

Zeitlich optimierter Ersatz eines Notebooks unter ökologischen Gesichtspunkten

UMWELTFORSCHUNGSPLAN DES
BUNDESMINISTERIUMS FÜR UMWELT,
NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT

Forschungskennzahl 363 01 322
UBA-FB 001666

Zeitlich optimierter Ersatz eines Notebooks unter ökologischen Gesichtspunkten

von

Siddharth Prakash, Ran Liu
Öko-Institut e.V. – Institut für Angewandte Ökologie, Freiburg

Karsten Schischke, Dr. Lutz Stobbe
Fraunhofer IZM, Berlin

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

UMWELTBUNDESAMT

Diese Publikation ist ausschließlich als Download unter <http://www.uba.de/uba-info-medien/4316.html> verfügbar. Hier finden Sie auch eine englische Version des Berichtes.

Die in der Studie geäußerten Ansichten und Meinungen müssen nicht mit denen des Herausgebers übereinstimmen.

ISSN 1862-4804

Durchführung der Studie:	Öko-Institut e.V. – Institut für Angewandte Ökologie Bereich Produkte und Stoffströme Merzhauser Str. 173 79100 Freiburg
Abschlussdatum:	Oktober 2011
Herausgeber:	Umweltbundesamt Wörlitzer Platz 1 06844 Dessau-Roßlau Tel.: 0340/2103-0 Telefax: 0340/2103 2285 E-Mail: info@umweltbundesamt.de Internet: http://www.umweltbundesamt.de http://fuer-mensch-und-umwelt.de/
Redaktion:	Fachgebiet III 1.1 Übergreifende Aspekte des Produktbezogenen Umweltschutzes, Nachhaltige Konsummuster, Innovationsprogramm Heidrun Moser, Maike Janßen, Marina Köhn

Dessau-Roßlau, September 2012

Kurzbeschreibung

Die Herstellung von Notebooks ist mit großen Umweltauswirkungen verbunden. Trotzdem spielen diese bei den Kaufentscheidungen selten eine Rolle. Vor diesem Hintergrund hat das Umweltbundesamt das Öko-Institut e.V. und das Fraunhofer IZM mit einer Studie beauftragt, die folgende Fragen klären sollte: (1) Welchen Anteil haben verschiedene Lebenszyklusphasen an Gesamttreibhausgasemissionen eines Notebooks? (2) Wann amortisieren sich die Umweltauswirkungen von Herstellung, Distribution und Entsorgung eines energieeffizienten Neugeräts? (3) Wie viel effizienter muss das neue Notebook sein, damit sich der Ersatz des alten und weniger energieeffizienten Geräts aus ökologischen Gesichtspunkten lohnt? Die Ergebnisse zeigen, dass die Herstellungsphase mit knapp 56% (214 kg CO₂e in 5 Jahren) einen höheren Beitrag an den Gesamttreibhausgasemissionen eines Notebooks leistet als die Nutzungsphase. Die Analyse der Amortisationszeiten hat belegt, 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 amortisieren lässt. Bei einer 10%igen Energieeffizienzsteigerung des neuen Notebooks im Vergleich zum alten liegen die Amortisationszeiten zwischen 33 und 89 Jahre. Die Studie weist nach, dass der Beitrag der Herstellungsphase an Gesamttreibhausgasemissionen mit einer Erhöhung der Lebensdauer der Notebooks erheblich reduziert wird. Deswegen schlägt die Studie vor, den Fokus der verpflichtenden produktpolitischen Ökodesign-Maßnahmen für IKT-Geräte auf Aspekte wie Möglichkeiten der Auf- und Nachrüstung, modularer Aufbau, recyclinggerechte Konstruktion, Ersatzteilverfügbarkeit, Standardisierung von Komponenten und Mindestgarantie auszuweiten.

Abstract

The production of notebooks induces significant environmental impacts. However, these impacts are seldom considered by consumers in their purchasing decisions. Against this background, the Federal Agency of Environment in Germany commissioned the Öko-Institut e.V. and the Fraunhofer IZM with a study to address following questions: (1) What is the share of different life cycle phases in the total greenhouse gas emissions of a notebook, (2) When are the environmental impacts, which are associated with the production, distribution and disposal of a new notebook, compensated as a result of energy efficiency gains in the use-phase of the new notebook, (3) Which energy efficiency gains should be possessed by a new notebook, if the replacement of the older and less energy efficient notebook can be justified under the consideration of environmental concerns. The results show that production phase, with about 56% (214 kg CO₂e in 5 years) of the total greenhouse gas emissions of a notebook, casts a significantly higher impact than the use phase. Moreover, the environmental impacts of the production phase of a notebook are so high, that they cannot be compensated in realistic time-periods by energy efficiency gains in the use phase. In case of a 10% increase in the energy efficiency of a new notebook as compared to the older one, replacement of the older notebook can only be justified after 33 to 89 years, if environmental concerns are considered. The study concludes that the share of the production phase in the total greenhouse gas emissions of a notebook can be significantly reduced by taking measures to extend the useful life-time of a notebook. Therefore, the study recommends that the focus of mandatory product policy for ICT should be expanded to measures related to possibilities of hardware upgrading, modular construction, recycling-friendly design, availability of spare parts, standardisation of components and minimum warranty periods.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis

Tabellenverzeichnis

Abkürzungen

1	Hintergrund.....	1
2	Zielsetzung und Untersuchungsrahmen.....	2
2.1	Ziel und Aufgabe.....	2
2.2	Untersuchungsrahmen und Szenarienbildung.....	2
2.2.1	Beschreibung der untersuchten Szenarien	3
2.2.2	Funktion und funktionelle Einheit.....	6
2.2.3	Festlegung der Systemgrenzen.....	8
2.2.4	Berücksichtigte Wirkungskategorien	8
3	Datengrundlage	9
3.1	Herstellungsphase	9
3.2	Distribution und Feinverteilung der Fertigprodukte.....	17
3.3	Einkaufsfahrt.....	19
3.4	Nutzungsphase.....	19
3.5	End-of-Life	20
3.5.1	Business-as-Usual.....	21
3.5.2	Best-Practice	22
4	Ergebnisdarstellung und Auswertung.....	23
4.1	Ergebnisdarstellung der einzelnen Szenarien	23
4.1.1	Szenario 1: EuP Los 3	23
4.1.2	Szenario 2: EcoInvent 2.2	25
4.1.3	Szenario 3: UBA-FuE-Vorhaben (UFOPLAN 2009) + EcoInvent 2.2 (End-of-Life Business-as-Usual).....	26
4.1.4	Szenario 4: UBA-FuE-Vorhaben (UFOPLAN 2009) + EcoInvent 2.2 (End-of-Life Best-Practice)	28
4.2	Gesamtüberblick der untersuchten Szenarien.....	29
4.3	Amortisationsrechnung	30
5	Sensitivitätsanalyse	34
5.1	Sensitivitätsanalyse 1: Anpassung der Stromverbrauchswerte in der Nutzungsphase nach festgelegten Grenzwerten von Energy Star® Version 5.0 für Computers	35

5.2	Sensitivitätsanalyse 2: Anpassung der Stromverbrauchswerte sowie der Betriebsmodi nach EuP Los 3.....	37
5.3	Sensitivitätsanalyse 3: Anpassung der Gewichtung der Betriebsmodi in der Nutzungsphase.....	38
5.4	Sensitivitätsanalyse 4: Berücksichtigung des Radiative Forcing Index (RFI-Faktors) im Flugverkehr.....	40
5.5	Sensitivität 5: Betrachtung der Emissionen der fluorierten Verbindungen (FC-Emissionen) in der Bildschirmherstellung.....	42
5.6	Sensitivitätsanalyse 6: Anpassung der Lebensdauer auf 2,9 Jahre.....	43
5.7	Gesamtüberblick über alle untersuchten Sensitivitätsanalysen.....	44
5.7.1	Amortisationsrechnung auf Basis der Sensitivitätsanalysen.....	46
6	Diskussion.....	47
7	Schlussfolgerung.....	50
8	Literatur.....	51
9	Anhang.....	54

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Systemgrenze der untersuchten Szenarien	8
Abbildung 2:	Hauptmaterialflüsse (Siliziumflüsse) bei der IC-Herstellung	12
Abbildung 3:	Grafische Darstellung - Distributionskette.....	18
Abbildung 4:	Die absoluten GWP-Werte und die prozentualen Anteile der Lebensphasen in Szenario 1: EuP Los 3	24
Abbildung 5:	Die absoluten GWP-Werte und die prozentualen Anteile der Lebensphasen in Szenario 2: EcoInvent 2.2	25
Abbildung 6:	Die absoluten GWP-Werte und die prozentualen Anteile der Lebensphasen von Szenario 3: UBA-FuE-Vorhaben (UFOPLAN 2009) + EcoInvent und das End-of-Life als Business-as-Usual.....	26
Abbildung 7:	Prozentuale Anteile der GWP-Ergebnisse aus der Speicherchipherstellung	27
Abbildung 8:	Die absoluten GWP-Werte und die prozentualen Anteile der Lebensphasen von Szenario 4: UBA-FuE-Vorhaben (UFOPLAN 2009) + EcoInvent und das End-of-Life als Best-Practice	28
Abbildung 9:	Absolutes Ergebnis der GWP-Emissionen für alle untersuchten Szenarien differenziert nach Lebensphase (kg CO ₂ e/Notebook).....	29
Abbildung 10:	GWP-Emissionen eines Notebooks (kg CO ₂ e/Notebook). Lebensdauer 4 Jahre (O'Connell&Stutz 2010)	30
Abbildung 11:	Überblick über die Amortisationszeit in Verbindung mit der Energieeffizienzsteigerung in der Nutzungsphase in allen Szenarien	34
Abbildung 12:	Absolute GWP-Ergebnisse der vier untersuchten Szenarien der Basis- und Sensitivitätsanalyse	45
Abbildung 13:	Prozentuale Abweichungen der vier untersuchten Szenarien der Sensitivitätsanalyse von der Basisanalyse	45
Abbildung 14:	Die Amortisationszeit der Basis- und Sensitivitätsanalyse im Fall von Szenario 4 UBA-FuE-Vorhaben (UFOPLAN 2009) + EcoInvent 2.2 (End-of-Life Best-Practice).....	46

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Überblick über Datenquellen und Annahmen der zu untersuchenden Szenarien	6
Tabelle 2:	Spezifikationen der Notebooks in EuP Los 3, EcoInvent 2.2 und UBA-FuE-Vorhaben (UFOPLAN 2009).....	7
Tabelle 3:	Die in den Herstellungsphasen verwendeten Datengrundlagen	9
Tabelle 4:	Materialzusammensetzung für Notebooks (EuP-Studie 2007).....	9
Tabelle 5:	Überblick über die in ProBas veröffentlichten Datensätze zu ICs (Prakash et al. 2011)	11
Tabelle 6:	Produktionsverteilung der Silizium-Wafer-Herstellung nach Ländern (eigene Schätzung).....	13
Tabelle 7:	Die verwendeten sekundären Daten für die Vorkette der Silizium-Wafer-Herstellung	13
Tabelle 8:	Produktionsverteilung der Front-End-Prozesse nach Ländern (eigene Schätzung)	13
Tabelle 9:	Die verwendeten Sekundärdaten für IC-Front-End-Prozesse	14
Tabelle 10:	Produktionsverteilung der Back-End-Prozesse nach Ländern (eigene Schätzung)	16
Tabelle 11:	Die verwendeten Sekundärdatensätze für IC-Back-End-Prozesse.....	16
Tabelle 12:	In der Modellierung angenommener Anteil von BT-Core + Cu + Au + Ni (eigene Schätzung)	17
Tabelle 13:	Verwendeter Datensatz für Gütertransport per Flugzeug.....	17
Tabelle 14:	Datensätze zur Modellierung der Distribution und Feinverteilung.....	18
Tabelle 15:	Emissionsfaktoren des LKW- und Flugtransports (EcoInvent 2.2).....	19
Tabelle 16:	Datensätze zur Modellierung der Einkaufsfahrt.....	19
Tabelle 17:	Gewichtung der Betriebsmodi eines Notebooks (Energy Star® Version 5.0).....	20
Tabelle 18:	TEC-Werte (kWh/a) der Notebooks, Stand August 2010 (Energy Star® Version 5.0).....	20
Tabelle 19:	Nach dem Schreddern gewonnene Metall-Fractionen bezogen auf 1 kg Notebook (Hischier 2007)	21
Tabelle 20:	Abgeschätzte Ag-, Au- und Pd-Anteile im Notebook.....	22
Tabelle 21:	Die Recyclingrate für Business-as-Usual-Szenario	22
Tabelle 22:	Die Recyclingrate für Best-Practice.....	22
Tabelle 23:	Teilergebnisse zum Bildschirm-Modul und zu Speicherchips aus dem UBA-FuE-Vorhaben (UFOPLAN 2009) (kg CO _{2e} /Notebook)	27

Tabelle 24:	Amortisationsrechnung mit Energieeffizienzsteigerung in der Nutzungsphase in Szenario 1: EuP Los 3	31
Tabelle 25:	Amortisationsrechnung mit Energieeffizienzsteigerung in der Nutzungsphase in Szenario 2: EcoInvent 2.2	32
Tabelle 26:	Amortisationsrechnung mit Energieeffizienzsteigerung in der Nutzungsphase in Szenario 3: UBA-FuE-Vorhaben (UFOPLAN 2009) + EcoInvent (End-of-Life Business-as-Usual)	32
Tabelle 27:	Amortisationsrechnung mit Energieeffizienzsteigerung in der Nutzungsphase in Szenario 4: UBA-FuE-Vorhaben (UFOPLAN 2009) +EcoInvent (End-of-Life Best-Practice).....	33
Tabelle 28:	Zusammenstellung des Stromverbrauchs in der Nutzungsphase in der Basis- und Sensitivitätsanalyse nach Energy Star® TEC 2009 Version 5.0.....	36
Tabelle 29:	Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse 1 im Vergleich zu den Basisanalysen aller untersuchten Szenarien.....	36
Tabelle 30:	Stromverbrauch nach EuP Los 3	37
Tabelle 31:	Zusammenstellung des Stromverbrauchs in der Nutzungsphase der Basis- und Sensitivitätsanalyse nach verschiedenen Datengrundlagen.....	37
Tabelle 32:	Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse 2 im Vergleich zu den Basisanalysen aller untersuchter Szenarien	37
Tabelle 33:	Zusammenstellung der Randgröße: die Gewichtung der Betriebsmodi in der Basis- und Sensitivitätsanalyse	38
Tabelle 34:	Zusammenstellung des Stromverbrauchs in der Nutzungsphase in der Basis- und Sensitivitätsanalyse nach verschiedener Gewichtung der Betriebsmodi	39
Tabelle 35:	Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse 3 im Vergleich zu den Basisanalysen aller untersuchter Szenarien	39
Tabelle 36:	Zusammenstellung der betroffenen Transporte der Basis- und Sensitivitätsanalyse mit und ohne Berücksichtigung des RFI	41
Tabelle 37:	Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse 4 im Vergleich zu den Basisanalysen der untersuchten Szenarien 3 und 4	41
Tabelle 38:	Zusammenstellung der GWP-Werte aus der Bildschirm-Herstellung der Basis- und Sensitivitätsanalyse mit Berücksichtigung von FC-Emissionen im Vergleich zu den Basisanalysen der untersuchten Szenarien 3 und 4.....	42
Tabelle 39:	Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse 5 im Vergleich zu den Basisanalysen der untersuchten Szenarien 3 und 4.....	42
Tabelle 40:	Zusammenstellung des Stromverbrauchs in der Nutzungsphase der Basis- und Sensitivitätsanalyse nach unterschiedlicher Lebensdauer	43
Tabelle 41:	Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse 6 im Vergleich zu den Basisanalysen aller untersuchter Szenarien	44

Tabelle 42:	Länderspezifische Emissionsfaktoren für die Strombereitstellung (Strommix)	54
Tabelle 43:	Input- und Outputdaten zum Datensatz „Silizium-Wafer-Herstellung“ (Prakash et al. 2011)	54
Tabelle 44:	Input- und Outputdaten zum Datensatz „IC-Fertigung Front-End-Prozess/Wafer Out“ (Prakash et al. 2011)	54
Tabelle 45:	Input- und Outputdaten zum Datensatz „IC-Fertigung Front-End-Prozess„good die out“ (Prakash et al. 2011)	55
Tabelle 46:	Input- und Outputdaten zum Datensatz „IC-Fertigung Back-End-Prozess“ (Prakash et al. 2011)	56
Tabelle 47:	Faktoren von hochreinen Chemikalien zu normalen Chemikalien (Higgs et al. 2010)	56
Tabelle 48:	Emissionsfaktoren für Primär- und Sekundärmetallgewinnung (EcoInvent 2.1)	56
Tabelle 49:	Die in der Bilanz gewonnenen Metallfraktionen in kg bezogen auf das jeweils betrachtete Notebook	56
Tabelle 50:	Absolute GWP-Ergebnisse und prozentuale Anteile der Speicherchipherstellung	57

Abkürzungen

ACPI	Advanced Configuration and Power Interface
AUO	AU Optronics Corporation
CMO	Chi Mei Optoelectronics
DDR3	Double Data Rate 3
DRAM	Dynamic Random Access Memory
ECN	Energy Centre of the Netherlands
EPD	Environmental Product Declaration
ETH	Eidgenössische Technische Hochschule, Zürich
FBGA	Fine Pitch Ball Grid Array
FC	Fluorinated Compounds (Fluorierte Verbindungen)
FKW	Fluorkohlenwasserstoffe
GHG	Greenhouse Gas (Treibhausgas)
GHz	Gigahertz
GWP	Global Warming Potential (Treibhauspotenzial)
HDD	High Definition Device
HFKW	Teilhalogenierte Fluor-Kohlenwasserstoffe
IC	Integrated Circuits (Integrierte Schaltungen)
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IERC	International Electronics Recycling Congress
IKT	Informations- und Kommunikationstechnik
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
ISO	International Organization for Standardization
ISSST	International Symposium on Sustainable Systems and Technology
KBA	Kraftfahrt-Bundesamt
LCA	Life Cycle Assessment
LCD	Liquid Crystal Display (Flüssigkristallbildschirm)
LED	Light Emitting Diode (Leuchtdiode)
LKW	Lastkraftwagen
MEEuP	Methodology for the Ecodesign of Energy-using Products
MHz	Megahertz
OEMs	Original Equipment Manufacturers

Zeitoptimierter Ersatz eines Notebooks unter ökologischen Gesichtspunkten

PCF	Product Carbon Footprint
ProBas	Prozessorientierte Basisdaten
PWB	Printed Wiring Board (Leiterplatte)
RAM	Random-Access Memory
RFI	Radiative Forcing Index
SMD	Surface-mounted device
TEC	Total Energy Consumption
TFT	Thin-film Transistor
WEEE	Waste Electrical and Electronic Equipment Directive (Richtlinie über Elektro- und Elektronik-Altgeräte)

1 Hintergrund

Die Bundesregierung hat sich zum Ziel gesetzt, den IKT-bedingten Energieverbrauch in den Bundesverwaltungen um 40 Prozent, bezogen auf das Basisjahr 2009, bis zum Jahr 2013 zu reduzieren.¹ Dabei geht es um den durch den IT-Betrieb in der Bundesverwaltung verursachten Stromverbrauch und unter anderem um Empfehlungen für die öffentliche Beschaffung von umweltfreundlichen IKT-Produkten. Bei letzteren wird über eine Substitution des aktuellen Bestandes der Computerendgeräte durch neue effizientere Notebooks diskutiert.

Die Herstellung von IKT-Geräten – wie Notebooks – ist sehr energieintensiv und belastend für die Umwelt. Je nachdem, wie lange und intensiv ein Notebook in der Gebrauchsphase genutzt wird, macht die Herstellung sogar den Großteil der Umweltauswirkungen aus. Aussagen zum Verhältnis von Energieaufwand in der Herstellung und in der Nutzung der Notebooks sind sehr unterschiedlich. Eine Studie im Rahmen des EcoTopTen-Projektes besagt, dass bei einer Nutzung von vier Stunden pro Tag über vier Jahre im Privatbereich etwa 40% der Umweltbelastungen eines Computers auf seine Herstellung und rund 60% auf die Nutzung entfallen (www.ecotopten.de). Andere Studien schätzen sogar, dass der Anteil des Herstellungsaufwands an den Gesamttreibhausgasemissionen eines Notebooks rund 57% bis 93% ausmacht (Prakash et al. 2010, Andrae und Anderson 2010). Allerdings sind solche Aussagen mit einer gewissen Ungenauigkeit verbunden, da die Datenverfügbarkeit zum Ressourcenverbrauch in den Vorketten noch sehr mangelhaft ist. Beispielweise ist noch nicht ausreichend bilanziert, welchen Einfluss Schwefelhexafluorid (SF₆) und Stickstofftrifluorid (NF₃), die in der Produktion von Halbleiter-Bauteilen und Flüssigkristallbildschirmen verwendet werden, auf die Gesamttreibhausbilanz eines Notebooks haben. 1 kg SF₆-Gas ist, auf einen Zeitraum von 100 Jahren betrachtet, genauso schädlich wie 22.800 kg CO₂; NF₃ wirkt als Treibhausgas 17.200-mal so stark wie CO₂ (IPCC 2007).

