahme 4: Bedarfsgerechte Ausstattung des Computerarbeitsplatzes

Wenn es sich um einen rein stationären Arbeitsplatz handelt, sollte ein Mini-PC genutzt werden. Nur wenn die Arbeit auch mobil erfolgen muss, sollte ein Notebook zum Einsatz kommen.

Maßnahme 5: Kaskadennutzung als Mittel zur Verlängerung der Nutzungsdauer

Eine weitere Nutzung der funktionstüchtigen Arbeitsplatzcomputer nach dem Nutzungsende sollte grundsätzlich angestrebt und in entsprechende Verwaltungsvorschriften geregelt werden.

Maßnahme 6: Beschaffung von wiederaufbereiteten Geräten

In den Beschaffungsprozess sollen auch gebrauchte und wieder aufgearbeitete Geräte einbezogen werden, um die Nachfrage der ReUse-Märkte zu stärken.

8 Literatur

- Arthur D. Little (o.J.) „Handbuch der Bundes-KLR“, Anhang 2, Nutzungsdauertabelle, Standard-Kosten- und Leistungsrechnung (Standard-KLR)
- BildschArbV 2008 Verordnung über Sicherheit und Gesundheitsschutz bei der Arbeit an Bildschirmgeräten (Bildschirmarbeitsverordnung – BildscharbV), Vom 4. Dezember 1996 (BGBl. I S. 1841), zuletzt geändert durch Artikel 7 der Verordnung vom 18. Dezember 2008 (BGBl. I S. 2768).
- Boyd 2012 Sarah B. Boyd, Life-Cycle Assessment of Semiconductors, Springer, New York, 2012.
- Buchert et al. 2012 Buchert, M.; Manhart, A.; Bleher, D.; Pingel, D; Recycling kritischer Rohstoffe aus Elektronik-Altgeräten, Öko-Institut e.V. im Auftrag des Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen, 2012.
- Bundesagentur für Arbeit 2014 Standzeiten, Reparaturen und Gewährleistung, Befragung im Rahmen dieses Vorhabens, Juli 2014.
- Bundesfinanzministerium 2000 Abschreibung für Abnutzung für allgemein verwendbare Anlagegüter (AfA-AV), 2000
- Bundesministerium des Innern 2007 Empfehlung zur Durchführung von Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen in der Bundesverwaltung, insbesondere beim Einsatz der IT
- CDP 2012 Carbon Disclosure Report 2012, CDP Supply Chain 2012 Information Request, Seagate Technology LLC.
- Cheung et al. 2012 Cheung, Y.M.; Ka San Lam; Mak, G.Y.; Dewen Tian; Ming Li; Process considerations of TC-NCP fine-pitch copper pillar FC bonding, 14th International Conference on Electronic Materials and Packaging – EMAP, 2012, 13.-16. Dezember 2012.
- Chipbond 2014 Chipbond; http://www.chipbond.com.tw/eng_service_02_32.aspx, 25.04.2014.
- Ciroth & Franze 2011 Andreas Ciroth, Juliane Franze, LCA of an Ecolabeled Notebook: Consideration of Social and Environmental Impacts Along the Entire Life Cycle, GreenDelta TC GmbH im Auftrag vom Federal Public Planning Service Sustainable Development, Brüssel, Belgien; Web: http://www.greendelta.com/uploads/media/LCA_laptop_final.pdf; Zugriff: 15.10.2015.
- Clemm et al. 2015 Christian Clemm, Alexander Schlösser, Karsten Schischke, Krystan Marquardt, Paul Mährlitz, Marco Muhl, Klaus-Dieter Lang: Umweltwirkungen von wiederaufladbaren Lithium-Batterien für den Einsatz in mobilen Endgeräten der Information- und Kommunikationstechnik (IKT), Forschungskennzahl (UFO-PLAN) 3713 95 316, Umweltbundesamt, Dessau.
- DEFRA 2009 Non-Domestic Computers and Monitors, Market Transformation Programme, 2009
- Deng 2008 Liqiu Deng, Eric Williams: Measures and Trends in Energy Use of Semiconductor Manufacturing, In proceeding of: Electronics and the Environment, ISEE, 2008.

- DeZem 2013 Energiemessung von Arbeitsplatzcomputer (APC) und Erarbeitung von Maßnahmen für deren energieeffiziente Nutzung, im Auftrag des Umweltbundesamtes, Dessau-Roßlau
- ECMA 2013 Ecma International. <http://www.ecma-international.org>. Abgerufen 3. Dezember 2013.
- ENERGY STAR 2010 ENERGY STAR Program Requirements for Computers Eligibility Criteria Version 5.2. 2010. http://www.energystar.gov/ia/partners/prod_development/revisions/downloads/computer/prog_reqs_draft_v5.2.pdf. Abgerufen 10 Oktober 2013.
- ENERGY STAR 2013 ENERGY STAR Computer Specification Version 6.0. 2013. https://www.energystar.gov/products/specs/computer_specification_version_6_0_pdf. Abgerufen 3 Dezember 2013.
- ENERGY STAR 2013a ENERGY STAR Program Requirements for Computers ENERGY STAR Program Requirements for Computers Eligibility Criteria Version 6.0 Rev Oct-2013.
- ENERGY STAR 2013b ENERGY STAR. ENERGY STAR® Program Requirements for Displays Eligibility Criteria Version 6.0. Partner Commitments. Rev. Jan-2013.
- ESIA 2010 ESIA; Fragebogen am 11.12.2010, in „Schaffung einer Datenbasis zur Ermittlung ökologischer Wirkungen der Produkte der Informations- und Kommunikationstechnik (IKT), UFOPLAN 2009 FKZ 3709 95 308 des Umweltbundesamtes, Freiburg, 2011.
- ESIA 2011 ESIA: PFC Voluntary Agreement Final Report, 2011.
- EuP 2007 EuP 2007; European Commission, DG TREN; Preparatory studies for Eco-Design Requirements of EuPs, Lot 3: Personal Computers (Desktops and Laptops) and Computer Monitors, Final Report (Task 1-8), IVF Industrial Research and Development Corporation, 2007
- Europäische Kommission 2006 Integrated Pollution Prevention and Control – Reference Document on Best Available Techniques for the Surface Treatment of Metals and Plastics. August 2006.
- Europäische Kommission 2011 Comparative Life-Cycle Assessment of nickel cadmium (NiCd) batteries used in Cordless Power Tools (CPTs) vs. their alternatives nickel-metal hydride (NiMH) and lithium-ion (Li-ion) batteries.
- Europäische Kommission 2013 Europäische Kommission. Verordnung (EU) Nr. 617/2013 Der Kommission zur Durchführung der Richtlinie 2009/125/EG des Europäischen Parlaments und des Rates im Hinblick auf die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung von Computern und Computerservern. http://www.ce-richtlinien.eu/richtlinien/OekoD_RL.html. Abgerufen 27. Mai 2013.
- Fazel 2010 BearingPoint GmbH. Thin Clients versus Desktop-Computer – wer spart mehr Strom? – Vergleich energieeffizienter Arbeitsplatzsysteme für den Einsatz in Behörden. 2010.
- Friedemann et al. 2000 Völklein, Friedemann; Zetterer, Thomas; Einführung in die Mikrosystemtechnik, Vieweg, Wiesbaden, 2000.
- Fujitsu 2011 FUJITSU Technology Solutions. White Paper Energy Consumption ESPRIMO E7936 0-Watt. 2011.

- FujitsuPL 2014 Fujitsu Shop Polska. <http://www.fujitsu-shop.pl/monitor-scenicview-p22w5-eco-ips-22-10001-5ms-300cd-m2-audio-178-178-hdmi-dvidsub-p-880.html>, abgerufen 02. April 2014.
- Grießhammer et al. 2004 Grießhammer, R.; Graulich, K.; Bunke, D.; Eberle, U.; Gensch, C.-O.; Quack, D. & Rüdener, I.; in Zusammenarbeit mit Götz, K. & Birzle-Harder, B. (2004): EcoTopTen – Innovationen für einen nachhaltigen Konsum (Pilot-Phase). Freiburg: Öko-Institut e. V.
- Grießhammer et al. 2007 Grießhammer, R.; Buchert, M.; Gensch, C.-O.; Hochfeld, C.; Manhart, A. & Rüdener, I. (2007): PROSA – Product Sustainability Assessment, Freiburg: Öko-Institut e. V.
- Gröger et al. 2015 Jens Gröger, Britta Stratmann, Eva Brommer, Umwelt- und Kostenentlastung durch eine umweltverträgliche Beschaffung, Eine Studie des Öko-Instituts e.V. im Auftrag der Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt, Berlin, September 2015, Web: <http://www.oeko.de/oekodoc/2379/2015-541-de.pdf>
- Hermanns 2010 Hermanns, S.; Experiences from Piloting a Carbon Footprint Method for Semiconductor Manufacturing; Präsentation auf der ersten Sitzung der Expertenrunde im Rahmen des UBA-Vorhabens “Informationsgewinnung über die Wertschöpfungskette von Produkten der Informations- und Kommunikationstechnik (IKT)“, 21.09.2010, Berlin
- Higgs 2009 Higgs, T.; Yao, M.; Cullen, M.; Stewart, S.: Developing an Overall CO₂ Footprint for Semiconductor Products, IEEE International Symposium on Sustainable Systems and Technology ISSST, May 2009.
- Hodgin 2009 Hodgin, Rick; From sand to hand: How a CPU is made, 9.Juli 2009, <http://www.geek.com>, 15.04.2014.
- Hoffmann 2011 Peter Hoffmann. Erarbeitung einer auf DREWAG-Verwaltungsstätten fokussierten Beispiellösung zur Energieeffizienzsteigerung – Schwerpunkt IKT – auf der Basis bestehender bzw. neuer Automatisierungslösungen (Forschungsprojekt Adaptive Sense). Diplomarbeit, Hochschule für Technik und Wirtschaft. 2011.
- Hunkeler et al. 2008 Hunkeler, D.; Lichtenvort K. & Rebitzer, G. (Hrsg.) (2008): Environmental Life Cycle Costing. Boca Raton et al.: CRC Press.
- IC Insights 2013 IC Insights: Five IC Suppliers to Hold One-Third of 300mm Wafer Capacity in 2013, February 19, 2013, <http://www.icinsights.com/news/bulletins/Five-IC-Suppliers-To-Hold-OneThird-Of-300mm-Wafer-Capacity-In-2013/>.
- Intel 2009 Intel. Reducing Energy Use in Offices to Increase IT Sustainability. 2009.
- Intel 2010 Intel; SMD Board Assembly Process Recommendations, in Intel Manufacturing Enabling Guide, 2010.
- Intel 2013a Intel: 2nd Generation Intel® Core™ Processor Family Mobile, Thermal Design Guide for Embedded Applications, March 2013, Revision 003, 2013.
- Intel 2013b Mobile 3rd Generation Intel® Core™ Processor Family, Mobile Intel® Pentium® Processor Family, and Mobile Intel® Celeron® Processor Family Datasheet, Volume 1 of 2, June 2013.
- Intel 2013c CDP Water Disclosure 2013 Information Request.
- Intel 2013d Investor CDP 2013 Information Request.
- IPCC 2007 IPCC Fourth Assessment Report: Climate Change 2007.

- JRC 2014 Dodd N.; Wolf O. (JRC-IPTS) in cooperation with Graulich, K.; Groß, R.; Liu, R.; Manhart, A.; Prakash, S. (Öko-Institut e.V.); Development of European Eco-label and Green Public Procurement Criteria for Personal Computers & Notebook Computers, October 2014.
- Kaufhaus des Bundes 2014 Leistungsaufnahme von Computerendgeräten in der Bundesverwaltung, Datenlieferung am 06.11.2014
- Kaufhaus des Bundes 2015 Leistungsaufnahme von Computerendgeräten in der Bundesverwaltung, Datenlieferung am 13.03.2015
- KBSt 2004 Richtlinie zur Nutzungsdauer, Aussonderung und Verwertung von IT-Geräten und Software, Koordinierungs- und Beratungsstelle der Bundesregierung für Informationstechnik (KBSt), 2004
- Klöpffer & Grahl 2014 Klöpffer, W., Grahl, B.; Life Cycle Assessment (LCA): A Guide to Best Practice. John Wiley & Sons.
- Krishnan et al. 2008 Krishnan N; Boyd S; Somani A; Raoux S; Clark D; Dornfeld D ; A hybrid life cycle inventory of nano-scale semiconductor manufacturing. Environ Sci Technol 42(8), 2008.
- LCA to go 2013 EU FP7 Project „LCA to go – Boosting Life Cycle Assessment in Small and Medium Sized Enterprises“, Karsten Schischke, Janusz Sitek: Assessment of Printed Circuit Boards, 2013 (nicht veröffentlicht).
- Liu et al. 2012 Liu, R.; Brommer, E.; Gröger, J.; Top 100: PROSA – Externe Festplatten, Entwicklung der Vergabekriterien für ein klimaschutzbezogenes Umweltzeichen, Studie im Rahmen des Projektes "Top 100 – Umweltzeichen für klimarelevante Produkte", Gefördert durch: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), Berlin / Projektträger Jülich.
- Narahashi 2013 Narahashi, Hirohisa; Low Df Build-up Material for High Frequency Signal Transmission of Substrates, The 63rd Electronic Components and Technology Conference – ECTC, Las Vegas, Nevada, USA, 28.-31. Mai 2013.
- Nissen 2001 Nissen, N. F.; Dissertation: Entwicklung eines ökologischen Bewertungsmodells zur Beurteilung elektronischer Systeme; 2001.
- O’Connell & Stutz 2010 Steve O’Connell, Markus Stutz, Product Carbon Footprint (PCF) Assessment of Dell Laptop – Results and Recommendations, 2009; Sustainable Systems and Technology (ISSST), 2010 IEEE, ISBN: 978-1-4244-7094-5.
- Oberender 2006 Lothar Oberender, Leiterplatten-Grundlagen, 2006.
- Patterson 2012 Patterson, Deborah S.; Transforming Mobile Electronics with Copper Pillar Interconnect, Tutorial #121, in Advancing Microelectronics Mai/Juni 2012, Vol 39 No.3, Dezember 2012.
- PG GreenIT 2011 PG GreenIT. Verbindliche Vorgaben der Green-IT-Initiative des Bundes für Energieverbrauchsmessungen in der Bundesverwaltung. Handreichung. 2011.
- Prakash et al. 2012 Siddharth Prakash, Ran Liu, Karsten Schischke, Lutz Stobbe, Zeitlich optimierter Einsatz eines Notebooks unter ökologischen Gesichtspunkten, FKZ 363 01 322 des Umweltbundesamtes, Freiburg, 2011.

- Prakash et al. 2013 Siddharth Prakash, Ran Liu, Karsten Schischke, Lutz Stobbe, Schaffung einer Datenbasis zur Ermittlung ökologischer Wirkungen der Produkte der Informations- und Kommunikationstechnik (IKT) (UBA TEXTE 82/2013), Umweltbundesamt (Hrsg.) Dessau-Roßlau.
- Prakash et al. 2016 Prakash, S.; Stamminger, R.; Dehoust, G.; Gsell, M.; Schleicher, T.; Einfluss der Nutzungsdauer von Produkten auf ihre Umweltwirkung: Schaffung einer Informationsgrundlage und Entwicklung von Strategien gegen „Obsoleszenz“, Forschungskennzahl (UFOPLAN) 3713 32 315, Umweltbundesamt, Dessau.
- RAL-UZ 78a, 2012 RAL GmbH Vergabegrundlagen für Umweltzeichen. Arbeitscomputer (Desktop Computer, Integrierte Desktop Computer, Workstations, Thin Clients) RAL-UZ 78a.. Downloadbar unter http://www.blauer-engel.de/de/produkte_marken/produktsuche/produkttyp.php?id=578. Abgerufen am 2. Mai 2014.
- Rat der IT-Beauftragten 2013 Richtlinie zur Nutzungsdauer, Aussonderung und Verwertung von IT-Geräten und Software, Anlage zum Beschluss Nr. 2013/7 des Rats der IT-Beauftragten der Ressorts vom 6. Dezember 2013
- Renavikar et al. 2008 Renavikar, Mukul P. et al.: Materials Technology for Environmentally Green Micro-electronic Packaging, Intel Technology Journal, Volume 12, Issue 1, 2008.
- Rubtsov 2009 Artem Rubtsov, HDD from inside: Main parts; Web: http://hddscan.com/doc/HDD_from_inside.html; Zugriff: 15.10.2015
- Rüdenauer 2011 Rüdenauer, I.; Konzept zur Kommunikation von Lebenszykluskosten im Handel, Masterarbeit am Centrum für Nachhaltigkeitsmanagement (CNM) der Leuphana Universität Lüneburg.
- Sakai et al. 2011 Sakai, Taiji et al.; Cu-Cu Thermocompression Bonding using Ultra Precision Cutting of Cu Bumps for 3D-SIC, IMAPS Global Business Council Meeting and Device Packaging Conference, Scottsdale / Fountain Hill,s, AZ, 7.-10. März 2011.
- Sauter 2013 Sauter, Marc, Intel bereitet die Fab D1X für 450-mm-Wafer vor, <http://www.golem.de/news/prozessoren-intel-bereitet-die-fab-d1x-fuer-450-mm-wafer-vor-1308-100896.html>, 20.04.2014.
- Schischke et al. 2008 Schischke, K.; Soon, C.; Ahmad, M.; Nee, T.; Wan Hussein, W. M.; Ramasamy, R.; Lohsomboon, P.; Lecksiwilai, N.; Chintapanyasakun, V.; Noitachang, S.; Abdul Wahab, A.; Huat, T.; Jirasithithamrong, B.; Yong, N.; Leong, O.; Chandaeng, W.; Rodrigo, J.; Reichl, H. : Eco-Design, Energy Efficiency and Cleaner Production Strategies: SME Business Cases from Thailand and Malaysia, Electronics Goes Green 2008+, Berlin, 07.-10.09.2008.
- Schmidt 2011 Mario Schmidt, Heidi Hottenroth, Martin Schottler, Gabriele Fetzer, Birgit Schlüter: Life cycle assessment of silicon wafer processing for microelectronic chips and solar cells, International Journal of Life Cycle Assessment, 2011.
- Seagate 2011 Pulsar 2 SSD Product Life Cycle Analysis Summary, Seagate Technology LLC.
- Seagate 2012 Global Citizenship Annual Report, FY 2011, Seagate Technology LLC.
- Sematech 2013 Sematech Carbon Footprint Working Group: Review of Data Provided on Semiconductor Manufacturing in Schmidt/ Hottenroth/Schottler paper titled, "Life Cycle Assessment Of Silicon Wafer Processing For Microelectronic Chips

- And Solar Cells”, Diskussionspapier (unveröffentlicht), welches im Rahmen der Aktivitäten des Expertenkreise erstellt wurde.; 2013.
- Silicon Edge 2014 Silicon Edge; Die-per-Wafer Estimator, http://www.silicon-edge.co.uk/j/index.php?option=com_content&view=article&id=68, 25.04.2014.
- Statistisches Bundesamt 2013 Finanzen und Steuern: Personal des öffentlichen Dienstes, Fachserie 14, Reihe 6, Wiesbaden 2013.
- Stobbe et al. 2009 Lutz Stobbe, Nils F. Nissen, Marina Proske, Andreas Middendorf, Barbara Schломann, Michael Friedewald, Peter Georgieff, Timo Leimbach, 2009. Abschätzung des Energiebedarfs der weiteren Entwicklung der Informationsgesellschaft. Abschlussbericht an das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie. Bearbeitungsnummer I D 4 – 02 08 15 – 43/08. Fraunhofer-Institut für Zuverlässigkeit und Mikrointegration (IZM); Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (ISI), Berlin/Karlsruhe. 2009. <http://www.bmwi.de/DE/Mediathek/publikationen,did=305306.html> oder <http://www.bmwi.de/Dateien/BMWi/PDF/abschaetzung-des-energiebedarfs-der-weiteren-entwicklung-der-informationsgesellschaft,property=pdf,bereich=bmwi,sprache=de,rwb=true.pdf>. Abgerufen am 2. Mai 2014.
- Techpowerup, 2012 Techpowerup; Intel Haswell and Broadwell Silicon Variants Detailed, <http://www.techpowerup.com/177817/intel-haswell-and-broadwell-silicon-variants-detailed.html>, 24.06.2014.
- TechSearch 2014 TechSearch Int.; Advanced Packaging Update: Market and Technology Trends, Vol. 2, Austin, TX, Januar 2014.
- UNEP/ SETAC 2011 Towards a Life Cycle Sustainability Assessment – Making informed choices on products, UNEP/ SETAC Life Cycle Initiative, http://www.unep.org/pdf/UNEP_LifecycleInit_Dec_FINAL.pdf.
- Vardaman 2013 Vardaman, E. Jan; Emerging Trends in Flip Chip, TechSearch International, Inc.; in Electronics Design, Manufacturing & Test Symposium, 19.Juni 2013, Austin, TX.
- Western Digital 2012 Environmental Report, Fiscal Year 2011, Western Digital.
- WRAP 2011 Waste & Resources Action Programme (WRAP); Case study; Specifying durability and repair for Laptops – A case study of a Hewlett-Packard notebook to illustrate and encourage durability and repair of laptop computers, June 2011; <http://www.wrapcymru.org.uk/sites/files/wrap/Laptop%20case%20study%20AG.pdf>.
- Yole 2013 Yole Développement; Flip-Chip Market & Technology Trends, 2013 Business Update.
- ZVEI 2011 Russ, R.; Bipp, H.-P.; Jantschak, A.; Stiewe, M.; Cedzich, A.; Dietrich, M.: Abschlussbericht zur Selbstverpflichtung der Halbleiterhersteller mit Produktionsstätten in der Bundesrepublik Deutschland zur Reduzierung der Emissionen bestimmter fluoriertes Gase, ZVEI – Zentralverband Elektrotechnik und Elektronikindustrie e.V., Fachverband Electronic Components and Systems, Frankfurt, November 2011.

9 Danksagung

An der Erstellung dieser Studie haben Dr. phil. Lutz Stobbe, Karsten Schischke, Marina Proske und Hannes Zedel vom Fraunhofer-Institut für Zuverlässigkeit und Mikrointegration IZM mitgewirkt. Das Projektteam möchte ihnen an dieser Stelle einen ausdrücklichen Dank aussprechen.

10 Anhang

10.1	Anhang 1: Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse für Argon, Kaliumhydroxid, Stickstoff, N-Methyl-2-pyrrolidon und Sauerstoff	A1
10.2	Anhang 2: Dokumentation der Sitzung des Begleitkreises im AP 1 am 08. April 2013	A2
10.2.1	Tagesordnung der Sitzung des Begleitkreises im AP 1	A2
10.2.2	Protokoll zur Sitzung des Begleitkreises im AP 1	A4
10.2.3	Hintergrundpapier für die Beurteilung existierender Standards zum Energiebedarf von APC	A15
10.3	Anhang 3: Dokumentation der Sitzung des Begleitkreises im AP 2 am 19.06.2013	A21
10.3.1	Tagesordnung der Sitzung des Begleitkreises im AP 1	A21
10.3.2	Protokoll des Begleitkreises zum AP 2	A23
10.3.3	Hintergrundpapier „Comparative analysis of the use of office computer systems in public administrations in Germany in terms of their ecological and economic impacts“, UBA 2012	A30

Anhang 1: Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse für die ausgewählten Stoffe Argon, Kaliumhydroxid, Stickstoff, N-Methyl-2-pyrrolidon und Sauerstoff

Anteil des Argons am Gesamtergebnis der jeweiligen Wirkungskategorie (Sensitivitätsanalyse)

Argon	bei Berechnung mit Daten nach Schmidt et al. (2011)	bei Berechnung mit um den Faktor 1/10.000 niedrigeren Daten
Eutrophierungspotential (EP), CML2001	0,08%	0,00%
Treibhauspotential (GWP 100 Jahre), CML2001	0,07%	0,00%
Gesamt-Frischwasserverbrauch, inkl. Regenwasser, UBP 2006	0,03%	0,00%

Anteil des Kaliumhydroxids am Gesamtergebnis der jeweiligen Wirkungskategorie (Sensitivitätsanalyse)

Kaliumhydroxid (KOH)	bei Berechnung mit Daten nach Schmidt et al. (2011)	bei Berechnung mit um den Faktor 1/1.000 niedrigeren Daten
Eutrophierungspotential (EP), CML2001	0,81%	0,00%
Treibhauspotential (GWP 100 Jahre), CML2001	1,16%	0,00%
Frischwasserverbrauch, inklusive Regenwasser, UBP 2006	0,45%	0,00%

Anteil des Stickstoffs am Gesamtergebnis der jeweiligen Wirkungskategorie (Sensitivitätsanalyse)

Stickstoff (N ₂)	bei Berechnung mit Daten nach Schmidt et al. (2011)	bei Berechnung mit um den Faktor 1/1.000 niedrigeren Daten
Eutrophierungspotential (EP), CML2001	12,58%	0,01%
Treibhauspotential (GWP 100 Jahre), CML2001	12,15%	0,01%
Frischwasserverbrauch, inklusive Regenwasser, UBP 2006	5,43%	0,01%

Anteil des N-Methyl-2-pyrrolidons am Gesamtergebnis der jeweiligen Wirkungskategorie (Sensitivitätsanalyse)

N-Methyl-2-pyrrolidon	bei Berechnung mit Daten nach Schmidt et al. (2011)	bei Berechnung mit um den Faktor 1/100 niedrigeren Daten
Eutrophierungspotential (EP), CML2001	0,45%	0,00%
Treibhauspotential (GWP 100 Jahre), CML2001	0,11%	0,00%
Frischwasserverbrauch, inklusive Regenwasser, UBP 2006	0,02%	0,00%

Anteil des Sauerstoffs am Gesamtergebnis der jeweiligen Wirkungskategorie (Sensitivitätsanalyse)

Sauerstoff (O ₂)	bei Berechnung mit Daten nach Schmidt et al. (2011)	bei Berechnung mit um den Faktor 1/100 niedrigeren Daten
Eutrophierungspotential (EP), CML2001	0,50%	0,01%
Treibhauspotential (GWP 100 Jahre), CML2001	0,49%	0,00%
Frischwasserverbrauch, inklusive Regenwasser, UBP 2006	0,22%	0,00%

Tagesordnung des Begleitkreises zum Forschungsvorhaben

Ökologische und ökonomische Aspekte beim Vergleich von Arbeitsplatzcomputern für den Einsatz in Behörden unter Einbeziehung des Nutzerverhaltens (FKZ 3712 95 301)

Datum	Montag, 8. April 2013	
Uhrzeit	10:00 – 16:00 Uhr	
Adresse	Umweltbundesamt, Bismarckplatz 1, 14193 Berlin, Raum 1042 http://www.umweltbundesamt.de/uba-info/anreise.pdf	
TeilnehmerInnen	N.N. Vu, Huy Dr. Birkner, René Schmidt, Vanessa Hopfe, Christiane Dr. Lindloff, Karsten Riegel, Georg / N.N. Proske, Marina Henseling, Christine Bongart, Benjamin Schomaker, Gunnar Graulich, Kathrin Prakash, Siddharth Huckestein, Burkhard Janßen, Maike Köhn, Marina Dr. Kemper, Lars Dr.-Ing. Scheumann, René Schlösser, Alexander	Arbeitsagentur (angefragt) BAFIN BearingPoint GmbH Berliner Energieagentur Bundesverwaltungsamt, Kompetenzzentrum Green IT dena (angefragt) DeZem energy controlling GmbH Fraunhofer IZM IZT NABU Offis, FuE Bereich Energie Öko-Institut e.V. Öko-Institut e.V. Umweltbundesamt (UBA) UBA UBA Unilab Systemhaus GmbH TU Berlin TU Berlin
Moderation	Siddharth Prakash, Öko-Institut e.V.	
Protokoll	Öko-Institut e.V.	