Zudem führen die extrem kurzen Produktlebenszyklen von Notebooks, die hohe Innovationsgeschwindigkeit der Branche und sinkende Preise für neue Geräte zu einer immer geringeren tatsächlichen Lebensdauer von Notebooks. Beispielsweise gibt es empirische Beweise, dass Notebooks eine Nutzlebensdauer von oftmals weniger als 3 Jahren haben (Deng et al. 2011, Williams und Hatanka 2005). Das Notebooks eine so kurze Nutzungsdauer haben liegt häufig nicht daran, dass sie physisch defekt sind, sondern vielmehr an fehlenden praktikablen Möglichkeiten, die Leistungsfähigkeit der Notebooks zu erweitern, wie z.B. durch Nachrüstung des Arbeits- oder des Massenspeichers. Infolgedessen entscheiden sich immer mehr Konsumenten für ein neues Gerät, obwohl das alte, aber noch funktionierende Gerät prinzipiell nachgerüstet werden könnte.

Obwohl die neuen Generationen von Notebooks im Hinblick auf ihren Energieverbrauch in der Nutzungsphase immer effizienter werden und die Höhe des Stromverbrauchs mit einer gewissen Regelmäßigkeit als Indikator für die Neuanschaffung verwendet wird, bleiben die Umweltauswirkungen der Herstellungsphase bei den Kaufentscheidungen leider unberücksichtigt. Für eine umfassende Betrachtung der Umweltauswirkungen von Notebooks muss die

¹ IKT-Strategie der Bundesregierung: „Deutschland Digital 2015“, www.bmwi.de

Betrachtung allerdings auf die Aspekte des Materialverbrauchs und der Umweltinanspruchnahme in den vor- und nachgelagerten Phasen ausgeweitet werden. Eine derartige Betrachtungsweise schafft höhere Richtungssicherheit für die politische Entscheidungsträger, öffentliche Beschaffer und private Endkonsumenten, wenn es um Entscheidungen zwischen der Verlängerung der Lebensdauer und der Neuanschaffung von Notebooks 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.

Zu diesem Zweck hat das Umweltbundesamt das Öko-Institut e.V. und das Fraunhofer IZM mit einer Studie zur Ermittlung des zeitoptimierten Ersatzes eines Notebooks unter ökologischen Gesichtspunkten beauftragt.

2 Zielsetzung und Untersuchungsrahmen

2.1 Ziel und Aufgabe

Im Rahmen dieser Studie soll ermittelt werden:

- Wie hoch sind die Anteile der verschiedenen Lebenszyklusphasen an den Gesamttreibhausgasemissionen eines Notebooks?
- Wann ist der ökologisch optimale Zeitpunkt des Ersatzes eines alten Notebooks durch ein neues Modell?²

Bei der Berechnung des Zeitpunktes für den ökologisch optimalen Ersatz eines alten Notebooks durch ein neues Modell werden im Rahmen dieser Studie zwei weitere Fragen beantwortet:

- Wann amortisieren sich die Umweltauswirkungen, die durch die Herstellung, Distribution (inkl. Einkaufsfahrt) und Entsorgung des Neugeräts verursacht werden, durch die Einsparungen energieeffizienter Geräte in der Nutzungsphase?
- Wie viel effizienter muss das neue Notebook sein, damit sich der Ersatz des alten und weniger energieeffizienten Geräts aus ökologischen Gesichtspunkten lohnt?

2.2 Untersuchungsrahmen und Szenarienbildung

Im Rahmen dieser Studie ist es wenig sinnvoll, Lebenszyklusdaten von einem alten und einem neuen Notebook jeweils getrennt voneinander zu erheben und zu analysieren. Zwar unterliegen Notebooks einerseits einer sehr hohen Marktdynamik und sich stetig verändernden technologischen Innovationen (was prinzipiell für eine gesonderte Datenerhebung sprechen würde), andererseits ist eine Primärerhebung der Lebenszyklusdaten eines alten und eines neuen Notebooks sehr kosten- und zeitaufwendig und würde den Rahmen dieses Projektes deutlich sprengen. Außerdem haben Prakash et al. (2011) gezeigt, dass die Datenunsicherheiten größer ist als die Unterschiede zwischen den Produktionsabläufen bei verschiedenen

² Die Frage des Ersatzes eines stationären Arbeitsplatzcomputer durch ein Notebook wird im Rahmen dieser Studie nicht untersucht.

Notebookgenerationen. Nicht zuletzt müssen die Entscheidungen, die für den Ersatz eines Notebooks relevant sind, in der Regel relativ schnell erfolgen und können nicht immer mit einer umfassenden Lebenszyklusanalyse begleitet werden. Aufgrund dieser Erwägungen liefert diese Studie Ergebnisse, die auf weniger komplexen, aber auf den Studienzweck zugeschnittenen methodischen Vorüberlegungen basieren. Dafür greift die Studie auf verschiedene, bereits bestehende Datengrundlagen zur Ermittlung des Herstellungsaufwands eines Notebooks zurück und ermittelt, wann jeweils der beste Zeitpunkt für den ökologisch optimalen Ersatz eines Notebooks ist. Darüber hinaus werden Sensitivitätsanalysen durchgeführt, die das Ergebnis aus unterschiedlichen Blickwinkeln verifizieren und Anhaltspunkte für mögliche Bilanzverschiebungen erkennen lassen.

2.2.1 Beschreibung der untersuchten Szenarien

Wie im Kapitel 2.1 geschildert, wird die Frage des zeitlich optimierten Ersatzes eines Notebooks anhand dreier unterschiedlicher Datengrundlagen vergleichend erörtert. Es handelt sich dabei um folgende Datengrundlagen:

1. EuP Los 3 – PCs (Desktop und Laptop) und Computermonitore³ (Szenario 1)
2. EcoInvent 2.2 (Szenario 2)
3. **UBA-Vorhaben UFOPLAN 2009** (Szenario 3)

Die Datengrundlage **UBA-Vorhaben UFOPLAN 2009** für IKT-Komponente wurde im Rahmen des UFOPLAN 2009 des Umweltbundesamtes „Ressourcenschonung im Aktionsfeld Informations- und Kommunikationstechnik (IKT)“, Teilvorhaben C „*Schaffung einer Datenbasis zur Ermittlung ökologischer Wirkungen der Produkte der IKT*“ geschaffen.⁴ Diese Daten sind in der ProBas-Datenbank⁵ über die Webschnittstelle www.probas.uba.de öffentlich zugänglich.

Herstellungsphase

Die Herstellungsphase eines Notebooks wird in der vorliegenden Studie in drei Szenarien jeweils nach einer der drei oben genannten Datengrundlagen modelliert. Die herstellungs-

³ European Commission DG TREN, Preparatory studies for Eco-design Requirements of EuPs (Contract TREN/D1/40-2005/LOT3/S07.56313): Lot 3 Personal Computers (desktops and laptops) and Computer Monitors Final Report (Task 1-8)

⁴ Prakash, S.; Liu, R.; Schischke, K.; Stobbe, L.: Schaffung einer Datenbasis zur Ermittlung ökologischer Wirkungen der Produkte der IKT, unter Mitarbeit von Gensch, C.-O. im Rahmen des UBA-Ufoplanvorhabens 2009 Ressourcenschonung im Aktionsfeld Informations- und Kommunikationstechnik (IKT) – FKZ 3709 95 308, Öko-Institut e.V. in Kooperation mit Fraunhofer Institut für Zuverlässigkeit und Mikrointegration (IZM) (2011)

⁵ Die UBA-Datenbank „ProBas – Prozessorientierte Basisdaten für Umweltmanagement-Instrumente“ www.probas.umweltbundesamt.de enthält mehrere Tausend Datensätze mit umweltrelevanten Stoffflussdaten zu Materialgewinnungs-, Produktions-, Transport- oder Dienstleistungsprozessen. Die Daten stammen aus unterschiedlichen Quellen; die Datenbank ProBas ist keine zitierbare Quelle, sie soll vielmehr die Funktion einer Bibliothek erfüllen, indem sie interessierten Nutzern einen möglichst einfachen Zugang zu den Datensätzen via Internet gewährleistet.

bezogenen Daten im UBA geförderten Vorhaben des UFOPLANS 2009 wurden nur für zwei Notebook-Komponenten, Bildschirm-Modul und integrierte Schaltungen (ICs), erhoben. Zu anderen Notebook-Komponenten gibt es in ProBas derzeit noch keine Datensätze. Daher wurden im Szenario 3 die fehlenden Datensätze zur Bilanzierung des Gesamtnotebooks aus EcoInvent 2.2 entnommen.

Transport (Distribution und Feinverteilung)

Der Transport von Notebooks von den Produktionsstandorten zum Großhandel und eine weitere Feinverteilung vom Großhandel zu den Verkaufsläden wurde für Szenarien 2 (EcoInvent 2.2) und 3 (UBA Vorhaben UFOPLAN 2009) gleichermaßen angenommen. Für Szenario 1 (EuP Los 3) wurde die Datengrundlage aus der Vorstudie zu EuP Los 3 entnommen.

Einkaufsfahrt

Eine Einkaufsfahrt der Endkunden zum Neukauf eines Notebooks wurde in allen Szenarien gleichermaßen angenommen.

Nutzungsphase

Zur Berechnung der Nutzungsphase wurde der TEC-Ansatz der Energy Star Version 5.0 für Computer zugrunde gelegt. TEC steht für „Total Energy Consumption“ (Gesamtenergieverbrauch) und ist ein Wert für die Prüfung und den Vergleich der Energieeffizienz von Computern, der den typischen Energieverbrauch eines Produkts im Normalbetrieb über einen repräsentativen Zeitraum wiedergibt. Für Notebooks ist das beim TEC-Ansatz verwendete Schlüsselkriterium der typische jährliche Stromverbrauch eines Computers in Kilowattstunden (kWh/a), wobei Messungen durchschnittlicher Betriebsmodus-Leistungsaufnahmeniveaus zugrunde gelegt werden, die an ein angenommenes typisches Nutzungsmuster (Betriebszeit) angepasst werden.

Die Datengrundlage für den Energieverbrauch in der Nutzungsphase bildete die Datenbank der Energy Star Version 5.0 für Computer.⁶ In allen Szenarien wurde von einem gleichen Nutzungsmuster in der Gebrauchsphase ausgegangen.

End-of-Life

Für Szenario 1 (EuP Los 3) wurde der Datensatz für die Entsorgung der Notebooks aus der Vorstudie zu EuP Los 3 verwendet. Für die Szenarien 2 und 3 wurde der entsprechende Datensatz aus EcoInvent 2.2 zu Grunde gelegt. In den Szenarien 2 und 3 handelt es sich um den Datensatz, der eine manuelle Vorbehandlung und anschließend eine mechanische Nachbehandlung (Schredder) eines Notebooks sowie die Raffinerie der Metallfraktionen in metallurgischen Anlagen beschreibt. Bei dieser Kombination von Prozessschritten werden neben Basismetallen wie Aluminium (Al), Kupfer (Cu) und Eisen (Fe) auch Edelmetalle Gold (Au), Silber (Ag) und Palladium (Pd) zu etwa 40% zurückgewonnen.

⁶ http://www.energystar.gov/index.cfm?fuseaction=find_a_product.showProductGroup&pgw_code=CO; Zugriff August 2010

Zusätzlich zu den drei Szenarien wird für die Entsorgungsphase ein viertes Szenario definiert. Dieses Szenario unterscheidet sich von Szenario 3 nur in der Rückgewinnungsquote der drei Edelmetalle (Gold, Silber und Palladium).⁷ Dabei wird angenommen, dass die Edelmetalle durch eine Optimierung der Recyclingtechnologie und Infrastruktur mit einer deutlich höheren Effizienz zurückgewonnen werden können. Die Motivation zur Erstellung des vierten Szenarios geht auf die Tatsache zurück, dass die Primärgewinnung von Edelmetallen im Vergleich zur Sekundärgewinnung mit erheblich höheren Umweltauswirkungen verbunden ist (Prakash und Manhart 2010, Hagelüken und Buchert 2008). Die steigende Nachfrage nach Rohstoffen – zum Teil ausgelöst durch immer kürzeren Lebensdauern von Konsumgütern - erhöht den Druck auf die Primärgewinnung und führt zu vielen negativen Umweltauswirkungen. Wenn es beispielweise gelänge, den größten Teil der Edelmetalle durch eine Optimierung der Recyclingtechnologie und Infrastruktur zurückzugewinnen, könnte der Druck auf die Primärgewinnung bis zu einem gewissen Maß reduziert werden. Diese Vermeidung von Umweltauswirkungen in der Primärgewinnung wird in der Bilanzierung als Gutschrift anerkannt. Welchen Einfluss optimierte Rückgewinnungsraten bei der Frage des Notebookersatzes spielen, soll anhand des vierten Szenarios ermittelt werden.

Das vierte Szenario legt dieselben Datengrundlagen für Herstellung, Transport, Einkaufsfahrt und Nutzung zugrunde wie Szenario 3. Das End-of-Life Management im vierten Szenario wird in der vorliegenden Studie als „Best-Practice“ und die End-of-Life im zweiten sowie im dritten Szenario als „Business-as-Usual“ bezeichnet.⁸

Die detaillierten Modellierungen der einzelnen Lebensphasen aller Szenarien werden in Kapitel 3 beschrieben.

Die folgende Tabelle 1 fasst die vier Szenarien noch einmal zusammen:

⁷ Siehe Kapitel 3.5.2

⁸ Es muss angemerkt werden, dass der Begriff „Best-Practice“, mit dem eine hoch effiziente Rückgewinnung der drei Edelmetalle Gold, Silber und Palladium beschrieben wird, an den Zweck dieser Studie angepasst wurde und nur Orientierungscharakter hat. In der Realität können aus dem Elektronikschrott von High-Tech-Anlagen bis zu 17 verschiedene Edel- und seltene Metalle zurückgewonnen werden. Lediglich aufgrund der Datenverfügbarkeit wurde nur die Rückgewinnung von Gold, Silber und Palladium berücksichtigt. Es kann deswegen davon ausgegangen werden, dass Treibhausentlastungspotenziale durch Sekundärgewinnung der Notebookmetalle in High-Tech-Anlagen signifikant höher liegen als in dieser Studie berechnet. Außerdem wären in einer erschöpfenden Analyse auch weitere Umwelteffekte, wie Versauerung, Eutrophierung, Biodiversitätsverlust usw. sowie soziale Auswirkungen zu berücksichtigen.

Tabelle 1: Überblick über Datenquellen und Annahmen der zu untersuchenden Szenarien⁹

Szenario Nr.	Herstellung	Transport (Distribution + Feinverteilung)	Einkaufsfahrt	Nutzung	End-of-Life
1	Berechnung aus EuP Los 3	Berechnung aus EuP Los 3	Zugrunde liegende Annahmen: Retour 10 km Auto	Entsprechend dem Nutzungsprofil aus Energy Star Version 5.0	Berechnung aus EuP Los 3
2	Berechnung entsprechend der Daten aus EcoInvent 2.2	Zugrunde liegende Annahmen: 1) Produktionsstandorte -> Flughafen: LKW: 500 km 2) Flug: Shanghai -> Warschau: 8000 km 3) Feinverteilung: LKW: 1000 km			Business-as-Usual
3	Berechnung entsprechend der Daten aus UBA-FuE-Vorhaben (UFOPLAN 2009) (für Bildschirm-Modul und ICs) + EcoInvent 2.2 (Sonstige Komponente) ¹⁰				Business-as-Usual
4	Berechnung entsprechend der Daten aus UBA-FuE-Vorhaben (UFOPLAN 2009) (für Bildschirm-Modul und ICs) + EcoInvent 2.2 (Sonstige Komponente) ⁸				Best-Practice

2.2.2 Funktion und funktionelle Einheit

Die Funktionen des untersuchten Systems spiegeln die geforderten Gebrauchseigenschaften wider. Für alle untersuchten Varianten sollten die Funktionen gleich sein.¹¹ Die in der vorliegenden Studie verwendeten Datengrundlagen (EuP Los 3, EcoInvent 2.2 und UBA-FuE-Vorhaben (UFOPLAN 2009) zur Ermittlung des zeitlich optimierten Ersatzes eines Notebooks weisen unterschiedliche Konfigurationen und unterschiedliche technische Spezifikationen der Notebooks auf (siehe Tabelle 2). Allerdings wird die Funktion unterschiedlicher Varianten der Notebooks als gleichwertig angesehen.

⁹ Die Nutzungsphase wurde für alle Szenarien vereinheitlicht, um die Unterschiede in der Bewertung des Herstellungsaufwandes klarer darzustellen.

¹⁰ inklusive Produktionsaufwand

¹¹ Abweichungen müssen entsprechend erläutert und ggf. kompensiert werden. Gemäß ISO 14040 2006 dient eine funktionelle Einheit dazu, einen quantifizierten Bezug zu schaffen, auf den Input und Outputflüsse in der Ökobilanz bezogen und auf dessen Basis verschiedene Varianten verglichen werden können.

Tabelle 2: Spezifikationen der Notebooks in EuP Los 3, EcoInvent 2.2 und UBA-FuE-Vorhaben (UFOPLAN 2009)

	EcoInvent 2.2	EuP Los 3	UBA-FuE-Vorhaben (UFOPLAN 2009)
Prozessor	Pentium 3, 600 MHz	1,7 GHz	Pentium 3, 600MHz ¹²
HDD	10 GB HDD	60 GB HDD	10 GB HDD ⁹
Speicherchips	128 MB RAM	512 MB RAM	8 GB
Bildschirmgröße	12,1 Zoll	15 Zoll	15,4 Zoll
Gewicht	3,15 kg (mit Verpackung) 2,17kg (ohne Verpackung)	3,7 kg (mit Verpackung) 2,8 kg (ohne Verpackung)	3,3 (mit Verpackung) 2,4 (ohne Verpackung) ¹³
Referenzjahr	2005	2005	2000-2010

Zu betonen ist, dass das Ziel der Studie nicht darin besteht, eine vergleichende Ökobilanz verschiedener Notebooks zu erstellen, sondern unter Berücksichtigung verschiedener Datengrundlagen den besten Zeitpunkt zu ermitteln, wann ein Notebook aus ökologischen Gesichtspunkten ersetzt werden sollte. Die Konfiguration des Notebooks in den Szenarien 3 und 4 ist daher nur eine fiktive Annahme, sie entspricht jedoch die Konfiguration eines typischen Notebooks. Die Vorgänge dieser ökobilanziellen Betrachtung sind zwar in Anlehnung an ISO 14040/44 (2006), es wird aber in der vorliegenden Studie nur eine Wirkungskategorie, nämlich das Treibhauspotenzial (Global Warming Potential, GWP) betrachtet. Denn das Treibhauspotenzial ist direkt mit dem Energieverbrauch, sowohl in der Nutzungs- als auch in der Herstellungsphase, verbunden. Eine Betrachtung weiterer Wirkungskategorien, wie Versauerungs- und Eutrophierungspotenzial sowie photochemische Oxidantienbildung und Ökotoxizität, war aufgrund der schlechten Datenlage im Rahmen dieser Studie nicht möglich. So hat beispielsweise eine Ökobilanz zum Recycling von Ni-MH-Batterien gezeigt, dass das Recycling nur einen bescheidenen Beitrag zur Reduzierung des Treibhauseffekts bewirkt (Öko-Institut 2010). Hingegen bewirkte das Recycling in dieser Bilanz einen sehr großen Beitrag zur Reduktion der Versauerung und der Eutrophierung. Auch werden die toxisch relevanten Emissionen des Bergbaus und der Aufkonzentrierung vermieden. Diese Effekte sind auch bei den Li-Ion Akkus, die in den mobilen IKT-Geräten, wie Notebooks eingesetzt werden, zu erwarten.

Die funktionelle Einheit wird definiert als 1 Notebook in seiner gesamten Lebensdauer. Als Lebensdauer aller untersuchten Notebooks wurden 5 Jahre angenommen. Es wurde davon ausgegangen, dass die Notebooks in dieser Zeit ohne Funktionsstörung und ohne Ersatzteilaustausch arbeiten und keine Reparaturen erforderlich sind.