Tagesordnung

TOP	Thema	Zeit
1	Begrüßung <i>Marina Köhn, UBA</i>	10:00 – 10:05
2	Vorstellungsrunde, Bezug zum / Erwartungen an das Forschungsvorhaben <i>Alle TeilnehmerInnen</i>	10:05 – 10:30
3	Vorstellung des Forschungsvorhabens <i>Siddharth Prakash, Projektleiter, Öko-Institut e.V.</i>	10:30 – 10:50
4	Ergebnisse der Energieverbrauchsmessungen an Arbeitsplatzcomputern im Umweltbundesamt <i>N.N., DeZem / Marina Köhn, UBA</i>	10:50 – 11:10
5	Allgemeine Rückfragen <i>Alle Teilnehmer</i>	11:10 – 11:30
6	Analyse der Nutzerprofile von Arbeitsplatzcomputern <i>Alexander Schlösser, TU Berlin</i>	11:30 – 12:30
7	Allgemeine Rückfragen <i>Alle Teilnehmer</i>	12:30 – 13:00
8	Mittagspause	13:00 – 13:45
9	Zusammenfassung der Ergebnisse des Vormittags und Einführung in die Diskussion <i>Alexander Schlösser, TU Berlin</i> Praxiserfahrungen aus anderen Einrichtungen / Forschungsprojekten <i>Impulsvorträge einzelner TeilnehmerInnen, angefragt</i> Diskussion zu TOP 6 <i>Alle Teilnehmer</i>	13:45 – 15:45
10	Zusammenfassung der Diskussion, Ausblick, Abschluss <i>Siddharth Prakash / Marina Köhn</i>	15:45 – 16:00

Protokoll des Begleitkreises zum Forschungsvorhaben

Ökologische und ökonomische Aspekte beim Vergleich von Arbeitsplatzcomputern für den Einsatz in Behörden unter Einbeziehung des Nutzerverhaltens (FKZ 3712 95 301)

Datum	Montag, 8. April 2013																																						
Uhrzeit	10:00 – 16:00 Uhr																																						
Adresse	Umweltbundesamt, Bismarckplatz 1, 14193 Berlin, Raum 1042 http://www.umweltbundesamt.de/uba-info/anreise.pdf																																						
TeilnehmerInnen	<table> <tr> <td>Vu, Huy</td> <td>BAFIN</td> </tr> <tr> <td>Dr. Birkner, René</td> <td>BearingPoint GmbH</td> </tr> <tr> <td>Schmidt, Vanessa</td> <td>Berliner Energieagentur</td> </tr> <tr> <td>Hintemann, Ralph</td> <td>borderstep</td> </tr> <tr> <td>Hopfe, Christiane</td> <td>Bundesverwaltungsamt, Kompetenzzentrum Green IT</td> </tr> <tr> <td>Stephanie Natho</td> <td>deZem energy controlling GmbH</td> </tr> <tr> <td>Istel, Katharina</td> <td>NABU (Vertretung für Benjamin Bongardt)</td> </tr> <tr> <td>Schomaker, Gunnar</td> <td>Offis, FuE Bereich Energie</td> </tr> <tr> <td>Erdelt, John</td> <td>UBA</td> </tr> <tr> <td>Huckestein, Burkhard</td> <td>UBA</td> </tr> <tr> <td>Dr. Kemper, Lars</td> <td>Unilab Systemhaus GmbH</td> </tr> <tr> <td>Dr.-Ing. Scheumann, René</td> <td>TU Berlin</td> </tr> </table> <table> <tr> <td colspan="2">Projektteam</td> </tr> <tr> <td>Proske, Marina</td> <td>Fraunhofer IZM</td> </tr> <tr> <td>Dr. Stobbe, Lutz</td> <td>Fraunhofer IZM</td> </tr> <tr> <td>Graulich, Kathrin</td> <td>Öko-Institut e.V.</td> </tr> <tr> <td>Schlösser, Alexander</td> <td>TU Berlin</td> </tr> <tr> <td>Janßen, Maike</td> <td>UBA</td> </tr> <tr> <td>Köhn, Marina</td> <td>UBA</td> </tr> </table>	Vu, Huy	BAFIN	Dr. Birkner, René	BearingPoint GmbH	Schmidt, Vanessa	Berliner Energieagentur	Hintemann, Ralph	borderstep	Hopfe, Christiane	Bundesverwaltungsamt, Kompetenzzentrum Green IT	Stephanie Natho	deZem energy controlling GmbH	Istel, Katharina	NABU (Vertretung für Benjamin Bongardt)	Schomaker, Gunnar	Offis, FuE Bereich Energie	Erdelt, John	UBA	Huckestein, Burkhard	UBA	Dr. Kemper, Lars	Unilab Systemhaus GmbH	Dr.-Ing. Scheumann, René	TU Berlin	Projektteam		Proske, Marina	Fraunhofer IZM	Dr. Stobbe, Lutz	Fraunhofer IZM	Graulich, Kathrin	Öko-Institut e.V.	Schlösser, Alexander	TU Berlin	Janßen, Maike	UBA	Köhn, Marina	UBA
Vu, Huy	BAFIN																																						
Dr. Birkner, René	BearingPoint GmbH																																						
Schmidt, Vanessa	Berliner Energieagentur																																						
Hintemann, Ralph	borderstep																																						
Hopfe, Christiane	Bundesverwaltungsamt, Kompetenzzentrum Green IT																																						
Stephanie Natho	deZem energy controlling GmbH																																						
Istel, Katharina	NABU (Vertretung für Benjamin Bongardt)																																						
Schomaker, Gunnar	Offis, FuE Bereich Energie																																						
Erdelt, John	UBA																																						
Huckestein, Burkhard	UBA																																						
Dr. Kemper, Lars	Unilab Systemhaus GmbH																																						
Dr.-Ing. Scheumann, René	TU Berlin																																						
Projektteam																																							
Proske, Marina	Fraunhofer IZM																																						
Dr. Stobbe, Lutz	Fraunhofer IZM																																						
Graulich, Kathrin	Öko-Institut e.V.																																						
Schlösser, Alexander	TU Berlin																																						
Janßen, Maike	UBA																																						
Köhn, Marina	UBA																																						
Moderation	Marina Köhn, UBA																																						
Protokoll	Kathrin Graulich, Öko-Institut																																						

TOP 1 Begrüßung

Marina Köhn begrüßt die Anwesenden und bedankt sich für die Teilnahme der Begleitkreismitglieder; sie stellt die Ziele des Umweltbundesamtes im Rahmen der IKT-Strategie vor und erläutert die Zielsetzung des spezifischen Forschungsvorhabens mit Blick auf die Gesamtzielsetzung.

TOP 2 Vorstellungsrunde

Siehe Teilnehmerliste.

TOP 3 Vorstellung des Forschungsvorhabens

Siehe Präsentation www.oeko.de/uba_oeko_apc/projektvorstellung.pdf

Top 4 Ergebnisse der Energieverbrauchsmessungen an Arbeitsplatzcomputern im Umweltbundesamt

Siehe Präsentation www.oeko.de/uba_oeko_apc/energiemessung.pdf

Anmerkung: Die Messungen der Firma deZem an 80 Arbeitsplatzcomputern (APC) im Umweltbundesamt haben im Rahmen eines separaten Projektes, beauftragt durch das UBA, stattgefunden. Die Messergebnisse werden für das vorliegende Forschungsvorhaben ausgewertet und verwendet.

Ziel der Messungen war es, quantitative Kenntnisse über die Energieverbräuche der Nutzung von APC zu erwerben. Darüber hinaus sollen unterschiedliche Profile identifiziert (z.B. Verwaltungspersonal ⇔ Wissenschaftler, mittlerer Dienst ⇔ höherer Dienst), das Verhältnis der Betriebsmodi untereinander bestimmt und Maßnahmen zur Energieeffizienzsteigerung für die Umsetzung im Umweltbundesamt abgeleitet werden.

Spezifika an den APC im UBA:

- Die Monitore schalten sich nach 10 Minuten Inaktivität automatisch aus (0 Watt)
- Die Sleep-Einstellung für die PCs ist sehr lang (90 min), so dass diese eigentlich nie zum Tragen kommt
- Im UBA sind 0 Watt-Netzteile installiert, so dass die PCs ausgeschaltet und außerhalb des Wartungsfensters (siehe nächster Punkt) keinen Strom verbrauchen.
- „Wartungsfenster“: damit die IT die APC-Geräte erreichen kann, ist von 8-18 Uhr ein so genanntes Wartungsfenster geschaltet, in dem die PCs vom 0 W-Off Mode in den „Wake on LAN“-Mode (WoL) mit ca. 1,6 W geschaltet werden.

- Monitore verfügen über einen Helligkeitssensor (Autobrightness): Die Messergebnisse des Monitors ergeben ein leicht wellenförmiges Profil, welches dem Tageslichtprofil folgt (wenn es heller wird, muss auch der Monitor heller werden, d.h. leicht höherer Energieverbrauch, siehe Folie 6)
- Eco-Mode: Die im UBA installierten Monitore verfügen über einen Eco-Mode; die Grundeinstellung dieses Modes (an oder aus) macht einen deutlichen Unterschied im Energieverbrauch aus (Folien 7+8). Es konnte nicht bei allen Monitoren überprüft werden, ob dieser eingeschaltet war, dies muss daher aus den Messergebnissen abgeleitet werden
- Ergebnisse der Messung:
 - Bei den Messungen an APC im UBA macht der Monitor ca. 60% vom Gesamtstromverbrauch aus. Die Energiespareinstellungen (Eco-Mode, Autobrightness) beeinflussen den Gesamtenergieverbrauch (Folie 10).
 - Der Energiebedarf des APC im UBA besteht überwiegend nur aus Grundlast. Diese ist kaum von der Last im Active-Mode zu unterscheiden (siehe Mittagspausen in den Folien 5+7). Die Prozesslast durch die eigentliche Nutzung liegt nur bei ca. 5-10% je Arbeitstag (Folie 10).
 - Unterschied zw. Standby (ca. 1,8 Watt) – Ruhemodus (ca. 1,8 Watt) - Schein-Aus (ca. 1,5 Watt) ist sehr gering und anhand der Energiekennwerte kaum zu identifizieren.
 - Nutzertypen korrelieren mit Laufbahngruppe. KollegInnen des höheren Dienstes zeichnen sich durch viele Unterbrechungen (Meeting, Telefonate, Berichte lesen) aus, wogegen eine unterbrechungsarme Arbeit am PC bei KollegInnen des mittleren Dienstes zu erkennen ist.
- Maßnahmen zur Energieeffizienzoptimierung: Neben den technischen Aspekten (Eco-Mode, Wartezeiten bis Standby usw. (Folie 13) ist die Nutzerakzeptanz für eine nachhaltige Änderung des Energieverbrauchs wesentlich, z.B. durch Integration der Bedienungsfreundlichkeit von energieeffizienten Optionen in den Diskurs mit den Herstellern/Designern (Folie 14).

TOP 5 Allgemeine Rückfragen

Thesen, warum im UBA der **Eco-Mode zum Teil nicht aktiviert** war:

- Monitore sind z.T. doch nicht so aufgestellt, wie ursprünglich beim Roll-out geplant war (Eco-Mode „off“ statt „on“);
- bei den Geräten befindet sich der Knopf für den Eco-Mode unterhalb des Monitors, relativ nahe am Power-off Knopf, so dass aus Versehen der falsche Knopf gedrückt werden kann;

- Eco-Mode „on“: erkennbar daran, dass die Leuchte grün statt blau erscheint - hierüber hat keine Aufklärung für die Nutzer stattgefunden.

Verhaltensänderungen aufgrund des Bewusstseins über die Messungen wurden versucht auszuschließen. Es wurde über einen Zeitraum von 3 Monaten gemessen, um übliche Routinen mit zu erfassen (Aufforderung zu Beginn der Messungen, dass das übliche Nutzungsverhalten explizit nicht geändert werden sollte); die Nutzer konnten ihre eigenen Profile einsehen und besondere Vorkommnisse kommentieren, was von einigen auch genutzt wurde und sehr hilfreich für die Auswertung war. Erfahrungen aus dem BMU zeigten jedoch auch, dass die dortige Messkampagne zu starken (kurzfristigen) Verhaltensänderungen führte. Jedoch war der Messzeitraum wesentlich geringer.

Die **Leistung der Monitore** liegt zwischen 30-70 W; lt. Hersteller bei Eco-Mode „on“: 47 W. Die großen Unterschiede kommen durch die Einstellungen Eco-Mode „on“ oder „off“ und die Helligkeitsautomatik zustande: an sonnigen, hellen Tagen verbraucht der Monitor mit Helligkeitsautomatik mehr, an trüben Tagen weniger; je nach Standort des Monitors (z.B. direkt unter einer Lampe) ist die Grundeinstellung des Monitors vergleichsweise heller => höherer Verbrauch.

Unterschiede zwischen Desktops und Notebooks konnten nicht eindeutig identifiziert werden. Die Messungen wurden an fest installierten Arbeitsplätzen (60 PCs, 20 Notebooks, die sich bei stationärer Arbeit jeweils in Dockingstationen befinden und mit separatem Monitor verbunden sind) durchgeführt. Es gab jedoch eine größere Unsicherheit durch eine Reihe von Fehlmessungen bei den Notebooks, so dass für die Notebooks kein vollständiges Nutzungsprofil abgeleitet werden konnte.

Die PCs im UBA sind mit wenigen Ausnahmen hinsichtlich der Hard- und Software gleich ausgestattet. Die Auswirkungen der Softwareausstattung wurden nicht untersucht, aber die Messwerte zeigen keine signifikanten Unterschiede. Die PCs haben ein ähnliches Energieniveau, vor allem auch im Hinblick darauf, dass der Active Mode sich kaum vom Idle-Mode unterscheidet.

Einige **Empfehlungen aus den Messergebnissen** sollen auf Wunsch der Amtsleitung des UBA direkt umgesetzt werden.

Top 6 Analyse der Nutzerprofile von Arbeitsplatzcomputern

Siehe Präsentation www.oeko.de/uba_oeko_apc/nutzerprofile1.pdf ¹

¹ Anmerkung: Die Zahlen in der Präsentation sind aktueller im Vergleich zum vorab versandten Hintergrundpapier, siehe www.oeko.de/uba_oeko_apc/hintergrundpapier.pdf

Top 7 Rückfragen

Unterschied zwischen Active- und Idle-Mode

Der Unterschied zwischen Idle- und Active-Mode erscheint nicht so groß. Anhand der Messkurven lässt sich jedoch nicht unterscheiden, wann der PC im Idle-Mode ist und wann nicht, lediglich der Status des Monitors lässt einen Rückschluss zu, ob der Rechner gerade aktiv genutzt wird. Der Vorschlag eines Teilnehmers zur Zusammenlegung der beiden Betriebsmodi lässt sich daher nicht umsetzen.

Energy Star verwendet einen **Faktor 1,2 zwischen Active- und Idle-Mode**; dieses Verhältnis trifft auch für die UBA-Messergebnisse zu.

Einsparpotenziale werden gesehen, wenn man die **Leistungsaufnahme im Idle/Active-Mode insgesamt verringern** könnte. Bei Servern gibt es z.B. deutlichere Unterschiede zwischen Active- und Idle-Mode. Vorschlag, dass mit der Industrie diskutiert werden sollte, ob es einen solchen technischen Trend auch bei PCs gibt. Bei neueren PCs sinkt der Idle-Mode noch einmal um ca. 10 W (abhängig vom Arbeitsspeicher). Der Prozessor in UBA-APCs ist jedoch bereits sehr energieeffizient.

Einfluss Monitor

Im UBA gibt es derzeit drei verschiedene Monitormodelle. Anteile an den APC-Messungen: überwiegend 22“-Monitore (CCFL-Backlight, d.h. höherer Verbrauch im Vergleich zu LED), ca. drei bis vier 24“-Monitore (LED-Backlight), ein 26“-Monitor.

Wenn im UBA neue Monitore beschafft würden, könnte die Leistungsaufnahme durch den **Wechsel der Technik von CCFL zu LED** um ca. 10 W sinken. Das Verhältnis des Energieverbrauchs zwischen PC und Monitor würde dann kippen.

Einfluss Nutzungsverhalten / Energieeinstellungen

Erfahrung, dass Lösungen, die Nutzern einen zusätzlichen Optimierungsspielraum geben, als zu kompliziert erachtet werden und dadurch Einspareffekte sogar konterkarieren. Die einzige praktikable Möglichkeit ist daher, die **Einstellung der Energieoptionen zentral** über das Rechenzentrum bereitzustellen. Nachteil ist, dass, dann die Optimierungspotenziale evtl. nicht vollständig ausgenutzt werden, z.B. weil einzelne APCs nicht in den Sleep-Mode versetzt werden dürfen und deshalb zentral alle APCs diese Option nicht nutzen können. Bei ausschließlich individuellen Einstellungen werden jedoch auch nicht alle Optimierungspotenziale genutzt.

Erfahrung im Bundesverwaltungsamt: Ursprünglich konnte jede/r die Einstellungen individuell vornehmen, dann wurde auf zentrale Regelung umgestellt; mittlerweile gibt es wieder die

Möglichkeit der individuellen Einstellung, jedoch mit gezielten Anregungen zu sinnvollen Einstellungen.

Eine Arbeitseinheit des UBAs (ca. $\frac{1}{4}$ der PCs) benötigt in der Regel eine Dauerverbindung zum Server, so dass für alle PCs die Möglichkeit zur Änderung vom Idle- in den Sleep-Mode (Mittagspause, Besprechungen) ausgeschlossen wird. Das UBA testet jedoch zur Zeit **Softwareprodukte mit intelligentem Power Managementsystem**, die selbst erkennen können, wann welcher Rechner nicht vom System getrennt werden darf.

Repräsentativität der UBA-Ergebnisse für allgemeine Empfehlungen

Sondersituation im UBA, z.B. hoher Anteil Teilzeitbeschäftigte, hohe Arbeitszeitflexibilität; November: hohe Arbeitsbeanspruchung, gleichzeitig Abwesenheiten durch Tagungen. Die Repräsentativität der Angaben wurde bei der Auswertung des Monats November insofern berücksichtigt, dass vornehmlich die APC ausgewertet wurden, die geringe zusätzliche **Fehltage** enthielten. Es gibt zwei Szenarien, um die Unterschiede darzustellen:

- Einfache Hochrechnung der Messdauer auf ein Jahr mittels Dreisatz.
- Hochrechnung von gemessenen Arbeitstagen und Nicht-Arbeitstagen mit der Anzahl von Werk- und Feiertagen nach der Vorschrift für die Bundesverwaltung

Neben den vergleichsweise energieeffizienten UBA-Rechnern werden in die Auswertungen und Ergebnisse des Forschungsprojekts andere, nicht so **effiziente Rechner** einbezogen, indem Messergebnisse aus einer anderen Behörde (Schein-aus z.B. 7 W anstelle 2 W durch ältere Technik) zur Verfügung gestellt und in die Auswertung miteinbezogen werden. Für aktuelle Technik liegen die UBA-Werte allerdings im Durchschnitt ihrer Leistungsklasse.

Zukunftsszenarien bezüglich sich ändernder Arbeitsprozesse (Office etc. wird in 5 Jahren vielleicht nur noch auf dem Server bereit gestellt werden, Stichwort „Software as a Service“). werden im laufenden Vorhaben noch nicht mit betrachtet.

TOP 8 Zusammenfassung Ergebnisse Vormittag, Einführung Diskussion

Siehe Präsentation www.oeko.de/uba_oeko_apc/nutzerprofile2.pdf

Optimierung der Hardware - Repräsentativität der homogenen PC-Landschaft beim UBA?

- BMU: ebenfalls sehr einheitliche PC-Struktur.
- Bundesagentur für Arbeit: sehr einheitliche Geräte, gleiche Hard- und Softwarespezifikation (da jeder Arbeitsplatz genau die gleichen Anforderungen an die Arbeitsaufgaben hat).
- BVA:

- sehr heterogene PC-Landschaft, da z.T. sehr unterschiedliche Fachanwendungen zum Einsatz kommen
- oft 2, teils 3 Monitore pro Arbeitsplatz
- Berater nur Laptop, den sie an den externen Monitor anschließen
- keine automatische Nachtabschaltung, die Mehrheit der Mitarbeiter schaltet ihre Geräte aber abends aus.
- An der Uni Paderborn wurden 4 Nutzergruppen unterschieden:
 - „Poolraum“: Umwandlung Desktop PCs in Virtual Desktop;
 - „Verwaltung“: minimale Standardausstattung;
 - „Mobile User“;
 - „Power User“: nur ca. 2-3% => mehrere Monitore, hohe Grafikkarte o.ä., Gruppe ist in sich sehr heterogen
- Beim Forschungsinstitut OFFIS:
 - Laptop + Monitor ist bei 90% der Mitarbeiter Standard;
 - Zusätzlicher Desktop nur bei speziellen Hardwareanforderungen;
 - Laptop: in der Regel 2 Akkus (1 im Notebook, 1 in der Dockingstation; Nachteil: die Akkus altern sehr stark, da sie bei Netzbetrieb ständig geladen werden); der Einsatz von Notebooks wurde begründet, weil sehr viele Besprechungen / Vorträge gehalten werden müssen; lokale Datenhaltung, weil die Sorge um den Verlust der Forschungsergebnisse unter den Wissenschaftlern sehr groß ist; jeder lädt Handy an der Docking Station, plus USB-Platte;
 - Management-Ebene hat Thin Clients (IGEL) plus Tablets für die mobile Nutzung, ca. 10 Test User; Daten werden alle serverseitig gemanagt, d.h. kein Verlust der Daten bei Geräteverlust; reine Kosten-Nutzen-Entscheidung, nicht Energieeffizienz als Beweggrund.

Vermutung, dass in Bundesbehörden insgesamt eine homogenere Ausstattung machbar wäre, da es in der Regel alle 3 bis 5 Jahre einen Hardwareaustausch plus zunehmende Standardisierung gibt.

Das UBA hat drei klassische Aufgabenprofile: Forschungsarbeit, permanente Labortätigkeit und Verwaltungstätigkeit, daher zum Teil permanente 24h Verfügbarkeit (Datenbanken für die Messstationen); eine **Clusterung der Nutzungsprofile für die Hardware-Ausstattung** zu bilden, um Thin-Client einzuführen, kann bei den nächsten Hardware-Rollouts diskutiert werden.

Einfluss von Nutzungsprofilen

Uneinigkeit besteht bei den Anwesenden darüber, ob die Nutzungsprofile des UBAs so typisch sind und Erkenntnisse auf andere Behörden übertragbar wären, die beispielsweise in Beschaffungsvorgänge einfließen könnten.

Einerseits wird argumentiert, dass sich die Verteilung der spezifischen Betriebszustände aus diesem Forschungsprojekt auf Beschaffungsleitlinien auswirken könnte, d.h. ob man bei der Geräteauswahl eher auf einen niedrigen Standby-Wert oder einen niedrigen Idle-Wert achtet.

Andererseits besteht die Erfahrung, dass die genauen Nutzungsprofile für die Identifizierung von Einsparpotenzialen irrelevant sind, weil das allgemeine Vorgehen ist, Geräte mit möglichst geringer Leistungsaufnahme im Idle/Active zu kaufen. Es sollte vielmehr Wert darauf gelegt werden, wann immer möglich die Geräte aus dem Idle-Mode in einen niedrigeren Energiemodus zu versetzen.

Wenn am Markt allerdings etwas bewegt werden soll, müssten die Anforderungen *jetzt* schon veröffentlicht werden, damit die Anbieter sich daran orientieren und ggf. so umstellen können, dass sie den Werten aus der Ausschreibung möglichst nahe kommen.

Unterschiedliche Nutzungsprofile (standard, power, mobile) erscheinen wichtig bzgl. der Entscheidung, welche Geräteausstattung man zur Verfügung stellt. Bezüglich der Software (Office, Datenbanken) haben sich APC in den letzten 5 Jahren jedoch kaum geändert, so dass davon ausgegangen wird, dass Nutzungsmuster diesbezüglich weitgehend bestehen bleiben. Beachtet werden sollte, dass die Nutzungsprofile in Verwaltungen generell noch nicht die Potenziale für mobile Tätigkeiten abdecken, die durch flexiblere Arbeitszeiten und -orte künftig relevanter werden.

Optimierung der Software

Unabhängig von der Hardware sollte auch die Software effizienter werden, da sie **hohe Speicherkapazitäten** (Word: 1GB RAM) benötigt, so dass die Hardware automatisch immer nachziehen muss. Zwar nimmt der Trend zu, Software in immer kleinere „Bausteine“ zustückeln, durch z.B. Cloud / Apps (geringere Leitungskapazität, Verlagerung zu mobilen Endgeräten), aber gleichzeitig benötigt die Software **zusätzliche Kapazitäten für mobile Sicherheitseinstellungen** (Overhead an Energie).

Schwierigkeiten durch Softwaremonopolisten in Verwaltungen, die bestimmen, ob und wie ein Energiemanagement genutzt werden kann (z.B. gibt es Software, die das Vorhandensein von 24“-Monitoren fordert, so dass 19“-Monitore nicht mehr kompatibel sind).

Optimierung durch Netztrennung

Zwischen der UBA-Messung und dem ISI-Berechnungsmodell gibt es einen Unterschied in der zeitlichen Verteilung von Schein- aus und Netztrennung: ISI geht davon aus, dass im Schnitt weniger häufig wirklich vom Netz getrennt wird; durch die im UBA eingesetzten Null-Watt-Netzteile ist dieser Anteil in der UBA-Messung deutlich höher (s. Präsentation Folie 5).

Den Null-Watt-Mode könnte theoretisch jeder APC erreichen, ist jedoch nicht Standard. Praxiserfahrungen:

- BAFIN / IZM: Rechner werden nicht vom Stromnetz getrennt;
- BMU: manuell abschaltbare Tischsteckdosen, ca. 75-80% nutzen es; Schwierigkeiten, wenn abgeschaltet, aber zentrale Updates erfolgen sollen (WoL erforderlich)
- Bundeskanzleramt: ab 21 Uhr Warnmitteilung auf den PCs, danach wird zentral vom Netz getrennt.
- Offis: „Putzfrauen-Auftrag“, diese achten am Ende des Tages darauf, dass Geräte abgeschaltet sind.

Zusatzoption zur Vergrößerung der Energieeinsparung, wenn nachts zusätzlich die Netzwerk-Switche (1-2 W) ausgeschaltet würden.