¹² Übernommen aus EcoInvent 2.2

¹³ Das Gewicht von Bildschirm und Speicherchips (ICs) aus UBA-FuE-Vorhaben (UFOPLAN 2009) und das Gewicht der sonstigen Komponenten aus EcoInvent 2.2 wurden addiert

2.2.3 Festlegung der Systemgrenzen

Die Systemgrenze der in dieser Studie untersuchten vier Szenarien wird folgendermaßen dargestellt (Abbildung 1):

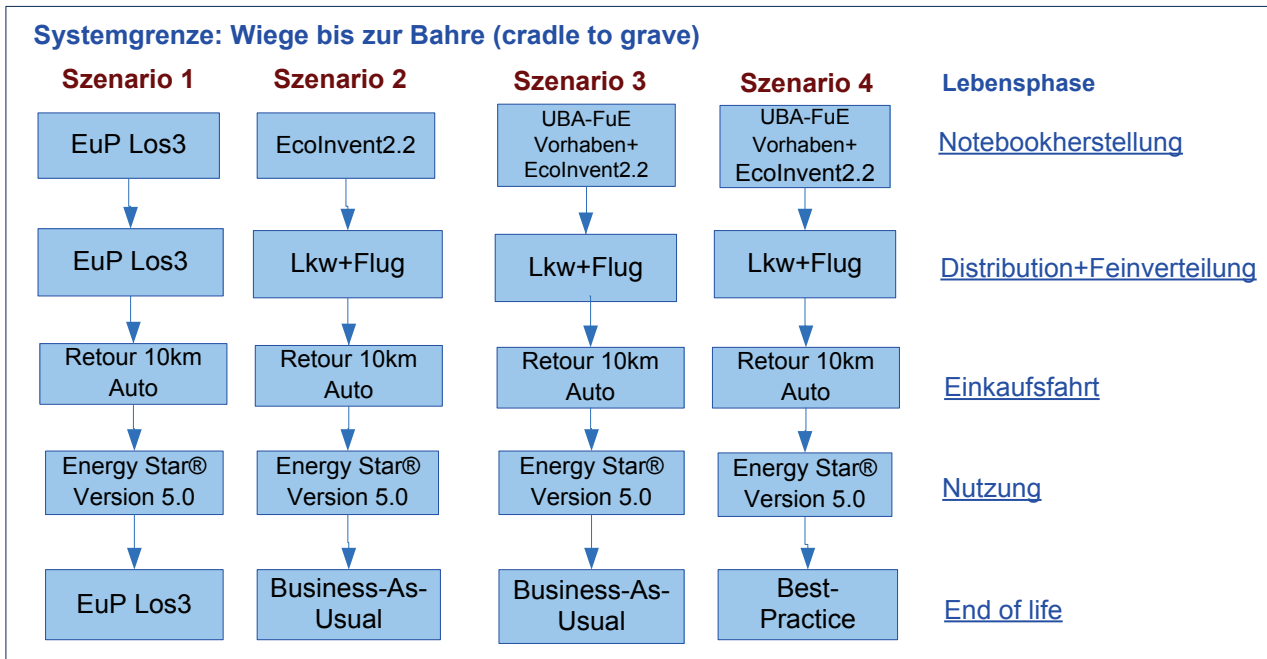


Abbildung 1: Systemgrenze der untersuchten Szenarien

Die nicht berücksichtigten Aspekte sind im Folgenden beschrieben:

- Unterschiedliche Spezifikationen und Funktionen des neuen Notebooks sind außerhalb des Untersuchungsrahmens.
- Die Herstellung und die Entsorgung der Investitionsgüter (sog. Capital Equipment) werden generell nicht erfasst (z.B. Energie- und Stoffaufwand bei der Herstellung der Anlagen oder LKW).
- Darüber hinaus werden die verwendeten Sekundärdaten aus EcoInvent 2.2 (2010) und EuP Los 3 (2005) sowie UBA-FuE-Vorhaben (UFOPLAN 2009) (Prakash et al. 2011) in der vorliegenden Studie nicht detailliert dokumentiert. Die detaillierte Dokumentation dieser Daten sind in den entsprechenden Originalquellen zu finden.
- Bei End-of-Life werden nur Entsorgung und Metallrecycling betrachtet. Die Wiederverwendung (Re-Use) ist außerhalb der Systemgrenze dieser Studie.
- Andere Umwelteffekte, wie Versauerung, Eutrophierung, Rohstoffaufwand und Biodiversitätsverlust sowie soziale Auswirkungen werden in dieser Untersuchung nicht betrachtet.

2.2.4 Berücksichtigte Wirkungskategorien

Im Einklang mit dem Ziel und dem Untersuchungsrahmen dieser Studie wurde bei der Wirkungsabschätzung nur das Treibhauspotenzial (Global Warming Potential, GWP) betrachtet.

3 Datengrundlage

3.1 Herstellungsphase

Die Herstellungsphasen der beschriebenen vier Szenarien werden anhand dreier verschiedener Datengrundlagen abgebildet (Tabelle 3).

Tabelle 3: Die in den Herstellungsphasen verwendeten Datengrundlagen

Szenario	Datengrundlagen für die Herstellung eines Notebooks
1	EuP Los 3
2	EcolInvent 2.2
3	UBA-FuE-Vorhaben (UFOPLAN 2009) (für die Herstellung des Bildschirm-Moduls und der ICs) + EcolInvent 2.2 (Sonstige Komponente+ Produktionsaufwand eines Notebooks)
4	UBA-FuE-Vorhaben (UFOPLAN 2009) (für die Herstellung des Bildschirm-Moduls und der ICs) + EcolInvent 2.2 (Sonstige Komponente + Produktionsaufwand eines Notebooks)

EuP Los 3

Im Rahmen der Ökodesign-Richtlinie 2009/125/EG gibt die Europäische Kommission i.d.R. zu jeder im Arbeitsprogramm¹⁴ festgelegten Produktgruppe eine Vorstudie in Auftrag. Diese Studien sollen eine Grundlage (rechtliche Grundlagen, technische Daten, Verkaufszahlen, Umwelteinfluss etc.) für die Gestaltung angemessener Durchführungsmaßnahmen schaffen. Eine dieser Vorstudien (Los 3) befasst sich mit PCs (Desktop und Notebook) und Monitoren und wurde 2007 veröffentlicht.¹⁵ Tabelle 4 stellt die Materialzusammensetzung dar, wie sie in der Vorstudie zu EuP Los 3 betrachtet wurde. Diese Liste zeigt die im Jahr 2005 am meisten verkauften Notebooks mit 15 Zoll LCD-Bildschirm und 2,8 kg Gewicht (ohne Verpackung) (EuP 2007). Die Bezugsgröße dieses Datensatzes ist 1 produziertes Notebook mit einem Gewicht von 3,8 kg (mit Verpackung).

Tabelle 4: Materialzusammensetzung für Notebooks (EuP-Studie 2007)

Materialien (inkl. Verpackung)	Gewicht [g]
LDPE	43
PP	4
PS	3
EPS	50

¹⁴ Zur Vorbereitung eines Arbeitsprogramms erarbeiteten die Auftragnehmer der von der EU-Kommission beauftragten Studie eine Liste an Produktgruppen, die nach Auffassung der Studienbetreiber als nächstes im Rahmen der Ökodesign-Richtlinie behandelt werden sollten. Im Oktober 2008 veröffentlichte die Kommission das Arbeitsprogramm für den Zeitraum 2009-2011. Im November 2010 hat die Studie für das neue Arbeitsprogramm für die Zeit nach 2011 begonnen (www.eup-network.de).

¹⁵ European Commission DG TREN, Preparatory studies for Eco-design Requirements of EuPs (Contract TREN/D1/40-2005/LOT3/S07.56313): Lot 3 Personal Computers (desktops and laptops) and Computer Monitors Final Report (Task 1-8)

Materialien (inkl. Verpackung)	Gewicht [g]
PVC	23
ABS	142
PA 6	281
PC	267
PMMA	36
Epoxy	3
Steel sheet galvanized	489
Al sheet /extrusion	38
Cu wire	60
Cu tube /sheet	15
MgZn5 cast	122
LCD screen m ² (viewable screen size)	63
Big caps & coils*	501
Slots / ext. Ports	133
Integrated circuits, 5% silicon, Au	47
Integrated circuits, 1% silicon	31
SMD & LEDs avg.	50
PWB 1/2 lay 3.75 kg/m ²	5
PWB 6 lay 4.5kg/m ²	77
Solder SnAg4Cu0.5	7
Glass for lamps	1
Cardboard	921
Glass for LCD	362
Summe	3774

* „Big Caps & Coils“ wurde in der Vorstudie zu EuP Los 3 vereinfacht als Referenz für die Herstellung des Li-Ion-Akkus modelliert. Somit bezieht sich das Gewicht auf das Gewicht des Li-Ion-Akkus.

EcoInvent 2.2

Die EcoInvent Datenbank beschreibt ein Notebook Omnibook 500 der Firma Hewlett Packard (HP) im Zeitraum 2001-2006 (Lehmann und Hischier 2007). Die Datensätze des dazugehörigen Lithium-Ion-Akkus sowie des LCD-Bildschirm-Moduls wurden 2010 aktualisiert (EcoInvent 2.2 Report Nr.16 2010). Die Herstellung des betrachteten Notebooks umfasst die komplette Produktionskette, d.h. die Herstellung der einzelnen Komponenten, die Vorketten der Materialherstellung und -verarbeitung, die Montage, die entsprechenden Transportwege sowie die Verpackung. Zu beachten ist, dass in dem Herstellungsdatensatz die Entsorgung eines Notebooks und seiner Verpackung eingeschlossen ist. Zur Ermittlung des Herstellungsaufwandes wurde in der vorliegenden Studie der Anteil der Entsorgung und des Transports des Endproduktes abgezogen, um den herstellungsbezogenen GWP-Wert zu berechnen (Kapitel 4.1.2). Die Bezugsgröße dieses Datensatzes ist 1 hergestelltes Notebook. Da EcoInvent eine kommerzielle und kostenpflichtige Datenbank ist, dürfen die detaillierten Input- und Outputdaten nicht in öffentlich zugänglichen Publikationen dargestellt werden.

UBA-FuE-Vorhaben (UFOPLAN 2009)

Im Rahmen des Ufoplanvorhabens 2009 (FKZ 3709 95 308) des Umweltbundesamtes⁴ wurden Datensätze für zwei Komponenten, nämlich für ein Bildschirm-Modul und für integrierte

Schaltungen (Speicherchip) eines Notebooks für die Veröffentlichung in die Datenbank ProBas erstellt (Prakash et al. 2011).

Der Datensatz zum Bildschirm-Modul beruht auf einer Umwelt-Produktdeklaration (Environmental Product Declaration, EPD) der taiwanesischen Firma CMO.¹⁶ Die Daten zur Kupferherstellung in dieser Umwelt-Produktdeklaration wurden von Prakash et al. 2011 korrigiert.

Die Systemgrenze des Datensatzes dieses Bildschirm-Moduls liegt von der Wiege bis zum Werkstor (Cradle-to-Gate). Das heißt, es umfasst die Ressourcenentnahme, die Herstellung der Materialien und Vorprodukte, die Fertigungsprozesse und den Transport der Güter bis zur CMO-Fabrik. Entlang dieser Lebenskette verursacht das Bildschirm-Modul 35,11 kg CO₂e pro Stück betrachtetem Bildschirm von einer Größe von 15,4 Zoll und einem Gewicht 530 g.

Für die Berechnung des Transports des Bildschirm-Moduls vom Werkstor bis zur Endmontage eines Notebooks werden 6.250 km per Flug zugrunde gelegt. Die Entfernung von 6.250 km beruht auf der Basis eines Durchschnittswertes für einen Transport Asien-Asien (ca. 2.500km) und einen Transport USA-Asien (10.000km).

Der Datensatz für die integrierten Schaltungen (IC) beschränkt sich auf die direkten Produktionsphasen der ICs. Der direkte energetische und materielle Produktionsaufwand wurde im Prakash et al. (2011) ohne entsprechende Vorketten erfasst. Darüber hinaus werden die Datensätze zu ICs in ProBas differenziert nach Front-End- und Back-End-Prozessen dargestellt. Daher werden in ProBas die Datensätze zu ICs mit unterschiedlichen Bezugsgrößen dargestellt (Tabelle 5).

Tabelle 5: Überblick über die in ProBas veröffentlichten Datensätze zu ICs (Prakash et al. 2011)

Nr.	Datensatz Name in ProBas	Bezugsgröße	Anmerkung
1.	Silizium-Wafer-Herstellung	1 cm ² polierter Silizium-Wafer	Zum Teil mit Vorkette. Die Vorkette von Chlorwasserstoff, Graphit und Strommix sind nicht eingeschlossen
2.	IC-Fertigung Front-End-Prozess\“Wafer Out“	1 cm ² fertiger Wafer Out	Ohne Vorkette. Die zusätzlichen Aufwandfaktoren für die Herstellung der hochreinen Chemikalien werden jedoch beschrieben.
3.	IC-Fertigung Front-End-Prozess\“good die out“	1 cm ² fehlerfreie Chips Out	Ohne Vorkette. Die zusätzlichen Aufwandfaktoren für die Herstellung der hochreinen Chemikalien werden jedoch beschrieben.
4.	IC-Fertigung Back-End-Prozess	1 Stück Speicherchip	Ohne Vorkette

Der im Rahmen des UBA-FuE-Vorhabens (UFOPLAN 2009) in ProBas erstellte Datensatz zur integrierten Schaltung (IC) ist ein spezifischer Speicherchip der Firma Samsung mit 1 GB (Giga-

¹⁶ Chi Mei Optoelectronics (CMO) ist eine Gründung der Chi Mei Corporation. CMO erzielte 2007 einen Umsatz von 9,9 Milliarden US-Dollar. Im März 2010 fusionierten die Firmen Innolux Display Corp., Chi Mei Optoelectronics and TPO Displays Corp. zum neuen Unternehmen Chimei Innolux Corporation. Seine wichtigsten Produkte sind Flüssigkristallbildschirme (LCD) und Bildschirme für Fernseher, Desktops und Notebooks, die von Anbietern weltweit verbaut werden. Chimei Innolux zählt neben AU Optronics Corporation (AUO), LG Display und Samsung zu den größten Herstellern von Flüssigkristallflachbildschirmen mit Dünnschichttransistortechnologie (TFT).

Byte) DDR3 (Double Data Rate 3) DRAM (Dynamic Random Access Memory) Arbeitsspeicher mit FBGA (Fine Pitch Ball Grid Array) Packaging-Typ. Die unverkapselte Fläche besitzt 43 mm^2 und das verkapselte fertige Produkt wiegt $0,162 \text{ g}$ (Prakash et al. 2011). Damit eine Verknüpfung der Front-End-Prozesse und Silizium-Wafer-Herstellung erstellt werden kann, sind die Hauptmaterialflüsse (Siliziumflüsse) erforderlich. Abbildung 2 veranschaulicht die Hauptprozesse und -flüsse.

Folglich wird die in der vorliegenden Studie verwendete Vorkette für Datensätze zu ICs nach folgender Reihenfolge dokumentiert und erläutert:

1. Silizium-Wafer-Herstellung
2. Front-End-Prozesse für die Speicherchip-Herstellung
3. Back-End-Prozesse für die Speicherchip-Herstellung
4. Transport der fertigen Speicherchips zwischen Silizium-Wafer-Herstellung und Front-End-Prozess; zwischen Front-End-Prozess und Back-End-Prozess; zwischen Back-End-Prozess und Montage der Notebooks.

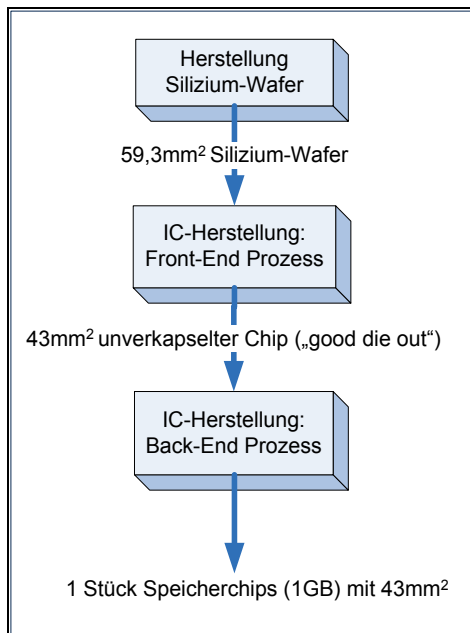


Abbildung 2: Hauptmaterialflüsse (Siliziumflüsse) bei der IC-Herstellung

Silizium-Wafer-Herstellung

Wie Tabelle 5 entnommen werden kann, enthält der Datensatz zur Silizium-Wafer-Herstellung, mit Ausnahme der Strombereitstellung und der Graphit- bzw. Chlorwasserstoffherstellung, die Vorketten zur Bereitstellung jeweiligen Vorprodukts. Da der Faktor Energieverbrauch für die Ziele der vorliegenden Studie eine entscheidende Rolle spielt, wird angestrebt, den durchschnittlichen Strommix in Anlehnung an die weltweite Verteilung der Silizium-Wafer-Herstellung zu ermitteln. Nach eigener Abschätzung kann die Produktionsverteilung nach Ländern, wie in Tabelle 6 dargestellt, vorgenommen werden. Die länderspezifischen Emissionsfaktoren sind im Anhang (Tabelle 42) dieses Berichtes beigefügt. Die Input- und

Outputdaten für die Herstellung des Silizium-Wafers sind in Tabelle 43 aufgelistet. Die Datenquellen entsprechender Daten werden in Prakash et al. (2011) dokumentiert.

Tabelle 6: Produktionsverteilung der Silizium-Wafer-Herstellung nach Ländern (eigene Schätzung)

Produktionsverteilung der Silizium-Wafer-Herstellung nach Ländern	Anteil
Japan	66%
Deutschland	12,5%
USA	8,5%
Korea	8,5%
Singapur	4%
Summe	100%

Tabelle 7: Die verwendeten sekundären Daten für die Vorkette der Silizium-Wafer-Herstellung

Beschreibung der Inputs	Prozesse	Datenbank	Datensätze	Ortsbezug	Zeitbezug
Siliziumdioxid	Vorkette: Gewinnung aus Quarzsand	GEMIS 4.6	Xtra-Abbau\Quarzsand-DE-2010	Deutschland	2010
Elektrodenmaterial	Vorkette: Herstellung	ProBas ¹⁷	Graphit	Europa	2000-2004
Chlorwasserstoff (HCl)	Vorkette: Herstellung	Ecolnvent 2.2	Chlorwasserstoff aus der Reaktion von Chlor mit Wasserstoff, ab Werk	Europa	1997-2000

Front-End-Prozesse für die IC-Herstellung

Der im Rahmen des UBA-FuE-Vorhabens (UFOPLAN 2009) in ProBas erstellte Datensatz zum Front-End-Prozess umfasst ausschließlich die direkten Produktionsprozesse, d.h. der Silizium-Wafer als Ausgangspunkt bis zur fertigen Produktion eines fehlerfreien unverkapselten Chips („good die out“). Der Strommix wird mit einem weltweiten Durchschnitt in Anlehnung an die Produktionsverteilung nach Ländern, bezogen auf Front-End-Prozesse, ermittelt und modelliert (Tabelle 8). Die länderspezifischen Emissionsfaktoren sind im Anhang (Tabelle 42) dieses Berichtes aufgeführt.

Tabelle 8: Produktionsverteilung der Front-End-Prozesse nach Ländern (eigene Schätzung)

Produktionsverteilung der Front-End-Prozesse nach Ländern	Anteil
USA	15%
Europa	8%
Japan	23%
Korea	14%
Taiwan	23%

¹⁷ Öko-Institut 2005, <http://www.probas.umweltbundesamt.de/php/volltextsuche.php?&prozessid={5F5B8E83-F37B-4B7E-A4C5-A33A19A64F0B}&id=1&step=1&search=Graphit&b=1>

China	8%
Singapur	9%
Summe	100%

Bei der IC-Herstellung werden viele Chemikalien mit hohen Reinheitsgraden eingesetzt. Higgs et al. (2010) haben den zusätzlichen Energieverbrauch durch die Reinigungsprozesse untersucht. Die ermittelten Faktoren sind in Prakash et al. (2011) zusammengefasst und finden sich auch im Anhang dieses Berichtes (Tabelle 47). In der folgenden Tabelle 9 werden die in der vorliegenden Studie verwendeten Sekundärdaten für die Modellierung der Front-End-Prozesse dokumentiert.