Optimierung durch Steigerung der Nutzungsintensität

Erfahrungen zeigen, dass die Nutzungsintensität (Active-Mode) im Laufe der Jahre nicht angestiegen ist, der Active-Mode macht zeitlich nur 10% aus (lange Wochenend-/Feiertags-/Urlaubsphasen). Die Geräte (auch Server für Thin Clients) sind jedoch immer auf den potenziellen Maximalfall ausgelegt, um Eventualitäten und Peaks abdecken zu können, es besteht also eine grundsätzliche Überdimensionierung, die i.d.R. nicht benötigt wird. Besser wäre ein **intelligentes Zeitmanagement**, das z.B. nutzungsintensive Programme / Prozesse / Simulationen auf Zeiten der Schwachauslastung schiebt.

Hohes Einsparpotenzial wird durch folgende Lösungen gesehen: **Anzahl der Geräte insgesamt reduzieren** bzw. **Nutzungsauslastung** der Geräte **intensivieren**; z.B. auch private Nutzung dienstlicher Geräte zulassen bzw. das umgekehrte Modell (**bring your own device**), um **Tendenz zu Zweitgeräten** zu **vermeiden**. Wird dies zunehmend über mobile Geräte gelöst, müsste jedoch bei Lebenszyklusbetrachtungen berücksichtigt werden, dass Notebooks insgesamt eine geringere Lebensdauer als Desktops haben.

Optimierung durch Verlängerung der Lebensdauer

In der Verlängerung der Lebensdauer der Geräte wird ein weiteres, entscheidendes Einsparpotenzial gesehen (**Speicherupgrades, Weiternutzung noch funktionierender Altgeräte** o.ä.).

Schwierigkeiten gibt es jedoch bei den Dienstleistungsverträgen in den Verwaltungen, die Neuanschaffungen anstelle von Updates aufgrund von Garantiebeschränkungen erzwingen. Diese Praxis wird bestätigt, da Systemhäuser an neuen Produkten verdienen wollen (eigentlich machbar: 3 Jahre Wartungszeitraum plus 2 Jahre Vorhalten von Ersatzteilen, theoretisch auch ausdehnbar auf insgesamt 6-7 Jahre).

Trend zu mehreren Monitoren am Arbeitsplatz?

Praxiserfahrungen:

- BMU: im Schnitt 1,25 Monitore pro Arbeitsplatz (5 Monitore auf 4 Arbeitsplätze, Trend geht hin zu 6 auf 4); wird mit Fachanwendungen begründet (Datenbank plus Dokumente, die parallel genutzt werden müssen).
- TU Berlin: 2 alte 19“ Monitore statt 1 neuem 23“ Monitor (dies ist rein kosten-getrieben, da keine Mittel für Neubeschaffung größerer Monitore vorhanden waren)
- UBA: 24“-Monitore wurden angeschafft, um nebeneinander 2 Dokumente lesen zu können, trotzdem geht der Trend mittlerweile zum Zweitmonitor.

Als wichtig wird erachtet, Anforderungen zu definieren an eine Genehmigung für die Nutzung von 2 Monitoren an einem Arbeitsplatz, d.h. ab wann ist es wirklich erforderlich und sinnvoll.

Der Bedarf nach einem Zweitmonitor wird z.T. in schlecht programmierter Software begründet gesehen, da Fenster von bestimmten Anwendungen nicht minimierbar sind. Durch Anwendbarkeit der „Wischtechnologie“ analog zu mobilen Anwendungen könnte der Trend zu Zweitmonitoren evtl. verringert werden. Optimierungspotenzial besteht, wenn z.B. bei Bedarf phasenweise **Zweitgeräte zum Ausleihen** zur Verfügung gestellt werden

1.2 Impulsreferat Dr. René Birkner

Im BMU wurde die Hardware im Rechenzentrum nach 7 Jahren komplett ausgetauscht (Storage, Server, jedoch nicht die Netzinfrastruktur); ein Roll out / Austausch der Arbeitsplatzcomputer läuft gerade an (regulär, nach 5 Jahren). Außerdem Softwaresystemwechsel auf Windows 7; dazu wurden ca. 5% der Geräte bzgl. des Arbeitsspeichers nachgerüstet. Zur Zeit wird das alte RZ-System noch komplett parallel betrieben, u.a. für Vergleichsmessungen.

Darüber hinaus wird eine virtuelle Desktop-Infrastruktur getestet. Dazu sind seit Mitte 2012 50 Zero Clients im Feldbetrieb auf alle Standorte des BMU verteilt. Zero Client = Bildschirm, der nur mit RDP-Signal direkt in Bildsignal umgesetzt, kein PC, keine Intelligenz im Arbeitsplatz-Endgerät; nur 2 W höhere Leistungsaufnahme als konventioneller Monitor. Zwei Server (RX300 Fujitsu ist der TC) stehen für die Thin Clients zur Verfügung. Ein Server hat durchschnittlich 25 Clients, ist jedoch nicht ausgelastet. Die Kapazität durch beide Server

wird auf 100 Clients geschätzt (50 Clients pro Server), was jedoch kontrovers diskutiert wurde.

Optimierung durch intelligente Lastverteilung?

Aus den Joulex-Messungen im BMU ist bekannt, dass maximal 75% der Nutzer gleichzeitig aktiv sind, so dass man Server für nur 75% der PC-Kapazität einsetzen müsste. Wenn die Kapazität doch nicht ausreichen würde, könnte man um 1 oder 2 Blades aufrüsten. Für einen energieeffizienten Betrieb wäre es interessant, einzelne Server vom Netz zu nehmen, z.B. in den Abendstunden oder nachts, wenn nur noch wenige Nutzer aktiv sind, aber trotzdem insgesamt die Verfügbarkeit sicherzustellen ist (dynamische Verteilung mit Ausfallsicherheit für Anwendungen, die immer laufen müssen). Der Energieverbrauch wäre immer noch zu hoch, wenn z.B. nur für 3 Nutzer ein kompletter Server und Infrastruktur laufen müsste, hier wären Einzel-APCs ggf. effizienter.

Derzeit ist eine intelligente Lastverteilung für Rechenzentren in der Praxis noch nicht umgesetzt. Es laufen jedoch Forschungsprojekte (z.B. „AC4DC“) zum Thema, die zeigen sollen, dass „atmende“ Rechenzentren funktionieren. Verwaltungen eignen sich für diese Lösungen gut, da sie berechenbarer sind (Vorhersagbarkeit, Migrierbarkeit).

Optimierung durch Nutzung von Zero Clients?

Die in der Präsentation vorgestellten absoluten Zahlen für den Energieverbrauch und das vergleichsweise hohe Einsparpotenzial durch Zero Clients werden durch einige TeilnehmerInnen angezweifelt, da sie anscheinend nicht den Anteil der Infrastruktur / des Rechenzentrums enthalten.

Ebenso die Annahme von 50 Thin Clients pro Server stieß auf starke Skepsis, da Praxiserfahrungen (u.a. aus dem Projekt GreenPad) zeigen, dass ab 40 Clients pro Server die Latenzzeiten stark ansteigen, auch wenn die Auslastung der CPU noch nicht erreicht ist.

Die Hauptfrage für die Lebenszyklusbewertung von Thin Client-Lösungen ist, wie hoch der **Herstellungsaufwand und die Energieeffizienz von Servern im Vergleich zu PCs** ist. Erst wenn dies bilanziert ist, kann aus Lebenszyklussicht eine konkrete Aussage und Empfehlung getroffen werden, z.B. ab wann es sich lohnt, 1 Server statt xy Desktop PCs zu nutzen. Einigkeit bei den TeilnehmerInnen bestand darin, dass diese Frage nur mit einer ganzheitlichen Betrachtung (Lebenszyklusbetrachtung) beantwortet werden kann. Hierzu besteht noch großer Forschungsbedarf, denn es müssen Aspekte wie unterschiedliche Herstellung, Lebensdauer, Entsorgung, Auslastung, notwendige Infrastruktur wie Klimaanlage etc. mitbetrachtet werden.

--- Ende der Veranstaltung ---

Ökologische und ökonomische Aspekte beim Vergleich von Arbeitsplatzcomputern für den Einsatz in Behörden unter Einbeziehung des Nutzerverhaltens (Öko-APC)

**Hintergrundpapier für die Beurteilung existierender Standards zum Energiebedarf
von Arbeitsplatzcomputern**

**Vorbereitende Unterlage für die Teilnehmerinnen und Teilnehmer
der Begleitkreissitzung für das Ufoplanvorhaben (FKZ 3712 95 301)
am 8. April 2013 in Berlin (UBA, Bismarckplatz)**

Hintergrund

Der Hintergrund für die Analyse der aktuellen Standards ist die Arbeitsthese: „**Die aktuell existierenden und verwendeten Messkonzepte bilden nicht die reale Leistungsaufnahme für Arbeitsplatzcomputer ab.**“ Die heutigen Messstandards sind zu ungenau und berücksichtigen nicht die lastadaptive Leistungsaufnahme aktueller Arbeitsplatzcomputer (APCs). Ebenso wird davon ausgegangen, dass die Fortschritte im Power Management zu einem geringeren Energieverbrauch führen als der heute durchschnittlich berechnete.

Das Projekt Öko-APC hat daher unter anderem die Zielsetzung, die existierenden Messkonzepte auf ihre Anwendbarkeit für aktuelle APCs zu untersuchen, um bei Bedarf Ansätze für eine Novellierung der Methoden zu erarbeiten.

Herausforderung

Die Berechnung des Leistungsbedarfs für APCs ist heute überwiegend durch das Berechnungskonzept TEC (Typical Energy Consumption) des Energy Star geprägt. Basierend auf diesem TEC wird zur Bewertung verschiedener PCs nicht die Leistungsaufnahme einzelner Betriebszustände sondern ein berechneter Jahresenergieverbrauch verglichen. Alle weiteren am Markt befindlichen Standards nutzen dessen Berechnungsgrundlage als Grundlage für zum Teil eigene leicht modifizierte Messkonzepte.

Anders als für Computer existiert für heutige Displays im Energy Star kein Berechnungskonzept, welches den Energiebedarf auf Grundlage eines Nutzungsszenarios hochrechnet. Unter der Annahme, dass heutige Computer strengere Power-Management-Einstellungen haben, gehen wir davon aus, dass auch der Monitor stärker an einen lastadaptiven Betrieb gekoppelt ist. Ein oft verwendetes Nutzungsmuster, in dem der Monitor mit einer täglichen Nutzungszeit von 7 Stunden in einem aktiven Modus ist, wird in diesem Zusammenhang als zu hoch eingeschätzt.

Im UBA wurde 2012/2013 über einen Zeitraum von drei Monaten an 80 ausgewählten Arbeitsplätzen der Energiebedarf von Computern, Notebooks und Monitoren gemessen. Auf Basis der gemessenen Energieverbräuche sollen die bislang verwendeten Berechnungsmodelle, mit deren Annahmen für Nutzungszeiten und Bewertung der verschiedenen Betriebszustände mit den tatsächlich gemessenen Werten validiert werden. In einem direkten Vergleich zwischen der TEC-Berechnung von Energy Star und dem gemessenen Leistungsbedarf der APCs wurde eine Analyse der Nutzungsprofile und Messkonzepte vorgenommen. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse und Schlussfolgerungen werden auf dem ersten Treffen des Begleitkreises am 08. April 2013 vorgestellt und diskutiert.

Auswertung/Vergleich verschiedener Mess-/Berechnungsstandards

Im Rahmen des Projektes fand ein Screening bestehender Methoden und Standards zur Berechnung des typischen Energieverbrauchs eines PCs in Büronutzung statt. Folgende Methoden wurden unter anderem verglichen:

- Energy Star: Gültige Version 5 (v5), Version 6 Entwurf 3 (v6)¹
- ECMA 383²
- Fujitsu-eigene Methode³
- Verteilungsschlüssel nach EuP-Vorbereitungsstudie für PCs (EuP Los 3)
- Berechnung für Bundesverwaltungen nach ISI 2005⁴

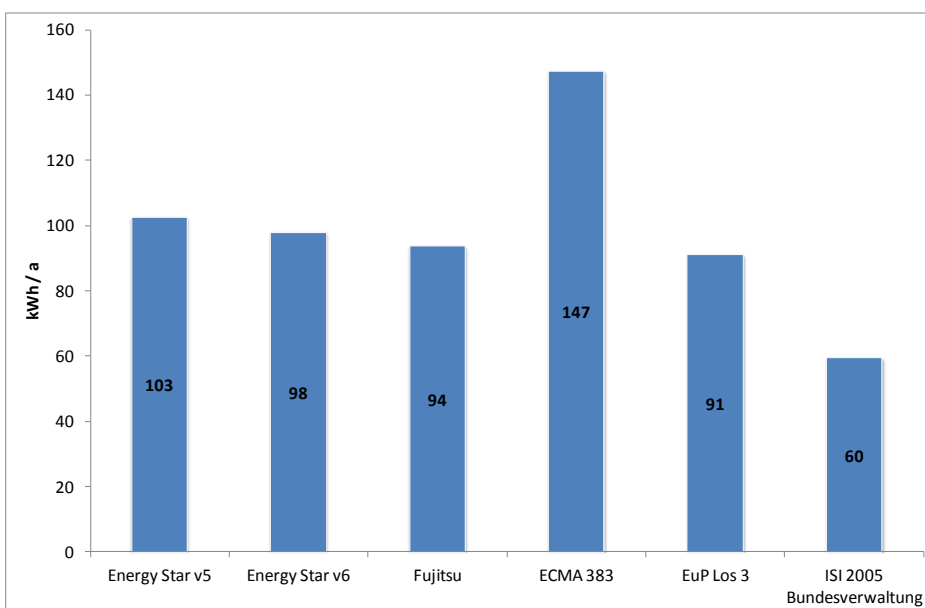


Abbildung 1: Vergleich des jährlichen Energieverbrauch auf Basis unterschiedlicher Berechnungsvorschriften

Die Abbildung 1 zeigt den jährlichen Energieverbrauch des im UBA verwendeten PCs basierend auf den oben genannten Methoden. Für die Berechnung wurden die Energieverbrauchswerte des Herstellers (Datenblatt) für den im UBA überwiegend verwendeten PC genutzt. Die genauen Berechnungsmethoden sind in der Tabelle 1 am Ende dieses Dokumentes hinterlegt.