Tabelle 9: Die verwendeten Sekundärdaten für IC-Front-End-Prozesse

Prozesse	Datenbank	Datensätze + Quelle	Ortsbezug	Zeitbezug
Silizium-Wafer	ProBas	Silizium-Wafer-Herstellung	Weltmix	2000-2002
Elementare Gase und Chemikalien				
N2 (hochrein)	GEMIS 4.6	Xtra-generisch\N2 (gasförmig) + Faktor für hochrein (Higgs et al. 2010)	Deutschland	2000
O2 (hochrein)	GEMIS 4.6	Xtra-generisch\O2 (gasförmig) + Faktor für hochrein (Higgs et al. 2010)	Deutschland	2000
Ar (Argon) (hochrein)	GEMIS 4.6	Xtra-generisch\Argon-DE-2005 + Faktor für hochrein (Higgs et al. 2010)	Deutschland	2005
H2 (hochrein)	GEMIS 4.6	Chem-anorg\H2-Stoff + Faktor für hochrein (Higgs et al. 2010)	Deutschland	2000
Schwefelsäure (hochrein)	Ecolnvent 2.2	Schwefelsäure, flüssig, ab Werk + Faktor für hochrein (Higgs et al. 2010)	Europa	2001
Phosphorsäure (hochrein)	GEMIS 4.6	Chem-anorg\Phosphorsäure + Faktor für hochrein (Higgs et al. 2010)	Deutschland	2000
Wasserstoffperoxid (hochrein)	GEMIS 4.6	Chem-anorg\Wasserstoffperoxid + Faktor für hochrein (Higgs et al. 2010)	Deutschland	2000
2-Propanol (C ₃ H ₈ O)/Isopropylalkohol (IPA) (hochrein)	GEMIS 4.6	Chem-org\2-Propanol + Faktor für hochrein (Higgs et al. 2010)	Deutschland	2005
Ammoniumhydroxid (hochrein)	GEMIS 4.6	Chem-anorg\Ammoniak-DE-2010 + Faktor für hochrein (Higgs et al. 2010)	Deutschland	2010
Fluorwasserstoffsäure (hochrein)	Ecolnvent 2.2	Fluorwasserstoff, ab Werk + Faktor für hochrein (Higgs et al. 2010)	Deutschland	1979-2006
PFC-Chemikalien				
Chem-org\CF ₄	ProBas ¹⁸	Chem-org\CF ₄	Deutschland	2005
Chem-org\C ₂ F ₆	ProBas ¹⁹	Chem-org\C ₂ F ₆	Deutschland	2005
CHF ₃	Ecolnvent 2.2	Trifluormethan, ab Werk	Weltmix	2000-2005

¹⁸ Öko-Institut 2005, <http://www.probas.umweltbundesamt.de/php/volltextsuche.php?&prozessid={3BF953E5-B516-4B48-8D11-52AD3FEB862F}&id=1&step=1&search=Chem-Org\CF4&b=1>

¹⁹ Öko-Institut 2005, <http://www.probas.umweltbundesamt.de/php/volltextsuche.php?&prozessid={AE1AD576-FD7E-46B6-ACAE-00D61BAEEFFB}&id=1&step=1&search=Chem-Org\C2F6&b=1>

Prozesse	Datenbank	Datensätze + Quelle	Ortsbezug	Zeitbezug
Chem-anorg\NF ₃	ProBas ²⁰	Chem-anorg\NF ₃	Deutschland	2005
Chem-anorg\SF ₆	ProBas ²¹	Chem-anorg\SF ₆	Deutschland	2005
Wasser	ProBas ²²	Xtra-Trinkwasser\DE-allgemein	Deutschland	2000
NaOH (für Abwasserbehandlung)	ProBas ²³	Chem-anorg\NaOH-mix-DE	Deutschland	2000
Energieverbrauch				
Strommix (nach Produktionsverteilung)	s. Tabelle 8		Strommix nach Produktionsverteilung	2005-2010
Gas	GEMIS 4.6	Gas-Kessel-DE-2010 (Endenergie)	Deutschland	2010

Back-End-Prozesse für die IC-Herstellung

Der im Rahmen des UBA-FuE-Vorhabens (UFOPLAN 2009) in ProBas erstellte Datensatz zum Back-End-Prozess umfasst ausschließlich die direkten Produktionsprozesse, d.h. den fehlerfreien unverkapselten Chip („good die out“) als Ausgangspunkt bis zu einem Stück fertiger verkapselter Speicherchip.²⁴ Der Strommix wird mit einem weltweiten Durchschnitt in Anlehnung an die Produktionsverteilung nach Ländern, bezogen auf Back-End-Prozesse, ermittelt und modelliert. (Tabelle 10). Die länderspezifischen Emissionsfaktoren sind im Anhang (Tabelle 42) eingefügt. Die Input- und Outputdaten der Back-End-Prozesse (Prakash et al. 2011) befinden sich in der Tabelle 46 des Anhangs. Die verwendeten Sekundärdatensätze sind in Tabelle 11 zusammengefasst.

²⁰ Öko-Institut 2005, <http://www.probas.umweltbundesamt.de/php/volltextsuche.php?&prozessid={C59A04E2-4887-4C4B-B397-301354829378}&id=1&step=1&search=Chem-Anorg\NF3&b=1>

²¹ Öko-Institut 2005, <http://www.probas.umweltbundesamt.de/php/volltextsuche.php?&prozessid={045519F2-13CD-43A0-8EE9-9B452FEAE0ED}&id=1&step=1&search=Chem-Anorg\SF6&b=1>

²² Öko-Institut 2000, <http://www.probas.umweltbundesamt.de/php/volltextsuche.php?&prozessid={611FF321-CDF7-456E-B8AE-A3016C1163B4}&id=1&step=1&search=Xtra-Trinkwasser\DE-allgemein&b=1>

²³ Öko-Institut 2000, <http://www.probas.umweltbundesamt.de/php/volltextsuche.php?&prozessid={0E0B2AC5-9043-11D3-B2C8-0080C8941B49}&id=1&step=1&search=Chem-Anorg\NaOH-mix-DE&b=1>

²⁴ In diesem Fall SAMSUNG DRAM DDR3 mit Packagingtyp K4B1G0846E-HCH9

Tabelle 10: Produktionsverteilung der Back-End-Prozesse nach Ländern (eigene Schätzung)

Produktionsverteilung der Back-End-Prozesse nach Ländern	Anteil
USA	10%
Europa	0%
Japan	10%
Korea	10%
Taiwan	15%
China	15%
Singapur	15%
Malaysia	15%
Philippinen	10%
Summe	100%

Tabelle 11: Die verwendeten Sekundärdatensätze für IC-Back-End-Prozesse

Herstellungsprozesse	Datenbank	Datensätze	Ortsbezug	Zeitbezug
Fehlerfreier unverkapselter Chip	ProBas	IC-Fertigung Front-End-Prozess\''good die out''	Weltmix	2002-2010
Polymere	ProBas ²⁵	Polystyrene thermoforming	Europa	keine Angabe
Siliziumdioxid	GEMIS 4.6	Xtra-Abbau\Quarzsand-DE-2010	Deutschland	2010
Gold	ProBas/IFEU ²⁶	Gold	Weltmix	2000-2004
"Carbon Black"	ProBas ²⁷	Graphit	Europa	2000-2004
Silber (Ag)	ProBas/IFEU ²⁸	Silber	Europa	2000-2005
Kupfer (Cu)	ProBas/IFEU	Kupfer	Weltmix	2000-2004
Zinn (Sn)	ProBas/IFEU	Zinn	Weltmix	2000-2004
BT-Core (Bismaleimide-triazine) + Cu + Au + Ni	Ecolnvent 2.2: Triazin-Verbindungen, ab Regionallager ProBas/IFEU die sonstige Metalleherstellung		Weltmix	2000-2010
Strommix (nach Produktionsverteilung)	s. Tabelle 10		Strommix nach Produktionsverteilung	2005-2010
Gas	GEMIS 4.6	Gas-Kessel-DE-2010 (Endenergie)	Deutschland	2010

²⁵ PlasticsEurope 2005, <http://www.probas.umweltbundesamt.de/php/volltextsuche.php?&prozessid={4B7D42FE-0847-4A31-B5A8-8F5C9E16D2B2}&id=1&step=1&search=Polystyrene thermoforming&b=1>

²⁶ IFEU (Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg) 2011

²⁷ Öko-Institut 2005, <http://www.probas.umweltbundesamt.de/php/volltextsuche.php?&prozessid={5F5B8E83-F37B-4B7E-A4C5-A33A19A64F0B}&id=1&step=1&search=Graphit&b=1>

²⁸ IFEU (Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg) 2011

Zu bemerken ist, dass die von der Firma Samsung angegebene Materialzusammensetzung von DDR3 Speicherchips die Mischung von BT-Core + Cu + Au + Ni als eine aggregierte Summe vorgibt. Damit die Herstellung nach einzelnen Materialien modelliert werden kann, wird in der vorliegenden Studie eine eigene Schätzung vorgenommen (Tabelle 12).

Tabelle 12: In der Modellierung angenommener Anteil von BT-Core + Cu + Au + Ni (eigene Schätzung)

BT-Core (Bismaleimide-triazine) + Cu + Au + Ni	Anteil
BT(Bismaleimide-triazine)-core	78%
Cu	20%
Ni	1,50%
Au	0,50%
Zwischensumme	100%

Transport

Der Transport der Chips umfasst folgende Abschnitte:

- von der Silizium-Wafer-Herstellung zum Front-End-Prozess,
- vom Front-End- zum Back-End-Prozess,
- vom Back-End-Prozess zur Endmontage des Notebooks.

Wie in Tabelle 6, Tabelle 8 und Tabelle 10 bereits dargestellt, sind die Produktionsstandorte über die ganze Welt verteilt. Jain (2011) berichtet, dass in vielen Fällen Chips an zwei verschiedenen Standorten montiert und dann an zwei weiteren Standorten getestet werden. Im Rahmen dieser Studie ist es nicht möglich, die komplette Logistikkette zu erfassen. Daher wird angenommen, dass der Transport per Flugzeug 6.250 km umfasst (Durchschnittswert Asien-Asien: ca. 2.500 km und USA-Asien: ca. 10.000 km).

Tabelle 13: Verwendeter Datensatz für Gütertransport per Flugzeug

Input	Datenbank	Datensätze	Ortsbezug	Zeitbezug
Transport per Flugzeug	Ecolvent 2.2	Transport, Luftfracht, Intercontinental	Europa	2000

3.2 Distribution und Feinverteilung der Fertigprodukte

Die Daten für die Bilanzierung der Distribution und Verteilung zu den Verkaufsstandorten beruhen auf den in O’Connell und Stutz (2010) getroffenen Annahmen sowie eigener Schätzung. Bezüglich des europäischen Distributionsnetzes werden in O’Connell und Stutz (2010) folgende Annahmen getroffen:

- Lufttransport von China nach Polen und
- weiterer Landtransport per LKW von Polen bis zu den Endkunden.

Diesen Annahmen zufolge teilt sich die gesamte Distributionskette in drei Phasen auf (Abbildung 3):

1. Von den Produktionsstandorten zum Flughafen (LKW 16-32 t) → 500 km und 80% Auslastung

2. Von Shanghai PuDong Flughafen nach Warschau Flughafen → 8.000 km
3. Feinverteilung von Polen zu den Verkaufsläden (LKW 7,5–16 t) → 1.000 km und 80% Auslastung.

Die Auslastung und der LKW-Typ wurden in der vorliegenden Studie geschätzt und betreffen die Hin- und Rückfahrt. Aus der Ökobilanzperspektive soll sowohl die Hin- als auch die Rückfahrt eines LKW-Transports berücksichtigt werden. Das heißt, wenn der LKW bei der Hinfahrt voll beladen ist (100% Auslastung) und bei der Rückfahrt andere Waren mit einer Auslastung von 60% transportiert, so beträgt die Auslastung für die Hin- und Rückfahrt 80%. Die Umweltbelastung durch die Rückfahrt wird nur zu 40% den Notebooks zugeschrieben, die übrigen 60% werden den anderen transportierten Waren zugeschrieben.

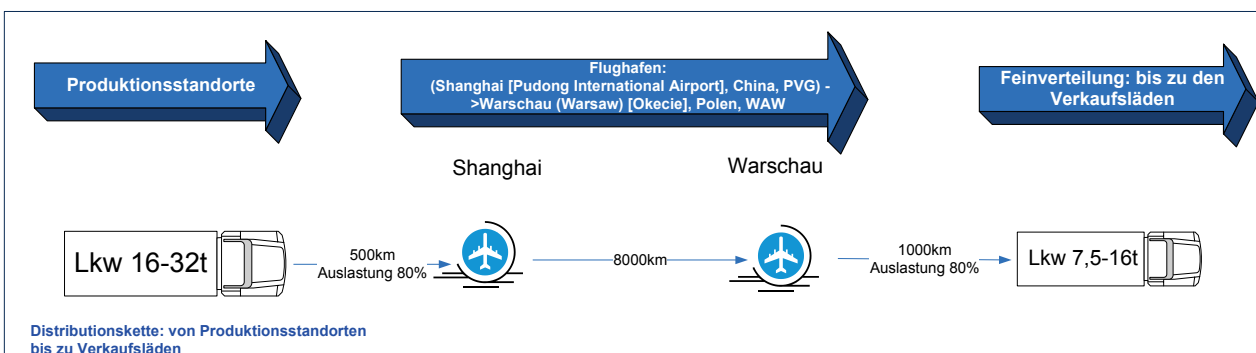


Abbildung 3: Grafische Darstellung - Distributionskette

Der Transport der Güter wird nach dem jeweiligen Liefergewicht gewichtet. Das heißt, dass die drei untersuchten Notebooks aufgrund ihres unterschiedlichen Gewichts mit verschiedenen Anteilen zu den Umweltbelastungen beitragen, die während der Distributionsphase entstehen. Die verwendeten Datensätze sind in Tabelle 14 aufgelistet.

Tabelle 15 zeigt die entsprechenden Emissionsfaktoren. Zu beachten ist, dass der Emissionsfaktor des Flugverkehrs keinen RFI (Radiative Forcing Index) berücksichtigt. In der Sensitivitätsanalyse wird der Flugverkehr mit RFI berechnet, um die Bandbreite der Ergebnisse zu identifizieren (Kapitel 5.4)

Tabelle 14: Datensätze zur Modellierung der Distribution und Feinverteilung

Input	Datensätze	Zeitbezug	Ortsbezug	Quelle
Transport von Produktionsstandorten zum Flughafen	Transport, LKW 16-32 t, EUR03	2005	Europa	EcolInvent 2.2
Flugverkehr (von Shanghai nach Warschau)	Transport, Luftfracht, Intercontinental	2000	Europa	EcolInvent 2.2
Feinverteilung (vom Flughafen zu den Verkaufsläden)	Transport, LKW 7.5-16t, EUR03	2005	Europa	EcolInvent 2.2

Tabelle 15: Emissionsfaktoren des LKW- und Flugtransports (EcoInvent 2.2)

Input	Emissionsfaktoren (GWP-Werte)	Einheit
Transport, LKW 16-32 t, EUR03	0,15	kg CO ₂ e/tkm
Güter-Flugverkehr (interkontinental)	1,04	kg CO ₂ e/tkm
Transport, LKW 7,5-16 t, EUR03	0,20	kg CO ₂ e/tkm

3.3 Einkaufsfahrt

In allen Szenarien wird angenommen, dass das Notebook gezielt vom Nutzer als Einzelstück gekauft wird, wobei eine Einkaufsfahrt mit einem PkW getätigt wird. Daher wird die Einkaufsfahrt dem Notebook nicht anteilig angerechnet (in Abhängigkeit des Gesamtgewichts des Einkaufs), sondern zu 100% zugeschrieben. Es wird eine Einkaufsfahrt von 5 km (einfache Fahrt) mit einem durchschnittlichen PKW festgelegt. Für die Berechnung wurde entsprechend dem PKW-Bestand in Deutschland, Stand Januar 2010, ein Anteil von 26% PKWs mit Dieselmotor und 74% PKWs mit Benzinmotor zugrunde gelegt (KBA 2010).²⁹ Die verwendeten Datensätze sind aus EcoInvent 2.2³⁰ (s. Tabelle 16). Die Bezugsgröße der Datensätze entspricht 1,6 Personen und 1 km. Der daraus resultierende Emissionsfaktor beträgt 143 g/pkm.

Tabelle 16: Datensätze zur Modellierung der Einkaufsfahrt

Input	Datensätze	Zeitbezug	Ortsbezug	Quelle
PKW mit Diesel (26%)	Transport, Pkw, Diesel, Flottendurchschnitt 2010	2010	Europa	EcoInvent 2.2
PKW mit Benzin (74%)	Transport, Pkw, Benzin, Flottendurchschnitt 2010	2010	Europa	EcoInvent 2.2

3.4 Nutzungsphase

Die Datengrundlage zum Energieverbrauch in der Nutzungsphase bildete die Datenbank der Energy Star Version 5.0 für Computer.³¹

Da der Stromverbrauch eines Notebooks stark von der Nutzung abhängig ist, wird in der Sensitivitätsanalyse eine andere Gewichtung der Betriebsmodi untersucht (Kapitel 5.3). Die

²⁹ Die originale von KBA (Kraftfahrt-Bundesamt) erfasste Statistik umfasst die PKW mit 73% Benzin, 26% Diesel und noch 1% Pkw, die mit Flüssiggas, Erdgas bzw. Strom und hybrid betrieben sind. In der vorliegenden Studie werden diese 1% vernachlässigt und die Anteile von Benzin- und Dieselfahrzeugen entsprechend hochgerechnet.

³⁰ Auch ProBas (www.probas.umweltbundesamt.de) enthält aktuelle Datensätze zu Einkaufsfahrt. Die Nutzung der Datensätze aus EcoInvent 2.2 ist nur auf die Festlegung zurückzuführen, die zwischen dem Auftraggeber und Auftragnehmer bei der Szenarienbildung getroffen wurde.

³¹ http://www.energystar.gov/index.cfm?fuseaction=find_a_product.showProductGroup&pgw_code=CO; Zugriff August 2010

Notebooks werden je nach Ausstattung in drei Kategorien eingeteilt. Die genauen Definitionen befinden sich in Energy Star Version 5.0 für Computer.

Die folgende Tabelle 17 zeigt die Gewichtung der drei Betriebszustände:

Tabelle 17: Gewichtung der Betriebsmodi eines Notebooks (Energy Star® Version 5.0)

Betriebsmodus	Anteil
T-Aus	60%
T-Ruhe	10%
T-Idle	30%

Tabelle 18 zeigt die Anzahl der Geräte, die für die jeweilige Energy Star Kategorie ausgewählt wurden, und ihren Stromverbrauch. Aus diesen Werten wird der durchschnittliche Stromverbrauch eines Notebooks mit einer Lebensdauer von 5 Jahren abgeleitet; er beträgt 231 kWh pro Jahr. Der Emissionsfaktor wurde GEMIS 4.6 entnommen und basiert auf Daten des Deutschen Strommix (Niederspannung). Er beträgt 0,599 kg CO₂e/kWh und wird in allen Szenarien verwendet.

Tabelle 18: TEC-Werte (kWh/a) der Notebooks³², Stand August 2010 (Energy Star® Version 5.0)

	Kategorie A ³³	Kategorie B	Kategorie C
Anzahl der gemessenen Geräte in der Grundausstattung (n)	1190	264	9
TEC: Durchschnittlicher Stromverbrauch pro Jahr	30,1 kWh	40,2 kWh	68,5 kWh
TEC: Durchschnittwert der drei Kategorien pro Jahr	46,3 kWh		
Durchschnittlicher Stromverbrauch in 5 Jahren (entspr. der angenommenen Lebensdauer)	231,3 kWh		

3.5 End-of-Life

Für Szenario 1 wurde die Entsorgung bereits ausführlich in EuP Los 3 (2005) beschrieben und wird an dieser Stelle nicht mehr erläutert. Für die anderen Szenarien wird die Lebensphase „End-of-Life“ in Business-as-Usual und Best-Practice differenziert.

³² Geräte in der Grundausstattung der jeweiligen Kategorien

³³ Kategorie A: Alle tragbaren Computer, die nicht der Definition der Kategorie B oder der Kategorie C entsprechen, kommen unter Kategorie A für die Kennzeichnung in Frage.

Kategorie B: Für die Einstufung unter Kategorie B müssen tragbare Computer über folgendes Merkmal verfügen:
- ein diskreter Grafikprozessor (GPU).

Kategorie C: Für die Einstufung unter Kategorie C müssen tragbare Computer über folgende Merkmale verfügen:
- mindestens zwei physische Prozessorkerne;
- mindestens 2 Gigabyte (GB) Systemspeicher und
- ein diskreter Grafikprozessor (GPU) mit einer Framebufferbreite über 128-bit

3.5.1 Business-as-Usual

„End-of-Life“ umfasst die Entsorgung und das Recycling. Für die Modellierung der Entsorgung eines Notebooks werden die Datensätze von EcoInvent 2.2 zugrunde gelegt. Der Datensatz „*Entsorgung, Laptop Computer, in E-Schrott-Aufbereitung*“ wurde anhand der Entsorgungssituation in der Schweiz im Jahr 2005 erstellt. In Anlehnung an die WEEE-Direktive wird E-Schrott zunächst manuell vorbehandelt, wobei die in Annex II der WEEE-Direktive festgelegten Komponenten und Materialien wie Batterien und Bildschirm entnommen werden müssen. Als nächster Schritt erfolgt die mechanische Behandlung (im Schredder). Der Datensatz aus EcoInvent 2.2 umfasst

- die Sammlung,
- die Detoxifizierung (manuelle Entnahme von Batterien und Bildschirmmodulen),
- die mechanische Vorbehandlung (Schredderanlage)
- den Transport zu den Verarbeitungswerken,
- die Behandlung und Verarbeitung sowie die Gewinnung der Sekundärmetalle.
- Deponierung von Reststoffen.

Die dadurch gewonnenen Nicht-Edelmetall-Fractionen sind in Tabelle 19 aufgeführt.

Tabelle 19: Nach dem Schreddern gewonnene Metall-Fractionen bezogen auf 1 kg Notebook (Hischier 2007)

Fraktion	Menge	Einheit
Al fraction, mechanical treatment, laptop computer, at plant [GLO]	0,067	kg
Cu fraction, mechanical treatment, laptop computer, at plant [GLO]	0,101	kg
Fe fraction, mechanical treatment, laptop computer, at plant [GLO]	0,162	kg
Dismantling, laptop, mechanically, at plant [GLO]	1	kg

Um die gewonnenen Edelmetalle berechnen zu können, müssen zuerst die Edelmetallgehalte in einem Notebook spezifiziert werden. Eine vollständige Materialzusammensetzung eines Notebooks konnte im Rahmen dieser Studie nicht ermittelt werden. Ein Projekt der TU Berlin und des Fraunhofer IZM hat die Materialzusammensetzung einer bestückten Leiterplatte untersucht (Gref et al. 2008). Die prozentualen Masseanteile von Silber und Gold in der Leiterplatte, wie sie in der Studie ermittelt wurden, sind in Tabelle 20 dargestellt. Der Silber-Anteil der sonstigen Komponenten wurde aus EuP Los 3 genommen und dem Anteil aus Gref et al. 2008 hinzugefügt. Damit liegt der Silber-Anteil eines Notebooks in der vorliegenden Studie in einer ähnlichen Größenordnung wie bei einem Desktop-PC (Gmünder 2007).

Allerdings ist der Anteil von Gold in den beiden Studien sehr unterschiedlich. In der vorliegenden Studie wurde ein Gold-Anteil auf der Basis von Gref et al. 2008 angenommen.³⁴

Da keine weiteren Quellen verfügbar sind, die den Palladium-Anteil eines Notebooks angeben, wird der von Gmünder (2007) herangezogen und auf das Gewicht des Notebooks

³⁴ Die Annahme von Gref et al ist die bestmögliche Annahme bezüglich des Goldanteils in einer Leiterplatte des Notebooks. Die Angaben von Gmünder (2007) beziehen sich auf einen Desktop-PC und die der EuP-Studie betragen 0%.

hochgerechnet. Die in Tabelle 20 fett dargestellten Werte werden in der vorliegenden Studie berücksichtigt.

Tabelle 20: Abgeschätzte Ag-, Au- und Pd-Anteile im Notebook

Edelmetall	EuP Los 3 (ohne Leiterplatte)	Gref et al. 2008 (nur Leiterplatte)	Summe (EuP Los 3; Gref et al.)	Gmünder 2007
Ag	0,01%	0,005%	0,015%	0,017%
Au	0%	0,010%	0,010%	0,003%
Pd	k.A.	k.A.	k.A.	0,001%

Die Recyclingraten für die Edelmetalle sind in Tabelle 21 aufgelistet. In den Szenarien 2 und 3, in denen das „End-of-Life“ als Business-as-Usual modelliert wurde, sind diese Recyclingraten sowie die anhand des Gewichts der untersuchten Notebooks hochgerechneten Edelmetallfraktionen zugrunde gelegt. Die detaillierten Ergebnisse der gewonnenen Metalle sind in Tabelle 49 aufgeführt. Zu beachten ist, dass der dazu benötigte zusätzliche Behandlungsaufwand mit einem allgemeinen Datensatz zur Sekundäredelmetallgewinnung aus EcoInvent 2.1 annähernd berücksichtigt wird. Eine Gutschrift erfolgt über die entsprechende Primärmetallherstellung. Die verwendeten Emissionsfaktoren sind im Anhang, in Tabelle 48, aufgelistet.

Tabelle 21: Die Recyclingrate für Business-as-Usual-Szenario

Edelmetalle	Business-as-Usual	Quelle
Ag	40%	Persönliche Mitteilung ³⁵
Au	40%	Chancerel 2010
Pd	40%	Chancerel 2010

3.5.2 Best-Practice

Im Gegensatz zu Business-as-Usual werden bei Best-Practice die Edelmetalle wie Au, Ag und Pd mit einer höheren Effizienz zurückgewonnen (Tabelle 22). Diese Effizienzsteigerungen lassen sich vor allem durch eine optimierte manuelle Vorbehandlung unter weitgehender Vermeidung von mechanischer Aufbereitung mittels Schredder erzielen. Die Gutschrift erfolgt über die entsprechende Primärmetallherstellung. Die verwendeten Emissionsfaktoren sind im Anhang, in Tabelle 48, aufgelistet.

Tabelle 22: Die Recyclingrate für Best-Practice³⁶

Edelmetall	Best-Practice	Quelle
Ag	87%	Prakash und Manhart 2010

³⁵ Dr.-Ing. Perrine Chancerel, Wissenschaftliche Mitarbeiterin am Fraunhofer Institut Zuverlässigkeit und Mikrointegration/TU Berlin, Dept. Environmental Engineering

³⁶ In Prakash und Manhart (2010) wurden die Recyclingraten in Best-Available-Technologies auf der Basis einer tiefen manuellen Zerlegung eines Desktop-PCs bis auf die Ebene der Subkomponenten ermittelt.

Au	93%	Prakash und Manhart 2010
Pd	91%	Prakash und Manhart 2010

4 Ergebnisdarstellung und Auswertung

Im folgenden Kapitel 4.1 werden die GWP-Ergebnisse der einzelnen Szenarien vorgestellt, die auf Basis der im vorangegangenen Kapitel vorgestellten Annahmen und Methode und den in Kapitel 2.2.3 definierten Systemgrenzen ermittelt wurden. Während Kapitel 4.2 einen Überblick über die Zusammenstellung der Gesamttreibhausgasemissionen aller Szenarien gibt, werden die Amortisationszeiten der einzelnen Szenarien in Kapitel 4.3 vorgestellt. In dem darauf folgenden Kapitel 5 werden vier Sensitivitätsanalysen betrachtet, bei denen wichtige Parameter oder das methodische Vorgehen variiert wurden, um die Auswirkungen auf die Ergebnisse zu untersuchen.

4.1 Ergebnisdarstellung der einzelnen Szenarien

4.1.1 Szenario 1: EuP Los 3

Insgesamt ergeben sich für das Szenario EuP Los 3 230 kg CO₂e in Bezug auf den gesamten Lebenszyklus eines Notebooks. Abbildung 4 zeigt sowohl die absoluten GWP-Emissionen als auch die prozentualen Anteile der einzelnen Lebensphasen eines Notebooks. Mit 60,2% entfällt der größte Anteil der GWP-Emissionen auf die Nutzungsphase, gefolgt von der Herstellungsphase mit 35,2%. Die Ergebnisse der Nutzungsphase wurden auf der Grundlage einer Nutzungsdauer von 5 Jahren berechnet. Die Distribution und Feinverteilung verursacht 4,3% der gesamten GWP-Emissionen. Beim „End-of-Life“ werden zusätzlich die Gutschriften ausgewiesen, die durch die Entsorgung des Notebooks entstehen. Aufgrund der Gutschriften (durch das Recycling) verbessert sich die Summe der gesamten GWP-Emissionen. Die Einkaufsfahrt fällt mit einem Anteil von knapp einem Prozent (0,6%) ebenfalls kaum ins Gewicht.

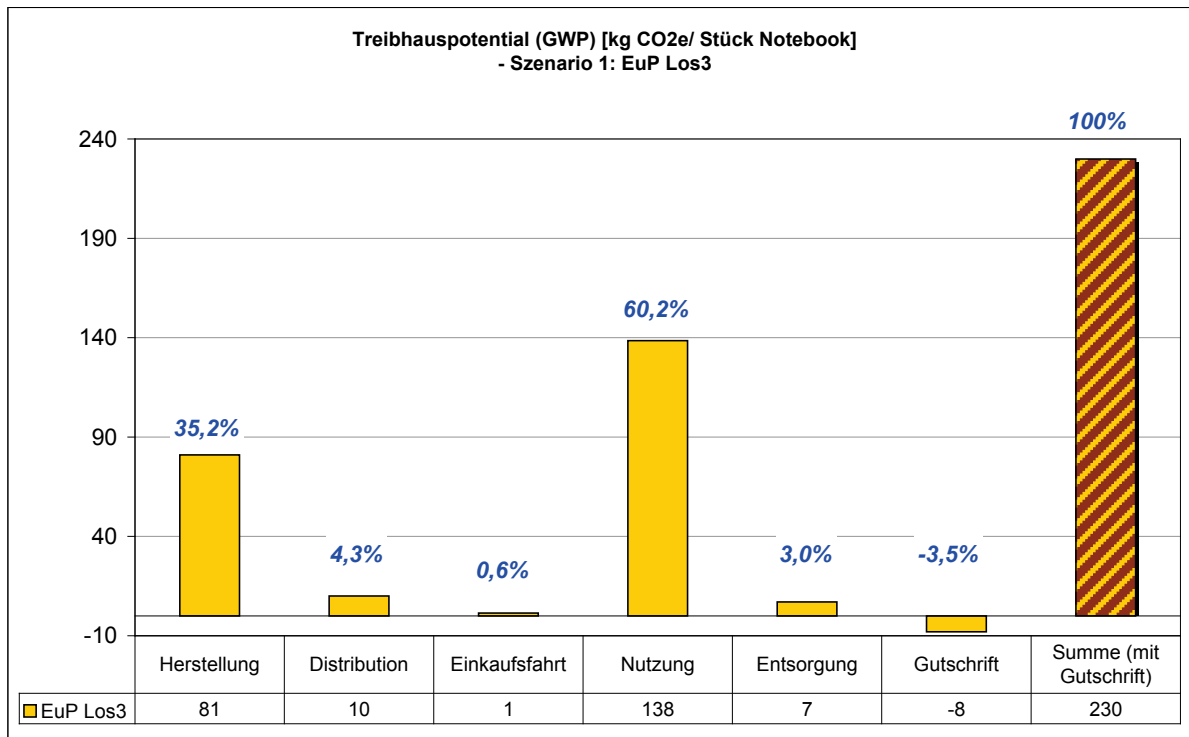


Abbildung 4: Die absoluten GWP-Werte und die prozentualen Anteile der Lebensphasen in Szenario 1: EuP Los 3

Die GWP-Werte von Herstellung, Distribution und „End-of-life“ basieren auf EuP Los 3. Die durch die Einkaufsfahrt und die Nutzung verursachten absoluten GWP-Werte sind in allen Szenarien gleich, da sie mit den gleichen Annahmen (Kapitel 3.3 und 3.4) bilanziert wurden.

4.1.2 Szenario 2: EcolInvent 2.2

Insgesamt ergeben sich für das Szenario EcoInvent 2.2. 362 kg CO₂e in Bezug auf den gesamten Lebenszyklus eines Notebooks.

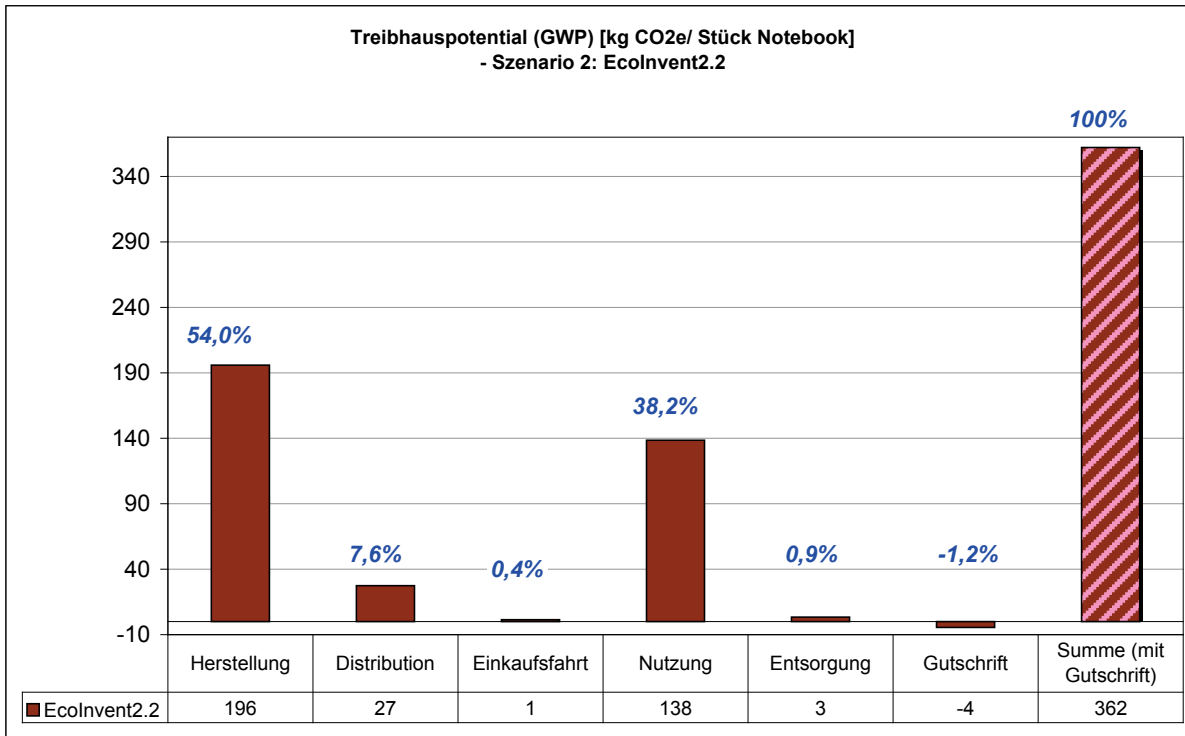


Abbildung 5: Die absoluten GWP-Werte und die prozentualen Anteile der Lebensphasen in Szenario 2: EcolInvent 2.2

Abbildung 5 zeigt sowohl die absoluten GWP-Emissionen als auch die prozentualen Anteile der einzelnen Lebensphasen eines Notebooks. Mit 54% entfällt der größte Anteil der GWP-Emissionen auf die Herstellung, gefolgt von der Nutzungsphase mit 38,2%. Die Ergebnisse der Nutzungsphase wurden auf der Grundlage einer Nutzungsdauer von 5 Jahren berechnet. Die Distribution und Feinverteilung verursacht 7,6% der gesamten GWP-Emissionen. Beim „End-of-Life“ werden zusätzlich die Gutschriften ausgewiesen, die durch die Entsorgung des Notebooks entstehen. Die Gutschrift (Al-, Cu- und Fe-Sekundärmetallherstellung durch Primärmetallherstellung) wirkt positiv auf das gesamte GWP-Ergebnis aus. Dies hat zur Folge, dass die Emissionen der Entsorgung durch die Gutschriften des Recyclings vollständig kompensiert werden. Die Einkaufsfahrt fällt mit einem Anteil von knapp einem Prozent (0,4%) ebenfalls kaum ins Gewicht.

Die Herstellung und die Entsorgung eines Notebooks basieren auf Datensätzen aus EcoInvent 2.2. Für die Distribution und Feinverteilung wurden dieselben Annahmen getroffen wie in Szenario 3 und 4. Die durch die Einkaufsfahrt und die Nutzung verursachten absoluten GWP-Werte sind in allen Szenarien gleich, da sie mit den gleichen Annahmen (Kapitel 3.3 und 3.4) bilanziert wurden.

4.1.3 Szenario 3: UBA-FuE-Vorhaben (UFOPLAN 2009) + EcoInvent 2.2 (End-of-Life Business-as-Usual)

Insgesamt ergeben sich für dieses Szenario 382 kg CO₂e in Bezug auf den gesamten Lebenszyklus eines Notebooks. Abbildung 6 zeigt sowohl die absoluten GWP-Emissionen als auch die prozentualen Anteile der einzelnen Lebensphasen eines Notebooks. Mit 56% entfällt der größte Anteil der GWP-Emissionen auf die Herstellung, gefolgt von der Nutzungsphase mit 36%. Die Ergebnisse der Nutzungsphase wurden auf der Grundlage einer Nutzungsdauer von 5 Jahren berechnet. Die Distribution und Feinverteilung verursacht knapp 7,6% der gesamten GWP-Emissionen. Beim „End-of-Life“ werden zusätzlich die Gutschriften ausgewiesen, die durch die Entsorgung des Notebooks entstehen. Die Gutschrift (Al, Cu und Fe Sekundärmetallherstellung durch Primärmetallherstellung) bei Business-as-Usual wirkt positiv auf das gesamte GWP-Ergebnis aus. Die Einkaufsfahrt fällt mit einem Anteil von knapp einem Prozent (0,4%) ebenfalls kaum ins Gewicht.

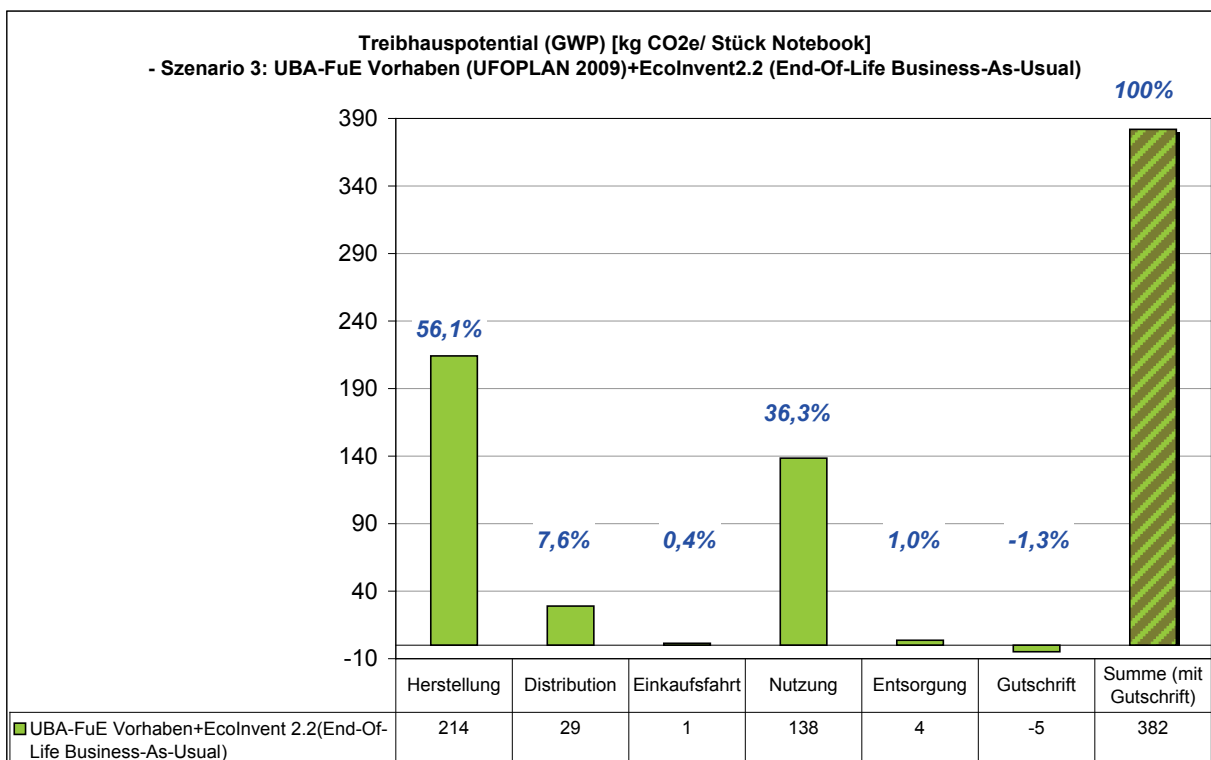


Abbildung 6: Die absoluten GWP-Werte und die prozentualen Anteile der Lebensphasen von Szenario 3: UBA-FuE-Vorhaben (UFOPLAN 2009) + EcoInvent und das End-of-Life als Business-as-Usual

Die Daten zur Herstellung eines Bildschirm-Moduls und eines Speicherchips stammen aus Prakash et al. (2011). In Prakash et al. (2011) wurden die Datensätze zum Bildschirm-Modul sowie zum Speicherchip in die ProBas Datenbank importiert. Die daraus resultierenden GWP-Werte sind zusammen mit den GWP-Werten der sonstigen Komponenten aus EcoInvent 2.2 in Tabelle 23 aufgeführt, mit Bezug auf 1 Stück Notebook. Die Herstellung des Bildschirm-Moduls und dessen Transport sind für knapp 18% der GWP-Emissionen der gesamten Herstellung eines Notebooks verantwortlich. Auf die Herstellung der Speicherchips entfallen knapp 5% der GWP-Emissionen aus der Herstellung eines Notebooks. Die absolute und prozentuale Aufteilung der GWP-Werte der Speicherchip-Herstellung befindet sich im Anhang, in Tabelle 50. Abbildung 7 veranschaulicht, dass der Front-End-Prozess mit rund 66% den größten Beitrag der GWP-

Emissionen der Speicherchipherstellung leistet, gefolgt vom Back-End-Prozess mit 20% und der Silizium-Wafer-Herstellung mit 14%. Die drei Transportstrecken haben, obwohl der Transport per Flugzeug erfolgt, nur minimalen Einfluss auf die Gesamtergebnisse, da die Chips sehr leicht sind.