Der Unterschied der Ergebnisse beruht im Wesentlichen auf unterschiedlichen Annahmen für die Verweildauer in den einzelnen Modi (siehe Abbildung 2).

Im Bezug zu Energy Star v5 wurden folgende wesentliche Unterschiede identifiziert, die den jährlichen Energieverbrauch wesentlich beeinflussen:

¹ <https://energystar.gov/products/specs/node/143>

² Standard ECMA 383: Measuring the Energy Consumption of Personal Computing Products, online: <http://www.ecma-international.org/publications/files/ECMA-ST/ECMA-383.pdf>

³ Datenblatt zu den überwiegend im UBA verwendeten PC mit Hinweis auf die Berechnung des jährlichen Energieverbrauchs: White Paper – Energy Consumption ESPRIMO E7936 0-Watt, online: <http://globalsp.ts.fujitsu.com/dmsp/Publications/public/wp-energy-ESPRIMO-E7936-0Watt.pdf>

⁴ Handreichung: Verbindliche Vorgaben der Green-IT-Initiative des Bundes für Energieverbrauchsmessungen in der Bundesverwaltung, online: http://www.cio.bund.de/SharedDocs/Publikationen/DE/Innovative-Vorhaben/green-it_handreichung_energieverbrauchsmessung_download.pdf?__blob=publicationFile

- Energy Star v6 unterscheidet zwei verschiedene Idle-Modi und eine kürzere Verweildauer im Sleep-Mode. Da die Verweildauer im Idle-Mode jedoch gleich bleibt, wird der Gesamtenergieverbrauch dadurch kaum beeinflusst.
- Fujitsu hat in seiner Berechnung einen Active-Mode einbezogen. Es wird jedoch von 260 statt 365 Tagen Nutzung pro Jahr ausgegangen, was zu geringeren Werten führt.
- ECMA nimmt eine sehr lange tägliche Nutzung (12h/d) über das komplette Jahr an.
- ISI/Bundesverwaltung unterscheidet die Nutzung in „angepasste Werktage“ (203 Tage pro Jahr) und „angepasste Wochenend- und Feiertage“ (162 Tage pro Jahr). Gleichzeitig enthält sie als einzige Methode Zeiten in denen von einer Netztrennung ausgegangen wird. Dies führt zu einem vergleichsweise geringen Energieverbrauch.

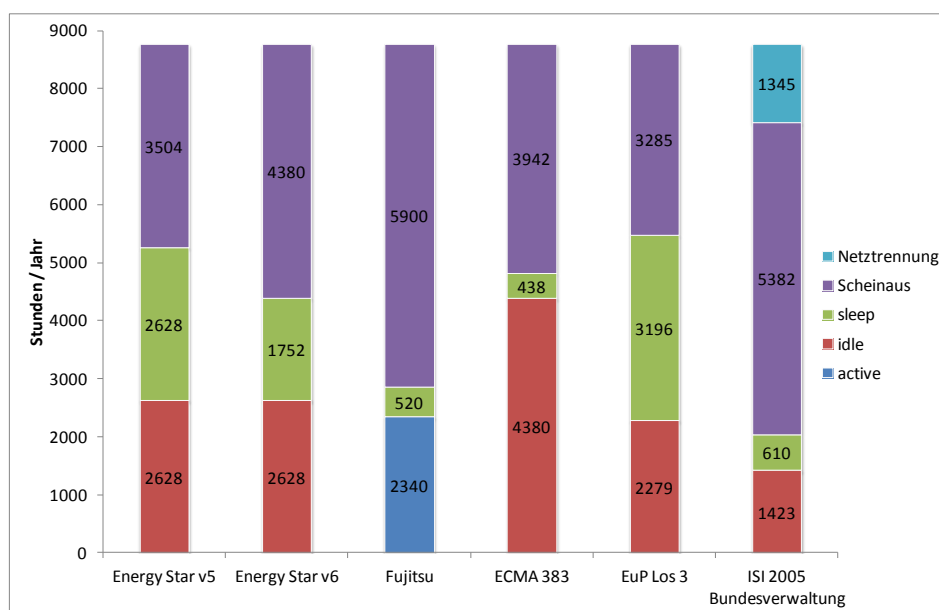


Abbildung 2: zeitliche Verteilung der Betriebsmodi nach unterschiedlichen Berechnungsmethoden

Auswertung der Messungen (vorläufige Ergebnisse)

Im UBA wurde der Energieverbrauch von 80 Arbeitsplatzcomputern inkl. Monitor gemessen. Dabei zeigte sich, dass – wie erwartet – das Nutzungsmuster in der Realität stark variiert. Überraschend zeigt sich aber auch, dass die Leistungsaufnahme im Idle-Mode von der Herstellerangabe abweicht. In Abbildung 3 sind zum Vergleich die verschiedenen Jahresverbräuche (PC + Monitor) dargestellt nach:

- Energy Star Datenblatt: Berechnung nach Energy Star-Nutzungsmuster mit Herstellerangaben für die Leistungsaufnahme
- Energy Star Messung: Berechnung nach Energy Star-Nutzungsmuster (v5) mit real gemessener Leistungsaufnahme
- UBA 3 Monate Ø: Gemessener Energiebedarf extrapoliert vom Messzeitraum (3 Monate) auf ein Jahr
- UBA 1 Monat, 203 Tage: Der in einem Monat gemessene Energiebedarf wurde hochgerechnet auf ein Jahr entsprechend der Verteilung nach Berechnungsgrundlage für die Bundesverwaltung (an Arbeitstagen gemessener Energiebedarf => 203 „angepasste Werktage“; an Nicht-Arbeitstagen gemessener Energiebedarf => 162 „angepasste Wochenend- und Feiertage“).

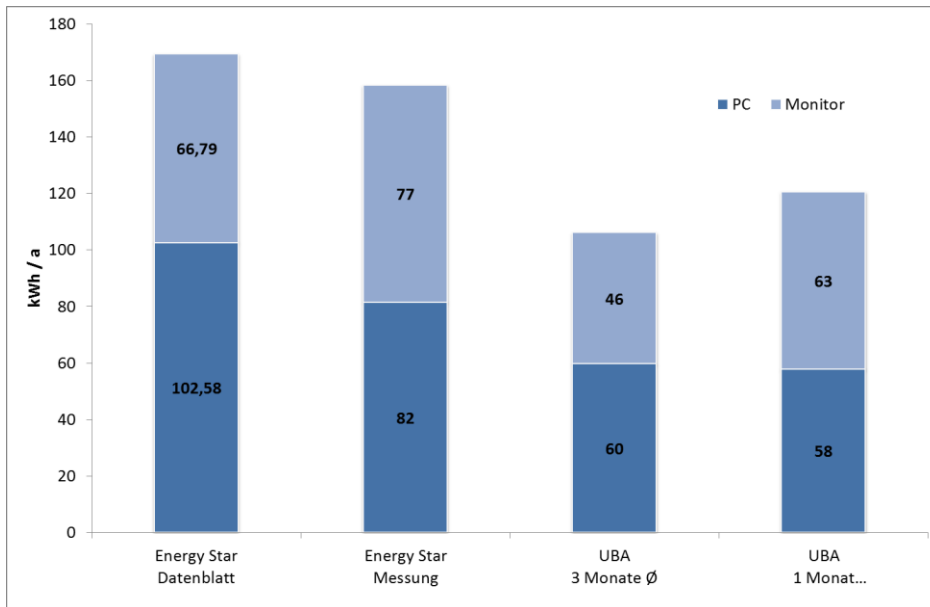


Abbildung 3: Vergleich des jährlichen Energiebedarfs nach der Berechnung von Energy Star gegenüber den realen Messungen im UBA

Die Ergebnisse zeigen, dass die realen Verbräuche deutlich unterhalb der Berechnung nach Energy Star v5 liegen. Die Berechnung nach ISI 2005/Bundesverwaltung (siehe Abbildung 1) entspricht sehr viel besser den real gemessenen Verbräuchen.

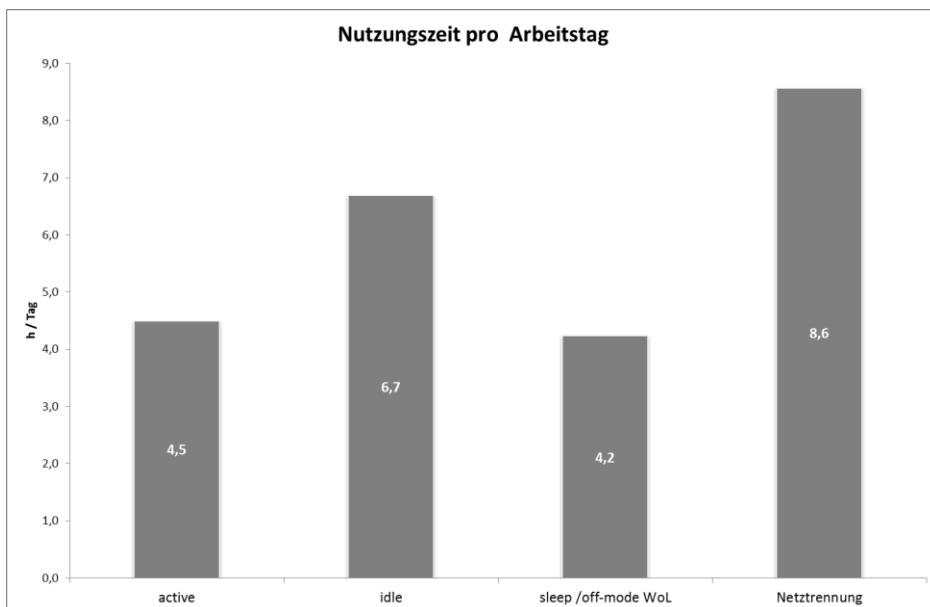


Abbildung 4: Vergleich der täglichen Nutzungszeit nach Betriebsmodi für die Arbeitstage

In Abbildung 4 zeigen die aus mehreren APCs gemittelten Nutzungszeiten pro Betriebsmodi, dass die Computer eine relative hohe aktive Phase haben, die sich aus der Zeit für „active“ und „Idle“ zusammensetzt. Der in Abbildung 3 ermittelte niedrige Energieverbrauch gegenüber dem Energy Star ist somit in erster Linie auf die jährlich geringere Nutzungszeit (weniger Werktage) zurückzuführen.

Diskussion

Folgende **Fragestellungen** möchten wir gerne mit Ihnen auf der Begleitkreissitzung diskutieren:

- Welche Energiesparoptionen und -ansätze werden in Behörden und Unternehmen genutzt?
 - Sind automatische Energiesparmodi/Powermanagement voreingestellt?
 - Nutzen Sie 0 Watt-Netzteile?
 - Gibt es andere Maßnahmen zur energieeffizienten Nutzung?
- Annahme: Die Anzahl der genutzten Monitore steigt pro Arbeitsplatz?
 - Sehen Sie einen Trend zur parallelen Nutzung mehrerer Monitore in Ihrer Behörde?
 - Werden Notebooks im stationären Betrieb mit zusätzlichem Monitor genutzt?
 - Wie viele Monitore werden im Durchschnitt genutzt?
- Wird sich der typische APC vom Desktop zum Notebook verschieben?
 - Sehen Sie Ansätze dazu in Ihrer Behörde?
 - Wie ist das Verhältnis der Anzahl von PCs zu Notebooks?
 - Nach welchen Kriterien erhalten Mitarbeiter Notebooks anstatt PCs (bei häufigen Dienstreisen, bei mobilem Arbeiten/Telearbeit, generell als Ersatz zum PC)?
- Werden in Ihrer Behörde Thin Clients genutzt?
- Ist die Annahme für die tägliche effektive APC-Arbeitszeit im UBA auf andere Behörden übertragbar?
- Werden Messstandards für die Ableitung von Beschaffungskriterien genutzt?