Tabelle 23: Teilergebnisse zum Bildschirm-Modul und zu Speicherchips aus dem UBA-FuE-Vorhaben (UFOPLAN 2009) (kg CO₂e/Notebook)

Ergebnisse	GWP (kg CO ₂ e/Notebook)	Anteil
Bildschirm-Modul: Herstellung (Prakash et al. 2011)	35,1	16,4%
Bildschirm-Modul: Transport	3,4	1,6%
Speicherchips (8GB Speicherchips): Herstellung (Prakash et al. 2011)	7,6	3,5%
Speicherchips (8GB Speicherchips): Transport (Silizium-Wafer -> Front-End-Prozess -> Back-End-Prozess -> Notebook Assembly)	0,03	0,01%
Sonstige Komponenten (Ecolinvent 2.2)	168	78,5%
Summe	214	100%

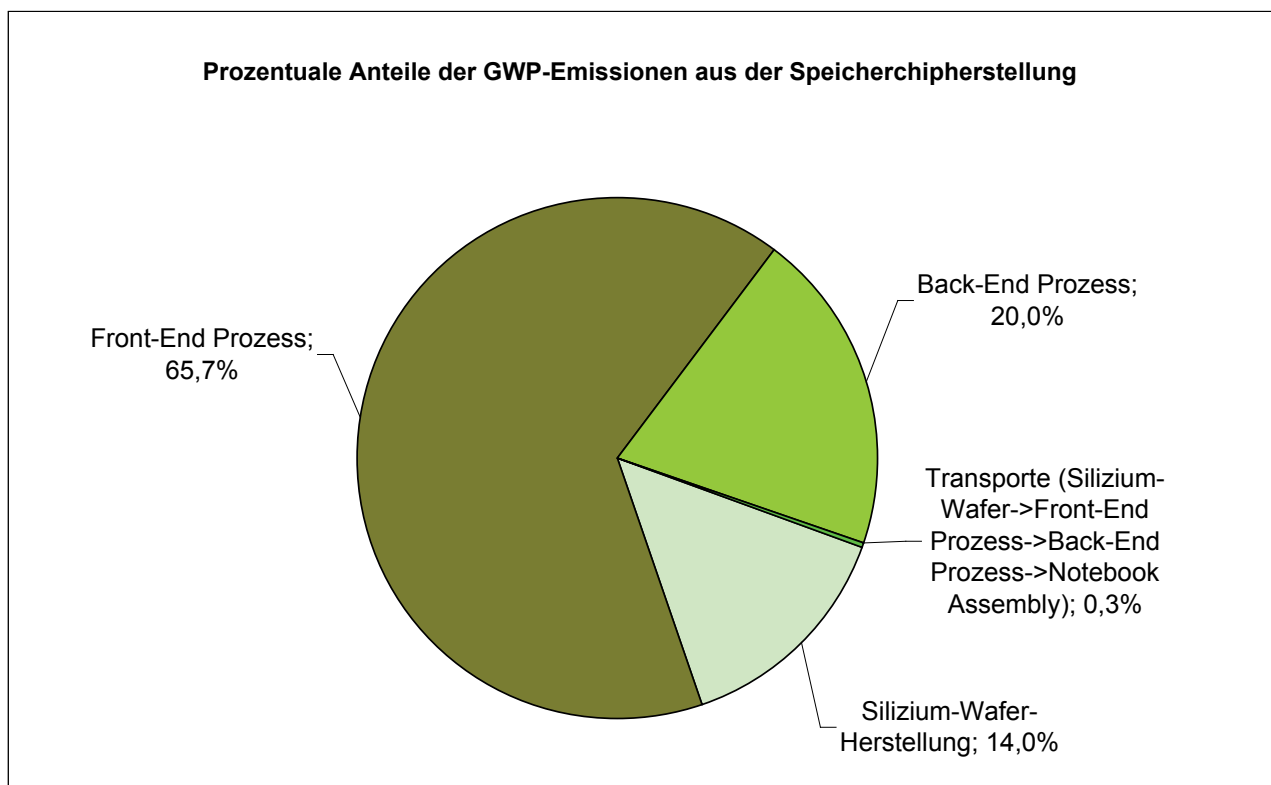


Abbildung 7: Prozentuale Anteile der GWP-Ergebnisse aus der Speicherchipherstellung

Die Entsorgung ist identisch mit der in Szenario 2. Für die Distribution und Feinverteilung wurden dieselben Annahmen getroffen wie in Szenario 2 und 4. Die durch die Einkaufsfahrt und die Nutzung verursachten absoluten GWP-Werte sind für alle Szenarien gleich, da sie mit den gleichen Annahmen (Kapitel 3.3 und 3.4) bilanziert wurden.

4.1.4 Szenario 4: UBA-FuE-Vorhaben (UFOPLAN 2009) + EcolInvent 2.2 (End-of-Life Best-Practice)

Insgesamt ergeben sich für dieses Szenario 380 kg CO₂e in Bezug auf den gesamten Lebenszyklus. Abbildung 8 zeigt für die Aufteilung der Lebensphasen ein ähnliches Ergebnis wie Szenario 3. Mit 56% entfällt der größte Anteil der GWP-Emissionen auf die Herstellung, gefolgt von der Nutzungsphase mit 36,5%. Die Ergebnisse der Nutzungsphase wurden auf der Grundlage einer Nutzungsdauer von 5 Jahren berechnet. Die Distribution und Feinverteilung verursacht 7,6% der gesamten GWP-Emissionen. Die Distribution und Feinverteilung verursacht 7,6% der gesamten GWP-Emissionen.

Die ausgewiesenen Ergebnisse des Bildschirm-Moduls und des Speicherchips des Notebooks, die aus der Studie von Prakash et al. (2011) entnommen wurden, sind bereits in Szenario 3 (Kapitel 4.1.3) beschrieben.

Die einzige Abweichung von Szenario 4 zu Szenario 3 liegt in der Modellierung der "End-of-Life"-Phase. Wie aus Tabelle 48 hervorgeht, weisen die Primärmetallgewinnung und die Sekundärmetallgewinnung einen enormen Unterschied hinsichtlich des Treibhauseffekts auf, was sich insbesondere auf die Edelmetalle auswirkt. Die in der Bilanz berechneten Metallfraktionen werden in Tabelle 49 dargestellt, bezogen auf die funktionelle Einheit. Die zusätzliche Betrachtung der Gutschriften für Au, Ag und Pd wirkt positiv auf das gesamte GWP-Ergebnis aus. Dadurch ergibt sich ein negativer CO₂e-Wert.

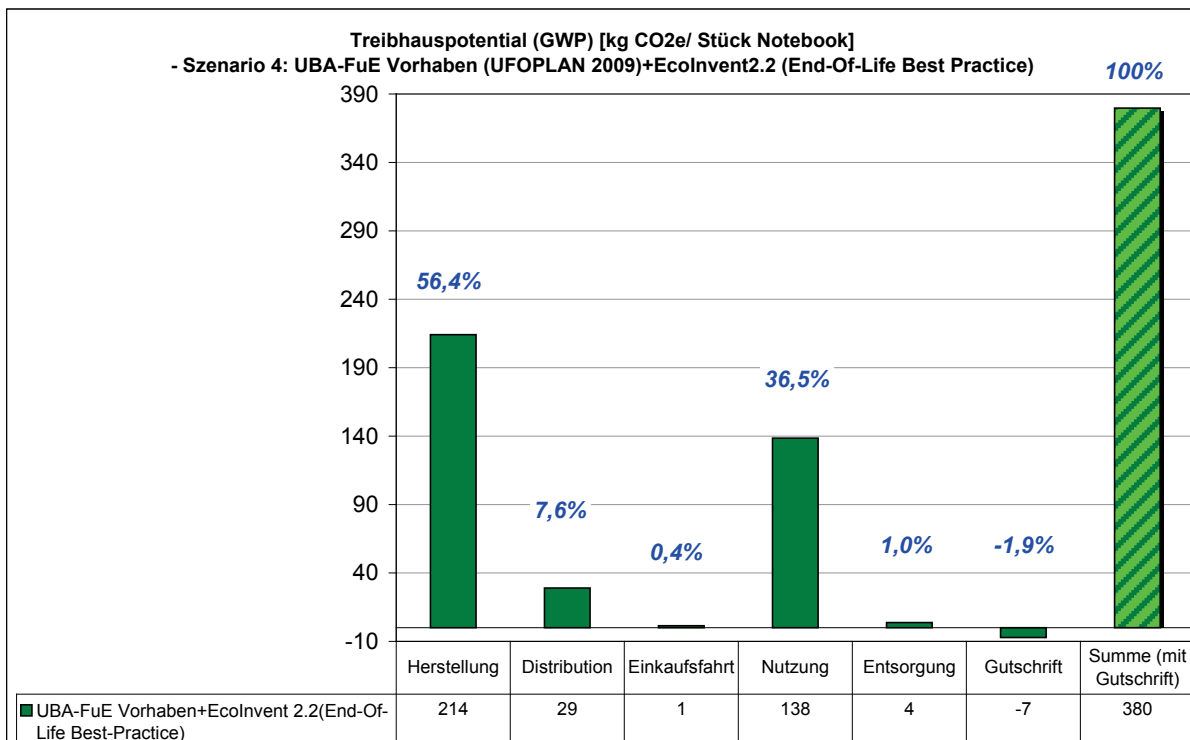


Abbildung 8: Die absoluten GWP-Werte und die prozentualen Anteile der Lebensphasen von Szenario 4: UBA-FuE-Vorhaben (UFOPLAN 2009) + EcolInvent und das End-of-Life als Best-Practice

4.2 Gesamtüberblick der untersuchten Szenarien

Abbildung 9 gibt einen Gesamtüberblick über die GWP-Werte der untersuchten Szenarien. Die GWP-Emissionen von Szenario EuP Los 3 sind am niedrigsten. Darüber hinaus dominiert bei Szenario EuP Los 3 die Nutzungsphase, während bei den anderen drei Szenarien die Herstellung den größten Einfluss auf das Gesamtergebnis hat. Die leichte Differenz in der Distributionsphase von Szenario 2, 3 und 4 beruht darauf, dass die betrachteten Notebooks unterschiedlich schwer sind (Tabelle 2) und die Umweltbelastung durch die Transporte nach dem Gewicht der Transportgüter berechnet wird (mit denselben Annahmen bezüglich Transportkilometer, LKW-Größe bzw. -Auslastungen). Die aus der Nutzung (auf der Grundlage einer Nutzungsdauer von 5 Jahren) und der Einkaufsfahrt resultierenden Ergebnisse sind in allen Szenarien gleich. Die Anteile der Einkaufsfahrt sowie des End-of-Life sind in der Grafik aufgrund deren geringen Anteils nicht sichtbar. Sie machen insgesamt knapp 1 Prozent der gesamten GWP-Emissionen aus.

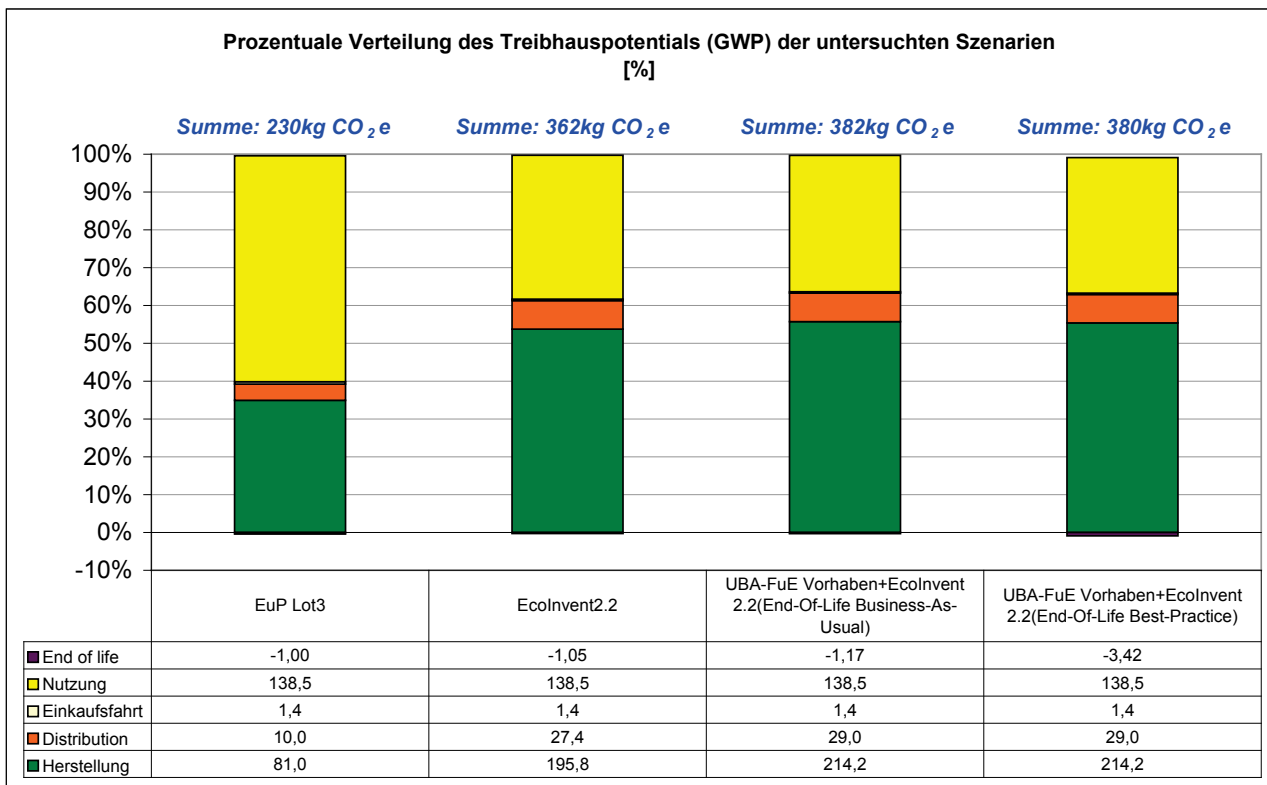


Abbildung 9: Absolutes Ergebnis der GWP-Emissionen für alle untersuchten Szenarien differenziert nach Lebensphase (kg CO₂e/Notebook)

Die GWP-Emissionen einer PCF-Studie von O’Connell und Stutz (2010) sind in Abbildung 10 dargestellt. Die Summe der GWP-Werte liegt zwischen 320 kg CO₂e in Europa und 370 kg CO₂e in China, jeweils bezogen auf 1 Notebook mit einer Nutzungsdauer von 4 Jahren. Betrachtet man das Ergebnis von Europa, so werden 47% der Emissionen in der Herstellungsphase verursacht (150 kg CO₂e). Die Nutzungsphase trägt ebenfalls mit 47% zu den Emissionen bei, während in China die Nutzungsphase 65% der gesamten Emissionen ausmacht. Grund dafür ist

der chinesische Strommix, der einen höheren Emissionsfaktor im Vergleich zum europäischen Strommix aufweist (O'Connell und Stutz 2010).

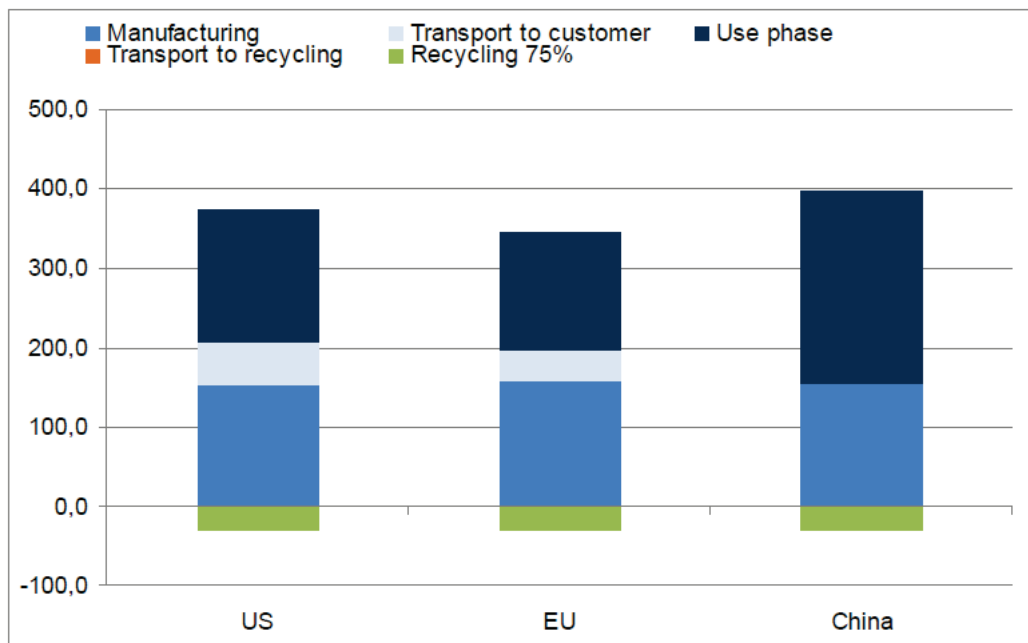


Abbildung 10: GWP-Emissionen eines Notebooks (kg CO₂e/Notebook). Lebensdauer 4 Jahre (O'Connell&Stutz 2010)

Vergleicht man die Ergebnisse der Studie von O'Connell und Stutz (2010) mit den Ergebnissen der einzelnen Szenarien der vorliegenden Studie, so ergeben sich folgende Unterschiede:

Die Ergebnisse für die Notebook-Herstellung der Studie von O'Connell und Stutz (2010) liegen ca. 85% höher als die von Szenario 1 EuP Los 3 und ca. 33% unter denen von Szenario 2 EcoInvent. Auch im Vergleich mit Szenario 3 und 4 sind die Ergebnisse für die Notebook-Herstellung in der Studie von O'Connell und Stutz (2010) ca. 45% niedriger.

4.3 Amortisationsrechnung

Zur Berechnung der Amortisationszeiten (in Jahre) wurde angenommen, dass das neue Notebook in der Nutzung im Vergleich zum alten Notebook energieeffizienter ist. Um verschiedene Szenarien für unterschiedlich hohe Energieeffizienzsteigerungen der neuen Notebooks im Vergleich zum alten abbilden zu können, wurden die Energieeffizienzsteigerungsklassen in 10-prozentigen Intervallen gebildet. Dies bedeutet, dass die neuen Notebooks in der Nutzungsphase (im Vergleich zu den Basisszenarien 1 bis 4) immer um 10%ige Energieeffizienzklassen zunehmen, bis eine Energieeffizienzsteigerung um 50% erreicht ist. Für eine weitere Berechnung wird zudem eine Steigerung um 70% betrachtet. In anderen Worten entwickeln sich die GWP-Ergebnisse der neuen Notebooks in der Nutzungsphase immer proportional zur Energieeffizienzsteigerungen. Daraus ergeben sich verschiedene GWP-Ergebnisse für die gesamte Lebenszyklusbetrachtung des neuen Notebooks, wobei die GWP-Werte der Herstellung, Distribution (inkl. Einkaufsfahrt) und Entsorgung immer gleich bleiben. Das Einsparpotenzial in der Nutzungsphase kann aufgrund der Energieeffizienzsteigerung gegenüber dem alten Gerät (Basisszenarien) folgendermaßen berechnet werden:

$$GWP_{\text{Einsparpotenzial}} = GWP_{\text{Nutzung}} [\text{kg CO}_2\text{e/Jahr/Notebook}] * x(\%)$$

wobei

- GWP_{Nutzung} (kg CO₂e/Jahr/Notebook) repräsentiert die jährlichen Treibhausgasemissionen des alten Notebooks in der Nutzungsphase
- x ist die Energieeffizienzsteigerung (in %) bei dem neuen Notebook.

Die entsprechenden Amortisationszeiten (Jahre) lassen sich wie folgt berechnen: der GWP-Wert der Herstellung, Distribution (inkl. Einkaufsfahrt) und Entsorgung wird durch die aufgrund der Energieeffizienzsteigerung eingesparten GWP-Werte (Einsparung in der Nutzung gegenüber dem alten Notebook) des neuen Notebooks dividiert.

$$= \frac{GWP_{\text{Herstellung, Distribution, Entsorgung}}}{GWP_{\text{Einsparpotenzial}}}$$

Zu beachten ist, dass mögliche Änderungen der Rahmenbedingungen bei der Betrachtung nicht berücksichtigt werden, z.B. die Änderung des Emissionsfaktors des Strommix durch den Austausch eines Energieträgers oder durch die Energieeffizienzsteigerung der Strombereitstellung oder die Änderung der Nutzungsmodi im Laufe der Zeit. Es wird also eine statische Betrachtung durchgeführt.

Die folgenden Tabellen (Tabelle 24 bis Tabelle 27) stellen die Amortisationszeit der vier untersuchten Szenarien dar. Grundsätzlich gilt: je höher die Energieeffizienzsteigerung ist, desto kürzer ist die Amortisationszeit.

Tabelle 24: Amortisationsrechnung mit Energieeffizienzsteigerung in der Nutzungsphase in Szenario 1: EuP Los 3

EuP Los 3	Ausgangssituation	Energieeffizienzsteigerung					
		10%	20%	30%	40%	50%	70%
GWP: Herstellung, Distribution ³⁷ und Entsorgung) (kg CO ₂ e/Stück Notebook)	91,4	91,4	91,4	91,4	91,4	91,4	91,4
GWP: Nur Nutzungsphase (kg CO ₂ e/Jahr und Stück Notebook)	27,7	24,9	22,2	19,4	16,6	13,8	8,3
GWP: Einsparpotenzial in der Nutzungsphase gegenüber dem alten Gerät (kg CO ₂ e/Jahr und Stück Notebook)	-	2,8	5,5	8,3	11,1	13,8	19,4
Amortisationszeit (Jahre) = $\frac{GWP_{\text{Herstellung, Distribution, Entsorgung}}}{GWP_{\text{Einsparpotenzial}}}$	-	33	17	11	8	7	5

³⁷ Distribution in den Tabellen 24 bis 27 schließt Einkaufsfahrt ein.

Tabelle 25: Amortisationsrechnung mit Energieeffizienzsteigerung in der Nutzungsphase in Szenario 2: EcolInvent 2.2

EcolInvent 2.2\“Business-as-Usual“	Ausgangssituation	Energieeffizienzsteigerung					
		10%	20%	30%	40%	50%	70%
GWP: Herstellung, Distribution und Entsorgung) (kg CO ₂ e/Stück Notebook)	223,7	223,7	223,7	223,7	223,7	223,7	223,7
GWP: Nur Nutzungsphase (kg CO ₂ e/Jahr und Notebook)	27,7	24,9	22,2	19,4	16,6	13,8	8,3
GWP: Einsparpotenzial in der Nutzungsphase gegenüber dem alten Gerät (kg CO ₂ e/Jahr und Notebook)	-	2,8	5,5	8,3	11,1	13,8	19,4
Amortisationszeit (Jahre) $= \frac{GWP_{\text{Herstellung, Distribution, Entsorgung}}}{GWP_{\text{Einsparpotenzial}}}$	-	81	40	27	20	16	12

Tabelle 26: Amortisationsrechnung mit Energieeffizienzsteigerung in der Nutzungsphase in Szenario 3: UBA-FuE-Vorhaben (UFOPLAN 2009) + EcolInvent (End-of-Life Business-as-Usual)

UBA-FuE-Vorhaben (UFOPLAN 2009) + EcolInvent (End-of-Life Business-as-Usual)	Ausgangssituation	Energieeffizienzsteigerung					
		10%	20%	30%	40%	50%	70%
GWP: Herstellung, Distribution und Entsorgung) (kg CO ₂ e/Stück Notebook)	243,4	243,4	243,4	243,4	243,4	243,4	243,4
GWP: Nur Nutzungsphase (kg CO ₂ e/Jahr und Notebook)	27,7	24,9	22,2	19,4	16,6	13,8	8,3
GWP: Einsparpotenzial in der Nutzungsphase gegenüber dem alten Gerät (kg CO ₂ e/Jahr und Notebook)	-	2,8	5,5	8,3	11,1	13,8	19,4
Amortisationszeit (Jahre) $= \frac{GWP_{\text{Herstellung, Distribution, Entsorgung}}}{GWP_{\text{Einsparpotenzial}}}$	-	89	44	29	22	18	13

Tabelle 27: Amortisationsrechnung mit Energieeffizienzsteigerung in der Nutzungsphase in Szenario 4: UBA-FuE-Vorhaben (UFOPLAN 2009) +Ecolivent (End-of-Life Best-Practice)

UBA-FuE-Vorhaben (UFOPLAN 2009) + Ecolivent (End-of-Life Best-Practice)	Ausgangssituation	Energieeffizienzsteigerung					
		10%	20%	30%	40%	50%	70%
GWP: Herstellung, Distribution und Entsorgung) (kg CO ₂ e/Stück Notebook)	241,2	241,2	241,2	241,2	241,2	241,2	241,2
GWP: Nur Nutzungsphase (kg CO ₂ e/Jahr und Notebook)	27,7	24,9	22,2	19,4	16,6	13,8	8,3
GWP: Einsparpotenzial in der Nutzungsphase gegenüber dem alten Gerät (kg CO ₂ e/Jahr und Notebook)	-	2,8	5,5	8,3	11,1	13,8	19,4
Amortisationszeit (Jahre) $= \frac{GWP_{\text{Herstellung, Distribution, Entsorgung}}}{GWP_{\text{Einsparpotenzial}}}$	-	87	44	29	22	17	12

Wie den Tabellen 24 bis 27 entnommen werden kann, beträgt die Amortisationszeit in Abhängigkeit der Datengrundlage zwischen 33 und 89 Jahre, wenn das neue Notebook in der Nutzung 10% energieeffizienter ist. Dies bedeutet, dass das alte Notebook zwischen 33 und 89 Jahre genutzt worden sein muss, damit sich der Treibhausaufwand der Herstellung, Distribution und Entsorgung des neuen Notebooks amortisiert. Bei einer Energieeffizienzsteigerung von 70% im neuen Notebook sinkt die Amortisationszeit zwischen 6 und 13 Jahre, je nachdem welche Datengrundlage zugrunde gelegt wurde.

Die zusätzliche Betrachtung der erhöhten Rückgewinnung der Edelmetalle hat nur einen geringen Einfluss auf das Gesamtergebnis (Vgl. Szenario 3 und 4).

Abbildung 11 gibt einen Überblick über die Amortisationszeit aller untersuchten Szenarien:

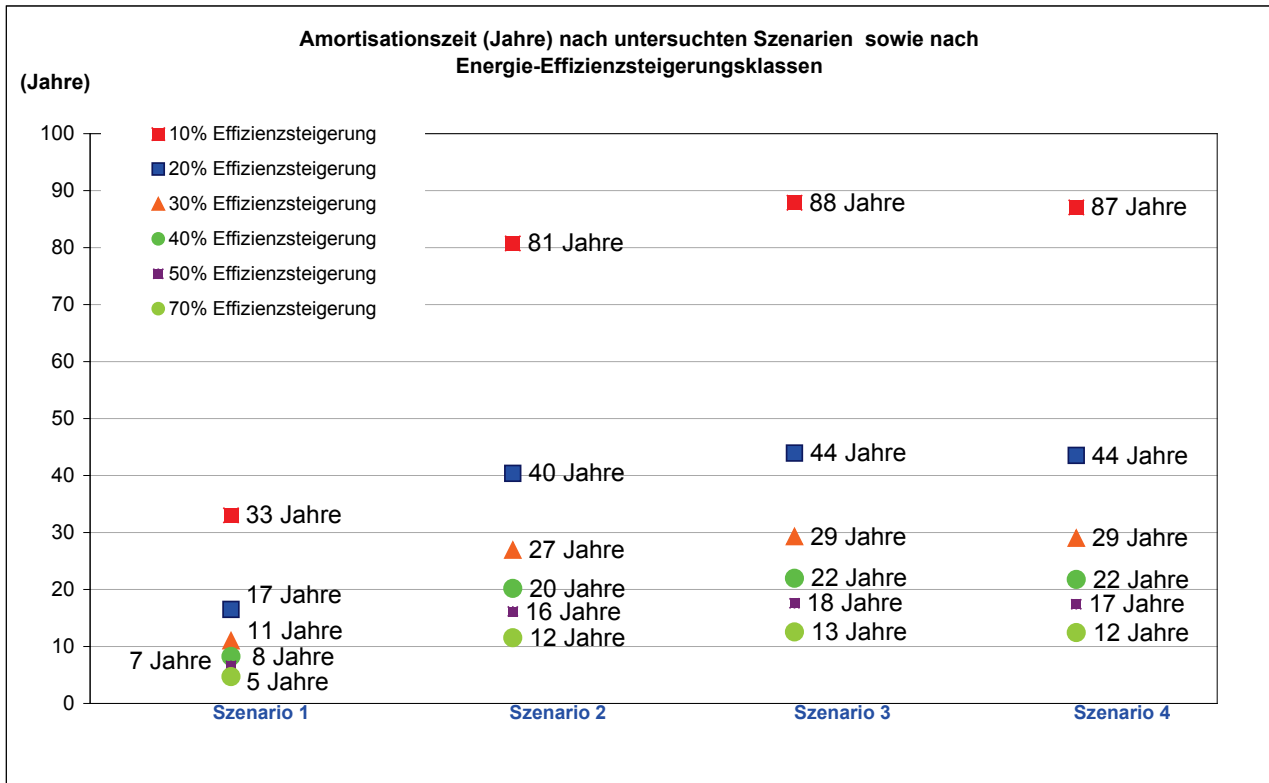


Abbildung 11: Überblick über die Amortisationszeit in Verbindung mit der Energieeffizienzsteigerung in der Nutzungsphase in allen Szenarien

5 Sensitivitätsanalyse

Für die Berechnung der GWP-Emissionen sind die wesentlichen Eingangsgrößen:

- die Verbrauchsmenge an Strom,
- die Betriebsmodi in der Nutzungsphase und
- methodische Unsicherheiten.

Ungenauigkeiten bei diesen Größen können daher das GWP-Ergebnis nachhaltig beeinflussen. In den folgenden Kapiteln werden die Einflüsse der Eingangsgrößen auf die GWP-Emissionen systematisch im Rahmen von Sensitivitätsanalysen untersucht. Dabei werden die Randgrößen betrachtet, die mit Unsicherheiten behaftet sind bzw. geschätzt wurden.

Die Sensitivitätsanalysen werden für die folgenden Fälle durchgeführt:

- Anpassung der Stromverbrauchswerte in der Nutzungsphase nach festgelegten Grenzwerten von Energy Star® Version 5.0 für Computers (Kapitel 5.1),
- Anpassung der Stromverbrauchswerte sowie der Betriebsmodi in der Nutzungsphase nach EuP Los 3 (Kapitel 5.2),
- Anpassung der Gewichtung der Betriebsmodi in der Nutzungsphase (Kapitel 5.3),

- Berücksichtigung des Radiative Forcing Index (RFI-Faktors) (Kapitel 5.4) im Flugverkehr,
- Betrachtung der Emissionen der fluorierten Verbindungen (FC-Emissionen)³⁸ in der Bildschirmherstellung (Kapitel 5.5) und.
- Anpassung der Lebensdauer auf 2,9 Jahre (Kapitel 5.6).

Dabei werden die Auswirkungen der Variationen der Randgrößen auf die Gesamttreibhausgasemissionen der vier Szenarien untersucht. Dargestellt werden die absoluten GWP-Werte und prozentualen Abweichungen von den Ausgangswerten des jeweiligen Szenarios, wie sie im vorangegangenen Kapitel vorgestellt wurden. Zu betonen ist, dass die Sensitivitätsanalysen analog zu den Basiszenarien immer mit einer Lebensdauer von 5 Jahren berechnet wurden.

5.1 Sensitivitätsanalyse 1: Anpassung der Stromverbrauchswerte in der Nutzungsphase nach festgelegten Grenzwerten von Energy Star® Version 5.0 für Computers

Im Rahmen dieser Sensitivitätsanalyse werden für den Stromverbrauch in der Nutzungsphase die Grundanforderungen der Energy Star® TEC Version 5.0 zugrunde gelegt. Die Grundanforderung entspricht einem Grenzwert, der für ein Energy Star® Kennzeichen erfüllt werden muss. Der Stromverbrauch in der Basisanalyse repräsentiert einen durchschnittlichen Wert aller Geräte, die das Energy Star® Kennzeichen tragen. Damit liegt der Stromverbrauch der Basis-szenarien unter dem der durchschnittlichen marktgängigen Geräte. Der Sinn und Zweck dieser Analyse ist zu untersuchen, wie sich eine geänderte Annahme zum Stromverbrauch des Notebooks auf die Ergebnisse auswirken würde. Tabelle 28 stellt die hinterlegten Daten für die Berechnung des Stromverbrauchs in der Basisanalyse (Kapitel 3.4) und Sensitivitätsanalyse zusammen. Die mit den Grenzwerten durchgeführte Sensitivitätsanalyse führt zu einer Erhöhung des Stromverbrauchs und des GWP-Wertes in der Nutzungsphase um ca. 31%.

Die Abweichungen der einzelnen Szenarien von der Basisanalyse liegen zwischen 11 und 19% (Tabelle 29). Beim Szenario 1 EuP Los 3 ergibt sich die größte Abweichung von 19%, da in diesem Szenario die Nutzungsphase eine große Rolle spielt.

Ein Gesamtüberblick über alle untersuchten Analyse findet sich in Kapitel 5.7.

³⁸ Unter dem Begriff „fluorierte Treibhausgase“ werden in Anlehnung an das Kyoto-Protokoll die Stoffgruppe der teilfluorierten Kohlenwasserstoffe (HFKW), die Stoffgruppe der voll oder perfluorierten Kohlenwasserstoffe (FKW) und Schwefelhexafluorid (SF₆) zusammengefasst. Chemisch gesehen gibt es z. B. mit den fluorierten Ethern und Stickstofftrifluorid (NF₃) weitere Stoffgruppen, die den fluorierten Gasen zuzuordnen sind. Diese Stoffe sind derzeit noch nicht in das Kyoto-Protokoll aufgenommen, eine Aufnahme wird aber diskutiert. Fluorierte Treibhausgase (F-Gase) sind 100- bis 24.000-mal schädlicher für das Klima als CO₂. Der Anteil fluorierter Treibhausgase an den Gesamtemissionen klimaschädlicher Gase wird sich weltweit von heute annähernd 2% auf ungefähr 6% im Jahr 2050 verdreifachen. F-Gase, wie SF₆ und NF₃, werden, u.a. in der Flachbildschirm-, Halbleiter- und Leiterplattenfertigung als Ätz- und Reinigungsgase eingesetzt (Umweltbundesamt 2010).

Tabelle 28: Zusammenstellung des Stromverbrauchs in der Nutzungsphase in der Basis- und Sensitivitätsanalyse nach Energy Star® TEC 2009 Version 5.0

Energy Star®	Kategorie A	Kategorie B	Kategorie C	Durchschnittswert aller Kategorien pro Jahr	5 Jahre Lebensdauer	GWP-Werte in der Nutzungsphase
Basisanalyse (Durchschnittswerte)	30 kWh/a	40 kWh/a	69 kWh/a	46 kWh/a	231,3 kWh/5a	138,5 kg CO ₂ e/Notebook innerhalb 5 Jahre
Sensitivitätsanalyse 1 (Grenzwerte)	40 kWh/a	53 kWh/a	88,5 kWh/a	61,5 kWh/a	302,5 kWh/5a	181,1 kg CO ₂ e/Notebook innerhalb 5 Jahre
Abweichung von der Basisanalyse in %	+32,9%	+31,8%	+29,2%	+30,8%	+30,8%	+30,8%

Tabelle 29: Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse 1 im Vergleich zu den Basisanalysen aller untersuchten Szenarien

Gesamte GWP-Werte eines Notebooks (kg CO ₂ e/Notebook)	EuP Los3 (Szenario 1)	EcolInvent 2.2 (Szenario 2)	UBA-FuE-Vorhaben (UFOPLAN 2009) + EcolInvent (End-of-Life Business-as-Usual) (Szenario 3)	UBA-FuE-Vorhaben (UFOPLAN 2009) + EcolInvent (End-of-Life Best-Practice) (Szenario 4)
Basisanalyse	230	362	382	380
Sensitivitätsanalyse 1	273	405	425	422
Abweichung von der Basisanalyse in %	+19%	+12%	+11%	+11%

Wie den Tabellen 28 und 29 entnommen werden kann, macht die Nutzungsphase der Szenarien 3 und 4 trotz der Erhöhung des Stromverbrauchs in der Nutzung von 5 Jahren nur noch ca. 43% der Gesamttreibhausgasemissionen aus.³⁹

Die Amortisationsrechnung bezogen auf die Sensitivität 1 für Szenarien 3 und 4 (Kapitel 5.7.1) ergibt:

- Bei einem um 10% energieeffizienteren Notebook würden sich die Treibhausgasemissionen durch die Herstellung, Distribution und Entsorgung erst nach 67 Jahre Nutzung amortisieren.
- Bei einer Energieeffizienzsteigerung von 70% mit dem neuen Notebook sinkt die Amortisationszeit in den Szenarien 3 und 4 auf 10 Jahre.

³⁹ Sensitivitätsanalyse 1: (GWP-Werte in der Nutzungsphase / Gesamte GWP-Werte eines Notebooks in CO₂e/Stück Notebook innerhalb 5 Jahre)*100%. Beispiel Szenario 3: (181 kg CO₂e/Stück Notebook / 425 kg CO₂e/Stück Notebook)*100% = 42,7%

5.2 Sensitivitätsanalyse 2: Anpassung der Stromverbrauchswerte sowie der Betriebsmodi nach EuP Los 3

Im Rahmen dieser Sensitivitätsanalyse wird der Stromverbrauch sowie die Gewichtung der Betriebsmodi von EuP Los 3 übernommen (Tabelle 30).

Tabelle 30: Stromverbrauch nach EuP Los 3

Betriebsmodus	Nach EuP Los3	Stunden pro Jahr (h)	Leistungsaufnahme (kW/h)	Stromverbrauch (kWh/Jahr)
T _{Aus}	36%	3153	0,0015	4,73
T _{Ruhe}	34%	2995	0,003	8,99
T _{Idle}	30%	2613	0,032	83,62
Summe	100%	8761	-	97,33

Tabelle 31 zeigt den Stromverbrauch gemäß Sensitivitätsanalyse im Vergleich zum Basis-szenario. Es zeigt sich, dass sich der Stromverbrauch und die GWP-Werte in der Nutzungsphase um 110% erhöhen. Die zunehmenden GWP-Werte in der Nutzungsphase führen dementsprechend zu einer Abweichung der Gesamtergebnisse um 40% bis 66%. Die hohe Abweichung ist darauf zurückzuführen, dass die Nutzungsphase einen großen Einfluss auf die gesamten GWP-Emissionen hat.

Ein Gesamtüberblick über alle untersuchten Analysen findet sich in Kapitel 5.7.1.

Tabelle 31: Zusammenstellung des Stromverbrauchs in der Nutzungsphase der Basis- und Sensitivitätsanalyse nach verschiedenen Datengrundlagen

	Stromverbrauch/5 Jahre Lebensdauer	GWP-Werte in der Nutzungsphase
Basisanalyse (nach Energy Star® Version 5.0)	231,3 kWh	138,5 kg CO ₂ e/Stück Notebook innerhalb 5 Jahre
Sensitivitätsanalyse 2 (nach EuP Lot3)	486,7 kWh	291,4 kg CO ₂ e /Stück Notebook innerhalb 5 Jahre
Abweichung von der Basisanalyse in %	+110,4%	+110,4%

Tabelle 32: Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse 2 im Vergleich zu den Basisanalysen aller untersuchter Szenarien

Gesamte GWP-Werte eines Notebooks (kg CO ₂ e/Notebook)	EuP Los3 (Szenario 1)	EcolInvent 2.2 (Szenario 2)	UBA-FuE-Vorhaben (UFOPLAN 2009) + EcolInvent (End-of-Life Business-as-Usual) (Szenario 3)	UBA-FuE-Vorhaben (UFOPLAN 2009) + EcolInvent (End-of-Life Best-Practice) (Szenario 4)
Basisanalyse	230	362	382	380
Sensitivitätsanalyse 2	383	515	535	535
Abweichung von der Basisanalyse in %	+66%	+42%	+40%	+41%

Wie den Tabellen 31 und 32 entnommen werden kann, macht die Nutzungsphase von 5 Jahren der Szenarien 3 und 4 aufgrund des höheren Stromverbrauchs in der Nutzung ca. 54% der

Gesamttreibhausgasemissionen aus.⁴⁰ Die Amortisationsrechnung bezogen auf die Sensitivität 2 für Szenarien 3 und 4 (Kapitel 5.7.1) ergibt:

- Bei einem um 10% energieeffizienteren Notebook würden sich die Treibhausgasemissionen durch die Herstellung, Distribution und Entsorgung erst nach 41 Jahre Nutzung amortisieren.
- Bei einer Steigerung der Energieeffizienz des neuen Notebooks um 70% sinkt die Amortisationszeit in den Szenarien 3 und 4 auf 6 Jahre.