Ansprechpartner

Marina Köhn
Umweltbundesamt, Beratungsstelle
Green IT
06844 Dessau, Wörlitzer Platz 1
Tel.: ++49-(0)340-2103-2565
Fax: ++49-(0)340-2104-2565
Email: marina.koehn@uba.de

Siddharth Prakash
Öko-Institut e.V.
Bereich Produkte und Stoffströme
Merzhauserstraße 173,
79100 Freiburg
Tel: +49-(0)761-45295-244
Fax: +49-(0)761-45295-288
Handy: +49-160-907 970 35
Email: s.prakash@oeko.de

Alexander Schlösser
Technische Universität Berlin
Forschungsschwerpunkt Technologien
der Mikroperipherik
Abt. Sustainable Technologies
Gustav-Meyer-Allee 25,
13355 Berlin
Tel: +49 (0)30/ 46403-771
Email: alexander.schloesser@tu-berlin.de

Tabelle 1: Kurzbeschreibung der Betriebsmodi und Berechnungsformeln der unterschiedlichen Methoden

	Berechnungsformel	Active	Idle	Sleep (S3)	Ruhezustand (S4)	Off-Mode/Schein-aus (S5)
Definitionen		Zustand indem der Rechner aktiv genutzt wird	Zustand, in dem das Betriebssystem und andere Software vollständig geladen ist (Start by default), aber keine aktive Nutzung stattfindet.	Ein "Low Power"-Zustand, der bei Inaktivität automatisch erreicht werden kann. Die Aufwachzeit beträgt dabei ≤ 5 Sekunden (suspend to RAM).	Mit dem Ruhezustand ist ein Low Power-Zustand gemeint, bei dem der Inhalt des Arbeitsspeichers auf die Festplatte geschrieben wird (suspend to disk). Dieser Zustand wird auch Hibernation genannt.	Niedrigster Low Power-Zustand, der vom Nutzer ohne Netztrennung erreicht werden kann.
Energy Star v5	Desktop/Notebook: $E_{TEC} = (8760/1000) * (P_{off} * T_{off} + P_{sleep} * T_{sleep} + P_{idle} * T_{idle})$		T = 2628 h/a = 7,2 h/d	T = 2628 h/a = 7,2 h/d		T = 3504 h/a = 9,6 h/d
Energy Star v6 (Entwurf 3)	$E_{TEC} = 8760/1000 * (P_{off} * T_{off} + P_{sleep} * T_{sleep} + P_{long_idle} * T_{long_idle} + P_{short_idle} * T_{short_idle})$		Long idle: T = 438 h/a = 1,2 h/d Short idle: T = 2190 h/a = 6 h/d	T = 1752 h/a = 4,8 h/d		T = 4380 h/a = 12 h/d
ECMA 383	$TEC_{estimate} = 8760/1000 * [P_{off} * T_{off} + P_{sleep} * T_{sleep} + P_{idle} * T_{idle} + P_{sidle} * (T_{sidle} + T_{work})]$	Wenn Zeiten nicht gemessen werden, dann T = 0 h/a	Long idle: T = 1314 h/a = 3,6 h/d Short idle: T = 3066 h/a = 8,4 h/d	T = 438 h/a = 1,2 h/d		T = 3942 h/a = 10,8 h/d
Fujitsu (Business Office)	Typical annual energy consumption AEC = $[T_{on\ mode} * P_{on\ mode} + T_{Standby} * P_{Standby} + T_{min\ WoL} * P_{min\ WoL}] * 260\ d + 105\ d * P_{min\ WoL} * 24h / 1000$	On mode = 0,9 * P _{Idle} + 0,1 * P _{Max} T (on mode) = 9 h/d an 260 d/a = 2340 h/a T (max) = 9 h/d an 260 d/a = 234 h/a T (idle) = 8,1 h/d an 260 d/a = 2106 h/a		T (standby) = 2 h/d an 260 d/a = 520 h/a		T (Min WoL) = 13 h/d an 260d/a + 24 h/d an 105 d/a = 5900 h/a
EuP Lot 3	$E = (P_{off} * T_{off} + P_{sleep} * T_{sleep} + P_{idle} * T_{idle}) / 1000$		T (idle) = 2279 h/a	T (sleep) = 3196 h/a		T (off) = 3285 h/a
Berechnungsformel der Bundesverwaltung	$E = [203,27 * (P_{off} * T_{off} + P_{sleep} * T_{sleep} + P_{idle} * T_{idle} + T_{netzgetrennt} * 0) + 161,73 * (P_{off} * T_{off} + T_{netzgetrennt} * 0)] / 1000$		T (idle) = 7 h/d an 203,27 h/a = 1422,89 h/a	T (sleep) = 3 h/d an 203,27 h/a = 609,81 h/a		T (off) = 11,2 h/d an 203,27 d/a + 19,2 h/d an 161,73 d/a = 5381,84 h/a T (netzgetrennt ⁵) = 2,8 h/d an 203,27 d/a + 4,8 h/d an 161,73 d/a = 1345,46 h/a

⁵ Netzgetrennt bedeutet keine Leistungsaufnahme (0 Watt)

Agenda

Meeting of the Expert Panel for the project “Comparative analysis of the use of office computer systems in public administrations in Germany in terms of their ecological and economic impacts (FKZ 3712 95 301)”

Date	Wednesday, 19. Juni 2013	
Time	10:00 AM – 3:30 PM	
Address	Federal Environment Agency (UBA), Bismarckplatz 1, 14193 Berlin, Raum 1134 http://www.umweltbundesamt.de/uba-info/anreise.pdf	
Participants	Ebert, Thomas	Apple GmbH
	Fischer, Mathias	Dell GmbH
	Schreck, Timo	Fraunhofer ISC–Application Center Resource Efficiency
	Proske, Marina	Fraunhofer IZM /TU-Berlin
	Schischke, Karsten	Fraunhofer IZM
	Janßen, Maïke	Federal Environment Agency (UBA)
	Köhn, Marina	Federal Environment Agency (UBA)
	Hermanns, Silke	GLOBALFOUNDRIES
	Liu, Ran	Öko-Institut e.V. – Institute for Applied Ecology
	Prakash, Siddharth	Öko-Institut e.V. – Institute for Applied Ecology
	Dr. Hermann, Constantin	PE International
	Gama, Margarida	PE International
	Hischier, Roland	Swiss Federal Laboratories for Materials Science and Technology (EMPA)
	Dr.-Ing. Scheumann, René	TU Berlin
	Schlösser, Alexander	TU Berlin
	Kemmer, Uwe	HGST, a Western Digital company
Moderation	Siddharth Prakash, Öko-Institut e.V. – Institute for Applied Ecology	
Minutes	Öko-Institut e.V. – Institute for Applied Ecology	

Topic	Time
Welcome note <i>Marina Köhn, Federal Environment Agency (UBA)</i>	10:00 – 10:05
Introduction of the participants, Interest & expectations from the UBA project <i>All Participants</i>	10:05 – 10:15
Introduction research Project - Comparative analysis of the use of office computer systems in public administrations in Germany in terms of their ecological and economic impacts <i>Siddharth Prakash, Öko-Institut e.V.- Institute for Applied Ecology</i>	10:15 – 10:30
LCA-to-go – Establishing data sets for electronic components & products <i>Karsten Schischke, Fraunhofer IZM</i>	10:30 – 10:45
Preliminary results of the UBA-Project: Life cycle inventory data on hard disk drives <i>Ran Liu, Öko-Institut e.V.- Institute for Applied Ecology</i>	10:45 – 11:00
Discussion on data requirements for hard disk drives <i>All Participants</i>	11:00 – 11:45
Establishing the dataset on CPUs in Ecoinvent - – Data collection and methodological issues <i>Roland Hischer, EMPA</i>	11:45 – 12:00
Preliminary results of the UBA-Project: Life cycle inventory data on CPU <i>Alexander Schlösser, TU-Berlin</i>	12:00 – 12:15
Discussion on data requirements for CPUs <i>All Participants</i>	12:15 – 13:00
Lunch Break	13:00 – 14:00
Establishing the dataset on PWBs – Data collection and methodological issues <i>Dr. Constantin Hermann, PE International</i>	14:00 – 14:15
Preliminary results of the UBA-Project: Life cycle inventory data on PWBs <i>Marina Proske, Fraunhofer IZM/ TU Berlin</i>	14:15 – 14:30
Discussion on data requirements for PWBs <i>All Participants</i>	14:30 – 15:15
Concluding remarks and further steps <i>Siddharth Prakash, Öko-Institut e.V.- Institute for Applied Ecology</i>	15:15 – 15:30

Protokoll des Begleitkreises zum Forschungsvorhaben

Ökologische und ökonomische Aspekte beim Vergleich von Arbeitsplatzcomputern für den Einsatz in Behörden unter Einbeziehung des Nutzerverhaltens (FKZ 3712 95 301)

Datum	Wednesday, 19. Juni 2013	
Uhrzeit	10:00 – 15:30 Uhr	
Adresse	Umweltbundesamt, Bismarckplatz 1, 14193 Berlin, Raum 1134 http://www.umweltbundesamt.de/uba-info/anreise.pdf	
TeilnehmerInnen	Fischer, Mathias Schreck, Timo Hermanns, Silke Kemmer, Uwe Dr. Hermann, Constantin Gama, Margarida Hischier, Roland Dr.-Ing. Scheumann, René Schischke, Karsten	Dell GmbH Fraunhofer ISC–Application Center Resource Efficiency GLOBALFOUNDRIES HGST, a Western Digital company PE International PE International Swiss Federal Laboratories for Materials Science and Technology (EMPA) TU Berlin Fraunhofer IZM
	Proske, Marina Schlösser, Alexander Liu, Ran Prakash, Siddharth Janßen, Maike Köhn, Marina	Fraunhofer IZM /TU-Berlin TU Berlin Öko-Institut e.V. – Institute for Applied Ecology Öko-Institut e.V. – Institute for Applied Ecology UBA UBA
Moderation	Siddharth Prakash, Öko-Institut	
Protokoll	Siddharth Prakash, Öko-Institut	

Alle Präsentationen der Begleitkreissitzung stehen zur Verfügung unter:

http://www.oeko.de/service/Praesentationen_Begleitkreis_Oeko-APC.zip

TOP 1 Begrüßung

Marina Köhn begrüßt die Anwesenden und bedankt sich für die Teilnahme der Begleitkreismitglieder; sie stellt die Ziele des Umweltbundesamtes im Rahmen der IKT-Strategie vor und erläutert die Zielsetzung des spezifischen Forschungsvorhabens mit Blick auf die Gesamtzielsetzung.

Die Begleitkreissitzung wird in deutscher Sprache durchgeführt.

TOP 2 Vorstellungsrunde

Siehe Teilnehmerliste.

TOP 3 Vorstellung des Forschungsvorhabens

Siehe Präsentation zur Vorstellung des Forschungsvorhabens

Top 4 LCA-to-go – Establishing data sets for electronic components & products

Zielgruppe des Vorhabens „LCA-to-go“ sind die Klein- und Mittelständischen Unternehmen (KMU), denn die KMUs sind in der Regel mit umfangreichen Regelwerken der Ökobilanzmethodik überfordert. Deswegen setzt das Vorhaben darauf, die Ökobilanzmethodik in einer vereinfachten Form den KMUs näher zu bringen. Dafür wird in Kauf genommen, dass die Methodik dann nicht mehr ISO-konform bleibt.

In diesem Vorhaben wird für den Bereich „Festplatten“ die Festplattenkapazität als Bezugsgröße festgelegt, denn diese ist den KMUs generell bekannt. Andere Bezugsgrößen, wie z.B. Anzahl Layer des Motherboards oder Chipfläche, sind den KMUs sehr fremd.

Entwicklung eines Webtools mit einfachen Parametern, wie Festplattengröße und – Kapazität, damit die KMUs eigenständig die Modellierungen durchführen können.

Die Ergebnisse des obenbeschriebenen Ansatzes werden, beispielweise für die Komponente Festplatte, mit realen Ökobilanzdaten der Firma Seagate und anderen Ökobilanzstudien abgeglichen. Die Ergebnisse der Studien unterscheiden sich minimal, deswegen ist das Vorgehen des Vorhabens LCA-to-go möglich.

Diskussion:

Die Annahme, dass 3 Medienscheiben für 1 TB Festplatte verbaut werden, ist nicht mehr aktuell. Mittlerweile wird dafür nur eine Medienscheiben benötigt (bei 3,5 Zoll Festplatten). Allerdings hat diese Entwicklung einen gewissen Stillstand erreicht und noch mehr Kapazität auf einer einzigen Medienscheiben ist momentan nicht in Sicht.

Es gibt keinen nennenswerten abnehmenden Trend, was die Verkaufszahlen von Festplatten (HDD) angeht (z.B. durch den steigenden Anteil von SSDs sowie Onlinespeicherungssystemen). Denn die Onlinearchivierung benötigt auch Festplatten (HDD). Allerdings ist eine Verschiebung innerhalb der Segmente festzustellen:

- Anteil mobiler Festplatten nimmt zu
- Markt für Desktop-Festplatten stagniert
- Enterprise-Festplatten (für Server) nehmen zu

TOP 5 Preliminary results of the UBA-Project: Life cycle inventory data on hard disk drives

Schischke et al. (2012) kommen zu der Schlussfolgerung, dass der Produktionsaufwand mit der Anzahl der Plattenscheiben in Relation steht. Es ist nur bedingt richtig. Denn laut Informationen der Firma Seagate spielt die Kapazität eine größere Rolle (aufgrund langwieriger Testverfahren; je größer die Kapazität, je höher die Ausschussrate und desto länger der Test; z.B. ein 4 TB Test läuft ca. 100 Stunden).

Aussage Seagate: HDD-Kapazität ist entscheidend für den Energie- und Materialverbrauch der Fertigung

Information von Seagate:

- Auswirkungen der Fertigung von Slider und HGA sind abhängig von der Anzahl der Magnetscheiben
- Die Anzahl der Scheiben spielt nur für den Materialverbrauch eine Rolle.
- Hohe Scope 1 Emissionen (direkte Emissionen) stammen überwiegend von einem fluorhaltigen Lösungsmittel.

Seagate signalisiert große Bereitschaft, sich an der Datensatzgenerierung für das UBA zu beteiligen. Allerdings müssen davor ein paar grundlegende Fragen mit der Firma Seagate geklärt werden. Denn die Firma Seagate hat die Frage gestellt, in welcher Form (generisch/anonymisiert oder firmenspezifisch) die Firmendaten in der UBA-Datenbibliothek importiert

werden und ob die Firma Seagate eine besondere Danksagung seitens des Vorhabens in schriftlicher Form bekommen wird.

Herr Kemmer von HGST, a Western Digital Company erklärt sich bereit, die Fragen des Projektteams schriftlich zu beantworten.

Das Hauptmaterial der Medienscheiben einer 2,5“ Festplatte ist Glas; einer 3,5“ Festplatte Aluminium. Bei Scheiben mit hoher Datendichte wird auf Glas zurückgegriffen, weil sie formstabil sein müssen. Gleichzeitig gibt es weniger Unwuchten und es ist schockresistenter. Es ist zu vermuten, dass bei HDDs mit einer größeren Kapazität auch ein höherer Impact zu erwarten ist. Die Herstellungskosten liegen über dem von Aluminium-Platttern. Da der Markt für 3,5“-Festplatten stärker kostengetrieben ist als für 2,5“-Festplatten, werden nur die letzteren aus Glas hergestellt.

Die Hauptchemikalie, die bei der Produktion eines HDD eingesetzt wird, ist IPA (Isopropyl Alcohol). Es liegen keine Information zu Chemikalien mit hohen Reinheitsgraden vor. Herr Kemmer von HGST bietet an, diese zu recherchieren.

Dem Vorhaben fehlen Daten über die Vorkette der Magnetherstellung

Es liegen keine Daten zu Prozessverlusten vor. Allerdings kann davon ausgegangen werden, dass diese für Edelmetalle sehr gering sind, denn sie aus ökonomischen Gründen (z.B. Reduktion der Produktionskosten) recycelt werden.

Der Transportweg nach Europa für Festplatten besteht zu 100% aus Flugtransport.

Zu dem Schocksensor sollte es Datenblätter von Farnell geben. Es wurde der Hinweis gegeben, dass der Schocksensor mit der Herstellung eines Kondensators gleichgesetzt werden kann. Diese Aussage wird überprüft.

Generell stellt sich die Frage, wie lange der Datensatz gültig sein kann, da sich das Segment momentan ändert (Gehäuse werden flacher, Integration von Flash-Speichern).

Top 6 Establishing the dataset on CPUs in Ecoinvent - – Data collection and methodological issues

Aufbau der Ecoinvent-Datenbank bezogen auf IKT Produkte:

- Es werden eher durchschnittliche Datensätze der Produktionsprozesse für die Verwendung in der Schweiz und Westeuropa abgebildet.
- Die Datenbank ist modularer aufgebaut : Die ersten Ebene beschreibt die Produkte (z.B. Desktop PCs), die zweite Ebene die Module (z.B. DVD Laufwerk) und die dritte Ebene die Komponenten (z.B. Kondensatoren)

Modellierung der Mikrochip (IC) Datensätze in Ecoinvent: Für ICs gibt es zwei Datensätze – Logic-Chip-Datensatz und Speicher-Chip Datensatz

- Die Bezugsgröße ist 1 kg Herstellung Logic Chip basiert auf einem Logic Chip mit einem Gewicht von 2,62g.
- Die Bezugsgröße ist 1 kg Herstellung Speicher Chip basiert auf einem Speicher Chip mit einem Gewicht von 2,3g.
- Der Transportweg wurde mittels Eisenbahn und Schiff modelliert und müsste aktualisiert werden, denn der Transport per Flug spielt mittlerweile eine größere Rolle bei ICs.

Die Menge der Wafer (fabricated) pro Chip (Speicher/ Logic) wurde in dem älteren Ecoinvent-Datensatz auf die Masse bezogen anstatt auf Fläche.

Der Endbericht und Daten des UBA-Vorhabens zur Erstellung des Datensatzes für ICs (UFOPLAN 2009) soll an Herrn Hirschler geschickt werden.

Top 7 Preliminary results of the UBA-Project: Life cycle inventory data on CPU

Ca. 7 Variablen zur Ermittlung der vielfältigen CPUs → CPU-Typ, Strukturbreite (Technology Node), Masken- und Metallisierungsschritten, Packagingtechnologie, Packaginggröße und Wire-Typ.

Zur Plausibilitätsprüfung werden die Daten zur Waferproduktion für Logic Chips (Quelle Schmidt et al. 2011) an Frau Hermanns (GLOBALFOUNDRIES) geschickt.

Die freiwillige Selbstverpflichtung der europäischen Halbleiterindustrie wurde kürzlich erneut verabschiedet. In dieser Selbstverpflichtung ist u.a. geregelt, dass beim Neubau eines Fabs zu berücksichtigen ist, dass bei der Abgasreinigung der Stand der Technik umgesetzt werden muss. Die Fabs in Europa sind ca. 10-15 Jahre alt.

ZVEI-Daten der PFC-Emissionen zur Chip-Produktion in Europa sind deutlich niedriger als die Zahlen von Intel. Insgesamt ist Europa deutlich PFC-effizienter als der Weltdurchschnitt, da die Fabs jünger sind (etwa 10 bis 15 Jahre alt).

Der ZVEI Datensatz nimmt 0,15 kg CO₂e/ cm² für die PFC-Emissionen an → Hier besteht noch Prüfbedarf. Der Endbericht des UBA-Vorhabens zur Erstellung des IC-Datensatzes soll ebenfalls konsultiert werden (PFC Emissionen im Jahr 2007 - 0,3667 kg CO₂e/cm²)

Laut Frau Hermanns (GLOBALFOUNDRIES) ist der Aufwand der ganzen Vorketten der Chemikalien eher gering, wenn es nur um Carbon Footprint geht. Es wird vorgeschlagen, ein paar wesentliche Chemikalien (z.B. Schwefelsäure) auszusuchen und zu prüfen.

Bei den Gasen müsste bei Unternehmensdaten darauf geachtet werden, dass die Unternehmen einige Gase (wie z.B. N₂) selber herstellen. Das heißt, der Aufwand ist in den Energieverbrauchsdaten schon enthalten und darf nicht doppelt gezählt werden.

Hinsichtlich high purity Materialien sind drei Typen zu unterscheiden:

- Reine Materialien: einfach Vor-und Nachlauf verwerfen (also etwas höherer Ausschuss)
- Zusätzliche Reinigungsschritte
- Komplett anderes Herstellungsverfahren für High-purity

Einfluss der Umstellung von 200 mm auf 300 mm Fertigung: Es kann davon ausgegangen werden, dass sich die Umweltauswirkungen bei der Einführung von neuen Strukturenbreiten nicht sprunghaft ändern, weil permanent optimiert wird. Es gibt eher schleichende Änderungen, wenn z.B. neue Reinigungsschritte eingeführt werden, was zu einem erhöhten Verbrauch von Chemikalien und Wasser führt. Dieser Effekt wird aber wiederum durch die abnehmende Chipfläche wieder kompensiert.

Die Parameter, die mit dem Produktionsaufwand einhergehen, sind die Maskenschritte, Metallisierungsschritte, Fläche sowie die Funktionalität der ICs. Für die Festlegung der Bezugsgröße soll der Endbericht des UBA-Vorhabens zur Erstellung des Datensatzes für ICs (UFOPLAN 2009) konsultiert werden.

GLOBALFOUNDRIES hat in einem Pilotprojekt einen so genannten „Manufacturing Index_{dies out}“ (MI) als Bezugsgröße verwendet. MI ist das Produkt von „good dies“ und der Anzahl der Maskenschritten (Hermanns 2010). Eine gängige Bezugsgröße in der Halbleiter-Industrie ist Manufacturing Index (MI) = Waferfläche * Maskenschritte ohne Berücksichtigung von Ausbeute.

Hinsichtlich Unsicherheiten im Modell sollte das Vorgehen von PAIA angeschaut werden, allerdings sind dazu nur sehr wenig Informationen frei verfügbar.

TOP 8 Establishing the dataset on PWBs – Data collection and methodological issues

Siehe Präsentation der PE-International

TOP 9 Preliminary results of the UBA-Project: Life cycle inventory data on PWBs

Zur Zeit sind wenig öffentliche aktuelle Studien verfügbar. Die überwiegenden verfügbaren Studien und insbesondere Datensätze stammen noch aus den 90er Jahren)

Umweltberichte von Herstellern wurden gesichtet und analysiert (deutsch, englisch, japanisch) → Bisher wurden jedoch keine neuen und verwendbaren Daten gefunden. Ein chinesischer Bericht enthält Zahlen zum Chemikalienverbrauch. Die Repräsentativität dieser Zahlen lässt sich aber nicht beurteilen.

Input aus LCA to go:

- Aggregierter Datensatz für Carbon Footprint vorhanden, jedoch keine detaillierten Daten, inkl. zum Rohstoffaufwand verfügbar
- Skalierbar über Lagenzahl und Fläche
- Keine Angaben zu Prozessverlusten und Input/Outputflüssen

ZVEI

- Angaben zur Materialzusammensetzung aktueller Leiterplatten
- Gute Quelle für Outputdaten;
- Inputdaten und Verluste sind nicht enthalten

Entscheidend wäre die Frage, ob die Technologie noch dieselbe ist wie früher? Wäre eher für unbestückte Leiterplatten zutreffen als für die darauf befindlichen Chips. In diesem Fall können mit einem neuen Stromdatensatz einen älteren Leiterplattensatz (unbestückt) ergänzen, um einen akzeptablen Datensatz zu generieren.

Anzahl Lagen Leiterplatten: 10 Lagen in einer koreanischen Studie; stimmt mit den Ergebnissen des Vorhabens „LCA-to-go“ überein; bei Arbeitsplatzcomputern schätzt Hr. Schreck zwischen 4-6 Lagen in der Regel. Constantin Herrmann geht eher von 10 Lagen aus. Herr Fischer von der Firma Dell versucht innerhalb der Firma Dell die Anzahl der Lagen herauszufinden und stellt diese dann dem Öko-Institut und der TU Berlin zur Verfügung. Insgesamt existieren hierzu unterschiedliche Aussagen, welche von der TU Berlin geprüft werden.

Der Datensatz in der GaBi-Software basiert auf Daten, die bei der Firma Häusermann in Österreich aufgenommen wurden. Laut Constantin Hermann ist eine Gold-Beschichtung nicht automatisch schlimmer als Zinn/Silber, da die Silberschicht meist dicker als die Goldschicht ist.

--- Ende der Veranstaltung ---

Comparative analysis of the use of office computer systems in public administrations in Germany in terms of their ecological and economic impacts

UFOPLAN 2012

Background

The German federal government intends to reduce the energy consumption caused by ICT in federal agencies significantly. To achieve the quantitative savings potentials, political decision makers and public procurers need robust data base for their decision-making for the establishment of an environmentally friendly computer workplace. Inter alia, a decision on the prolonged usage of existing computer devices on the one side, or their substitution by more efficient products on the other side has to be taken.

For example, a recent study of the Federal Environmental Agency¹ shows that the environmental impact for manufacturing a new notebook is so high that it can not be compensated even by the replacement of an older notebook with a newer and more energy efficient model.

Challenges

Ideally, comprehensive knowledge about the environmental impacts of all life cycle phases of ICT products builds the basis for a robust political decision-making. ICT devices contain valuable materials like gold, silver, platinum group metals, indium etc. whose manufacturing is related to high environmental impacts. Only life-cycle analyses (LCA) address the whole range of those impacts. Thus, they are an important instrument for the identification of optimization potentials.

However, the current data base regarding the resource consumption as well as the energy flows of ICT products in the up- and downstream production phases is insufficient. Due to technology dynamics, the existing data do not reflect state-of-the-art and require a regular update. Further, currently applied assumptions regarding the use profiles are not up to date.

Key parameters are simplified too much so that no realistic statements can be made about the use phase, for example regarding the calculation of the Active Mode.

Contributions for solutions

To improve the data base and to derive robust recommendations for environmentally friendly ICT workplaces in federal agencies, the Federal Environmental Agency has commissioned the scientific study „*Comparative analysis of the use of office computer systems in public administrations in Germany in terms of their ecological and economic impacts*“.

¹ Prakash et al. (2011a): Zeitlich optimierter Ersatz eines Notebooks unter ökologischen Gesichtspunkten – FKZ 363 01 322, Öko-Institut e.V. in Kooperation mit Fraunhofer Institut für Zuverlässigkeit und Mikrointegration (IZM) (2011), Umweltbundesamt, Dessau.
<http://www.umweltbundesamt.de/uba-info-medien/4317.html>

Due to the complex and global supply chains as well as the short innovation cycles of ICT, the focus of the study will be on developing scalable life-cycle data for the three components – Central Processor Unit (CPU), Unmounted Printed Circuit Board (PCB) and Hard Disk Drive (HDD). They account for a large share of the total carbon footprint of the products and contain a high proportion of important resources like rare earths and other critical metals. Besides the greenhouse gas potential, the resource consumption of the selected components will be analyzed too. Current public available data, for example from data bases, research studies, company and sector reports, statistical production data etc. will build the basis for our calculations.

Expert Panel

The project strives to take into account further data of component manufacturers for the development of new LCA datasets. Due to technology dynamics, this approach seems reasonable as industry is expected to be able to complement and review the data quality of our scientific study in terms of its representativeness, completeness and validity. Thus, the data collection shall be done in close cooperation with the expert panel from the industry and scientific institutions with focus on ICT devices, especially on the components HDD, CPU and PCB. The expert panel shall support the project team regarding the compilation of current information about environmental data on ICT, the research for appropriate data sources and the verification and optimization of the collected data. At the same time, the members of the expert panel benefit from the updated data sets and expert discussions regarding optimization potentials during the manufacturing, use and disposal of office computer systems.

We cordially invite you to engage in the expert panel or support our project with scientific advice and/or component specific information.

Contact

Ms Marina Köhn
Federal Environmental Agency
Advisory Office on Sustainable Information and Communication Technology – Green IT
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau
Phone.: ++49-(0)340-2103-2565
Fax: ++49-(0)340-2104-2565
Email: marina.koehn@uba.de

Mr Siddharth Prakash
Öko-Institut e.V.
Institute for Applied Ecology
Sustainable Products & Material Flows Division
Merzhauser Straße 173
79100 Freiburg
Phone: +49-(0)761-45295-244
Fax: +49-(0)761-45295-288
Email: s.prakash@oeko.de

Mr Alexander Schlösser
Technical University Berlin
Research focus:
Technologies of the Micro peripherics
Sustainable Technologies Division
Gustav-Meyer-Allee 25
13355 Berlin
Phone: +49-(0)30-46403-771
Email: alexander.schloesser@tu-berlin.de