5.3 Sensitivitätsanalyse 3: Anpassung der Gewichtung der Betriebsmodi in der Nutzungsphase

In der Nutzungsphase spielt das Nutzerverhalten für die Berechnung eine große Rolle. Die Gewichtung der Betriebsmodi in der Basisanalyse beruht auf Energy Star® Version 5.0 für Computers. Im Rahmen dieser Sensitivitätsanalyse wird die Gewichtung der Betriebsmodi variiert, indem der Anteil der Idle- und Ruhemodi⁴¹ erhöht wird. In der Sensitivitätsanalyse werden zwei Gewichtungsalternativen nach verschiedenen Betriebsmodi abgeschätzt und untersucht (Tabelle 33).

Tabelle 33: Zusammenstellung der Randgröße: die Gewichtung der Betriebsmodi in der Basis- und Sensitivitätsanalyse

Betriebsmodus	Ausgangssituation (Energy Star®)	Sensitivitätsanalyse: Alternative 1 (eigene Annahme)	Sensitivitätsanalyse: Alternative 2 (eigene Annahme)
TAus	60%	30%	20%
TRuhe	10%	40%	40%
TIdle	30%	30%	40%

In Tabelle 34 sind die zugrunde gelegten Stromverbrauchsmengen in Bezug auf die zwei Gewichtungsalternativen dargestellt.

Ein Gesamtüberblick aller untersuchten Analysen ist in Kapitel 5.7 zu finden.

⁴⁰ Sensitivitätsanalyse 2: (GWP-Werte in der Nutzungsphase / Gesamte GWP-Werte eines Notebooks in CO₂e/Stück Notebook innerhalb 5 Jahre)*100%. Beispiel Szenario 3: (291,4 kg CO₂e/Stück Notebook / 535 kg CO₂e/Stück Notebook)*100% = 54,5%

⁴¹ Idle-Modus: Der Zustand, in dem das Betriebssystem und die sonstige Software vollständig geladen sind, ein Nutzerprofil erstellt wurde, das Gerät nicht im Ruhemodus ist und die Aktivität auf diejenigen grundlegenden Anwendungen beschränkt ist, die das System automatisch startet.

Ruhemodus: Ein Niedrigverbrauchsmodus, in den der Computer nach einer bestimmten Zeit der Inaktivität automatisch übergehen oder manuell versetzt werden kann. Ein Computer mit Ruhemodusfunktion kann durch Netzverbindungen oder Benutzerschnittstellengeräte schnell „geweckt“ werden und erreicht innerhalb von maximal 5 Sekunden nach Beginn des Weck-Ereignisses vollständige Betriebsbereitschaft, einschließlich Anzeigefunktion. Bei Systemen, für die ACPI-Normen gelten, entspricht der Ruhemodus in der Regel dem ACPI-Zustand S3 (Suspend to RAM).

Tabelle 34: Zusammenstellung des Stromverbrauchs in der Nutzungsphase in der Basis- und Sensitivitätsanalyse nach verschiedener Gewichtung der Betriebsmodi

Stromverbrauch in der Nutzungsphase	Kategorien A	Kategorien B	Kategorien C	Durchschnittswert	5 Jahre Lebensdauer	GWP-Werte in der Nutzungsphase
Ausgangswert	30 kWh/a	40 kWh/a	69 kWh/a	46 kWh/a	231,3 kWh/5a	138,5 kg CO ₂ e/ Notebook innerhalb 5 Jahre
Sensitivitätsanalyse: Alternative 1	31 kWh/a	41 kWh/a	68 kWh/a	47 kWh/a	234,5 kWh/5a	140,4 kg CO ₂ e/ Notebook innerhalb 5 Jahre
Sensitivitätsanalyse: Alternative 2	39 kWh/a	52 kWh/a	88 kWh/a	60 kWh/a	299,2 kWh/5a	179,1 kg CO ₂ e/ Notebook innerhalb 5 Jahre
Sensitivitätsanalyse: Alternative 1 Abweichung von der Basisanalyse in %	+3,3%	+3,1%	-0,5%	+1,4%	+1,4%	+1,4%
Sensitivitätsanalyse: Alternative 2 Abweichung von der Basisanalyse in %	+29,4%	+30,2%	+28,8%	+29,3%	+29,3%	+29,3%

Alternative 1 hat einen begrenzten Einfluss, da die Leistungsaufnahme von Notebooks im Ruhe- und Schein-Aus-Zustand⁴² generell sehr gering ist und sich diese durch die Verschiebung der Betriebsdauern zwischen diesen Zuständen und ohne Veränderung der Betriebszeit im Idle-Mode nur minimal beeinflussen lässt. Alternative 2 hingegen führt zu einem Anstieg des Stromverbrauchs bzw. der GWP-Werte in der Nutzungsphase um 29%. Es wird daher nur die Alternative 2 in der vorliegenden Studie betrachtet. Die zunehmende Dauer der Idle- und Ruhemodi führt zu einem Anstieg von 11–18% in Bezug auf die gesamten GWP-Werte des Lebenszyklus (Tabelle 35).

Tabelle 35: Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse 3 im Vergleich zu den Basisanalysen aller untersuchter Szenarien

Gesamte GWP-Werte eines Notebooks (kg CO ₂ e/Notebook)	EuP Los3 (Szenario 1)	Ecolinvent 2.2 (Szenario 2)	UBA-FuE-Vorhaben (UFOPLAN 2009) + Ecolinvent (End-of-Life Business-as-Usual) (Szenario 3)	UBA-FuE-Vorhaben (UFOPLAN 2009) + Ecolinvent (End-of-Life Best-Practice) (Szenario 4)
Basisanalyse	230	362	382	380
Sensitivitätsanalyse 3: Alternative 2	271	403	423	420
Abweichung von der Basisanalyse in %	+18%	+11%	+11%	+11%

⁴² Schein-Aus-Zustand: 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. Bei Systemen, für die ACPI-Normen gelten, entspricht der Schein-Aus-Zustand dem ACPI-Zustand S5.

Wie den Tabellen 34 und 35 entnommen werden kann, macht die Nutzungsphase der Szenarien 3 und 4 trotz der Anpassung der Gewichtung der Betriebsmodi bzw. Erhöhung der Betriebsdauer des Idle-Modus immer noch ca. 42% der Gesamttreibhausgasemissionen aus⁴³ (Alternative 2). Die Amortisationsrechnung bezogen auf die Sensitivität 2 für Szenarien 3 und 4 (Kapitel 5.7.1) ergibt:

- Bei einem um 10% energieeffizienteren Notebook würden sich die Treibhausgasemissionen durch die Herstellung, Distribution und Entsorgung erst nach 68 Jahre Nutzung amortisieren.
- Bei einer Steigerung der Energieeffizienz des neuen Notebooks um 70% sinkt die Amortisationszeit in den Szenarien 3 und 4 auf 10 Jahre.

5.4 Sensitivitätsanalyse 4: Berücksichtigung des Radiative Forcing Index (RFI-Faktors) im Flugverkehr

Diese Sensitivitätsanalyse wird nur für die Szenarien 3 und 4 durchgeführt. Dabei werden bei den Flugtransporten die zusätzlichen Klimawirkungen auf Basis des sogenannten Radiative Forcing Index (RFI) berücksichtigt. Der RFI ist ein konstanter Faktor, mit dem derzeit noch bestehende Unsicherheiten bezüglich der Klimawirksamkeit von Treibhausgasen in Abhängigkeit von der Flughöhe und dem Zustand der Atmosphäre sowie den physikalisch-chemischen Wechselwirkungen mit Kondensstreifen, Eiswolken, Ozon etc. abgebildet werden. Die verwendete Methode ist ausführlich in einem Hintergrundbericht beschrieben (Atmosfair 2008). Laut eines Updates von Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) liegt der RFI zwischen 1,9 und 4,7 (Grassl und Brockhagen 2007). Ein RFI mit einem geschätzten Mittelwert von 2,7 wurde den Berechnungen dieser Sensitivitätsanalyse zugrunde gelegt (IPCC 1999). Dies entspricht auch dem Faktor, der durch das im Auftrag von BMU/UBA erstellte „PCF Memorandum“ vom Öko-Institut empfohlen wird (Memorandum Product Carbon Footprint 2009).

Allerdings ergibt sich durch dieses Vorgehen eine Abweichung gegenüber ISO 14064-1 sowie dem GHG Protocol, da beide die Berücksichtigung eines RFI-Faktors nicht vorsehen. Die Analyse wurde trotzdem durchgeführt, um aufzuzeigen wie groß der Beitrag des RFI an der Gesamttreibhausgasemissionen ist.

Tabelle 36 zeigt die eingesetzten Emissionsfaktoren und die entsprechenden GWP-Werte. Die betroffenen Transportstrecken sind der Flugtransport eines Bildschirm-Moduls, der Flugtransport der ICs sowie die Distribution eines Endproduktes per Flugzeug und per LKW.

⁴³ Sensitivitätsanalyse 3 (Alternative 2): (GWP-Werte in der Nutzungsphase / Gesamte GWP-Werte eines Notebooks in CO₂e/Stück Notebook innerhalb 5 Jahre)*100%. Beispiel Szenario 3: (291,4 kg CO₂e/Stück Notebook / 535 kg CO₂e/Stück Notebook)*100% = 42.3%

Tabelle 36: Zusammenstellung der betroffenen Transporte der Basis- und Sensitivitätsanalyse mit und ohne Berücksichtigung des RFI

Transporte	Emissionsfaktor	Summe der betroffenen Transporte
Basisanalyse: ohne RFI	1,04 kg CO ₂ e/tkm	32,47 kg CO ₂ e/Notebook
Sensitivitätsanalyse: mit RFI = 2,7	2,58 kg CO ₂ e/tkm	78,72 kg CO ₂ e/Notebook
Abweichung von der Basisanalyse in %	+148,3%	+142,4%

Bei Berücksichtigung des RFI nimmt der GWP-Wert bezogen auf die Treibhausgasemissionen des gesamten Transportes um 142% zu. Die prozentuale Abweichung der Emissionsfaktoren und der GWP-Summe ist nicht identisch. Das liegt daran, dass ein Teil der Transporte per LKW durchgeführt werden. Die GWP-Summe in Tabelle 36 bezieht sich auf die bereits genannten drei Transportstrecken, nicht nur auf den Flugtransport. Die Veränderung der Emissionsfaktoren hat in dieser Sensitivitätsanalyse einen Einfluss von 12% auf das Gesamtergebnis der Szenarien 3 und 4 (Tabelle 37).

Ein Gesamtüberblick aller untersuchten Analysen ist in Kapitel 5.7.1 zu finden.

Tabelle 37: Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse 4 im Vergleich zu den Basisanalysen der untersuchten Szenarien 3 und 4

Gesamte GWP-Werte eines Notebooks (kg CO ₂ e/Notebook)	UBA-FuE-Vorhaben (UFOPLAN 2009) + EcolInvent (End-of-Life Business-as-Usual) (Szenario 3)	UBA-FuE-Vorhaben (UFOPLAN 2009) + EcolInvent (End-of-Life Best-Practice) (Szenario 4)
Basisanalyse	382	380
Sensitivitätsanalyse 4: mit RFI	428	426
Abweichung von der Basisanalyse in %	12%	12%

Wie den Tabellen 36 und 37 entnommen werden kann, macht die Distributionsphase der Szenarien 3 und 4 aufgrund der Berücksichtigung des RFI-Faktors fast 18% der Gesamttreibhausgasemissionen aus⁴⁴, was nicht unerheblich ist. Was die Nutzungsphase angeht, macht sie in den Szenarien 3 und 4 32% der Gesamttreibhausgasemissionen aus. Die Amortisationsrechnung bezogen auf die Sensitivität 2 für Szenarien 3 und 4 (Kapitel 5.7.1) ergibt:

- Bei einem um 10% energieeffizienteren Notebook würden sich die Treibhausgasemissionen durch die Herstellung, Distribution und Entsorgung erst nach 104 Jahre Nutzung amortisieren.
- Bei einer Steigerung der Energieeffizienz des neuen Notebooks um 70% sinkt die Amortisationszeit in den Szenarien 3 und 4 auf 15 Jahre.

⁴⁴ Sensitivitätsanalyse 4: (GWP-Werte in der Distributionsphase mit Berücksichtigung des RFI-Faktors / Gesamte GWP-Werte eines Notebooks in CO₂e/Stück Notebook innerhalb 5 Jahre)*100%. Beispiel Szenario 3: (78,72 kg CO₂e/Stück Notebook / 428 kg CO₂e/Stück Notebook)*100% = 18.3%

5.5 Sensitivität 5: Betrachtung der Emissionen der fluorierten Verbindungen (FC-Emissionen) in der Bildschirmherstellung

Diese Sensitivitätsanalyse wird nur für die Szenarien 3 und 4 durchgeführt.

Prakash et al. (2011) schätzen, dass die GWP-Werte der Bildschirmherstellung bei Fabs ohne FC-Nachbehandlung (auf Englisch: fluorinated compounds) noch höher liegen könnten als allgemein angenommen. Daher wird der in Prakash et al. (2011) berechnete GWP-Wert bei der Berechnung dieser Sensitivitätsanalyse zugrunde gelegt. Die zusätzliche Betrachtung der FC-Emissionen führt dazu, dass die GWP-Werte der Bildschirmherstellung mit 22% erheblich zunehmen (Tabelle 38), während sich dieser Anteil auf die Gesamttreibhausgasemissionen eines Notebooks nur mit ca. 2% auswirkt (Tabelle 39).

Ein Gesamtüberblick aller untersuchten Analysen findet sich in Kapitel 5.7.

Tabelle 38: Zusammenstellung der GWP-Werte aus der Bildschirm-Herstellung der Basis- und Sensitivitätsanalyse mit Berücksichtigung von FC-Emissionen im Vergleich zu den Basisanalysen der untersuchten Szenarien 3 und 4

Herstellung der Bildschirm-Moduls	kg CO ₂ e/ Notebookbildschirm
Basisanalyse	35,1
Sensitivitätsanalyse 5	42,7
Abweichung von der Basisanalyse in %	+21,7%

Tabelle 39: Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse 5 im Vergleich zu den Basisanalysen der untersuchten Szenarien 3 und 4

Gesamte GWP-Werte eines Notebooks (kg CO ₂ e/Notebook)	UBA-FuE-Vorhaben (UFOPLAN 2009) + Ecolinvent (End-of-Life Business-as-Usual) (Szenario 3)	UBA-FuE-Vorhaben (UFOPLAN 2009) + Ecolinvent (End-of-Life Best-Practice) (Szenario 4)
Basisanalyse	382	380
Sensitivitätsanalyse	390	387
Abweichung von der Basisanalyse in %	+2%	+2%

Wie den Tabellen 38 und 39 entnommen werden kann, macht die Herstellung des Bildschirm-Moduls 11% der Gesamttreibhausgasemissionen aus,⁴⁵ wenn die FC-Emissionen berücksichtigt werden. Werden die FC-Emissionen nicht mit betrachtet, macht die Herstellung des Bildschirm-Moduls am Gesamttreibhausgasemissionen nur 9% aus.

⁴⁵ Sensitivitätsanalyse 5: (GWP-Werte der Herstellung des Bildschirms in Fabs ohne FC-Nachbehandlung / Gesamte GWP-Werte eines Notebooks in CO₂e/Stück Notebook innerhalb 5 Jahre)*100%. Beispiel Szenario 3: (42,7 kg CO₂e/Stück Notebook / 390 kg CO₂e/Stück Notebook)*100% = 10,9%

Was die Nutzungsphase angeht, macht sie in den Szenarien 3 und 4 35% der Gesamtreibhausgasemissionen aus.⁴⁶ Die Amortisationsrechnung bezogen auf die Sensitivität 2 für Szenarien 3 und 4 (Kapitel 5.7.1) ergibt:

- Bei einem um 10% energieeffizienteren Notebook würden sich die Treibhausgasemissionen durch die Herstellung, Distribution und Entsorgung erst nach 90 Jahre Nutzung amortisieren.
- Bei einer Steigerung der Energieeffizienz des neuen Notebooks um 70% sinkt die Amortisationszeit in den Szenarien 3 und 4 auf 13 Jahre.

5.6 Sensitivitätsanalyse 6: Anpassung der Lebensdauer auf 2,9 Jahre

Diese Sensitivitätsanalyse wird nur für die Szenarien 3 und 4 durchgeführt. Dabei wird angenommen, dass die Lebensdauer bei 2,9 Jahren und nicht bei den in der Basisanalyse angesetzten 5 Jahren liegt. Diese 2,9 Jahre beruhen auf einer Studie von Williams und Hatanka (2005). In dieser Studie wurde eine Umfrage unter 1.000 japanischen Haushalten gemacht, um die Nutzlebensdauer (im Englischen: length of time used as primary device) des Notebooks zu bestimmen. In dieser Sensitivität kann die Frage der Amortisationszeit nicht berechnet werden, denn die Lebensdauer stellt eine Variable dar und ist nicht identisch mit der in anderen Szenarien angenommenen Lebensdauer.

Tabelle 40 zeigt den Stromverbrauch in der Nutzungsphase bei einer Lebensdauer von 2,9 Jahren. Wie aus der Tabelle ersichtlich ist, verringern sich der Stromverbrauch und der GWP-Wert in der Nutzungsphase um 42%. Die reduzierten GWP-Werte in der Nutzungsphase führen bei den Gesamtergebnissen zu einer Reduktion zwischen 25% und 15% (Tabelle 41).

Ein Gesamtüberblick aller untersuchten Analysen ist in Kapitel 5.7 zu finden.

Tabelle 40: Zusammenstellung des Stromverbrauchs in der Nutzungsphase der Basis- und Sensitivitätsanalyse nach unterschiedlicher Lebensdauer

Lebensdauer	Stromverbrauch/Lebensdauer	GWP-Werte in der Nutzungsphase
Basisanalyse (Lebensdauer von 5 Jahren)	231,3 kWh/5a	138,5 kg CO ₂ e/Notebook innerhalb 5 Jahre
Sensitivitätsanalyse 6 (Lebensdauer von 2,9 Jahren)	134,2 kWh/2,9a	80,3 kg CO ₂ e/Notebook innerhalb 2,9 Jahre
Abweichung von der Basisanalyse in %	-42%	-42%

⁴⁶ Sensitivitätsanalyse 5: (GWP-Werte in der Nutzungsphase / Gesamte GWP-Werte eines Notebooks in CO₂e/Stück Notebook innerhalb 5 Jahre)*100%. Beispiel Szenario 3: (138,5 kg CO₂e/Stück Notebook / 390 kg CO₂e/Stück Notebook)*100% = 35,5%

Tabelle 41: Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse 6 im Vergleich zu den Basisanalysen aller untersuchter Szenarien

Gesamte GWP-Werte eines Notebooks (kg CO ₂ e/Notebook)	EuP Los3 (Szenario 1)	EcolInvent 2.2 (Szenario 2)	UBA-FuE-Vorhaben (UFOPLAN 2009) + EcolInvent (End-of-Life Business-as-Usual) (Szenario 3)	UBA-FuE-Vorhaben (UFOPLAN 2009) + EcolInvent (End-of-Life Best-Practice) (Szenario 4)
Basisanalyse	230	362	382	380
Sensitivitätsanalyse 6	172	304	324	322
Abweichung von der Basisanalyse in %	-25%	-16%	-15%	-15%

Wie den Tabellen 40 und 41 entnommen werden kann, macht die Nutzungsphase der Szenarien 3 und 4 aufgrund der Reduzierung der Lebensdauer des Notebooks nur noch ca. 24% der Gesamttreibhausgasemissionen aus.⁴⁷ Vergleicht man diese Analyse mit dem Basiszenario, in dem die Lebensdauer auf 5 Jahre angesetzt wurde, erhöht sich der Anteil der Nutzungsphase auf 36% an Gesamttreibhausgasemissionen eines Notebooks. In anderen Worten reduziert sich der Anteil der Herstellungs-, Distributions- und Entsorgungsphase an Gesamttreibhausgasemissionen eines Notebooks, wenn die Lebensdauer von Notebooks verlängert wird.

5.7 Gesamtüberblick über alle untersuchten Sensitivitätsanalysen

Abbildung 12 veranschaulicht die absoluten Ergebnisse der untersuchten Sensitivitätsanalysen in Kombination mit den Ergebnissen der Basisanalyse. Eine Zusammenstellung der prozentualen Abweichungen von der jeweiligen Basisanalyse zeigt Abbildung 13. Die genaue Aufschlüsselung des Gesamtergebnisses verdeutlicht, wie in den vorangegangenen Kapiteln dargestellt, dass die Datengrundlage von EuP Los 3 die Nutzungsphase über- und die Herstellungsphase unterbewertet.

⁴⁷ Sensitivitätsanalyse 6: (GWP-Werte in der Nutzungsphase / Gesamte GWP-Werte eines Notebooks in CO₂e/Stück Notebook innerhalb 5 Jahre)*100%. Beispiel Szenario 3: (80,3 kg CO₂e/Stück Notebook / 324 kg CO₂e/Stück Notebook)*100% = 24,8%

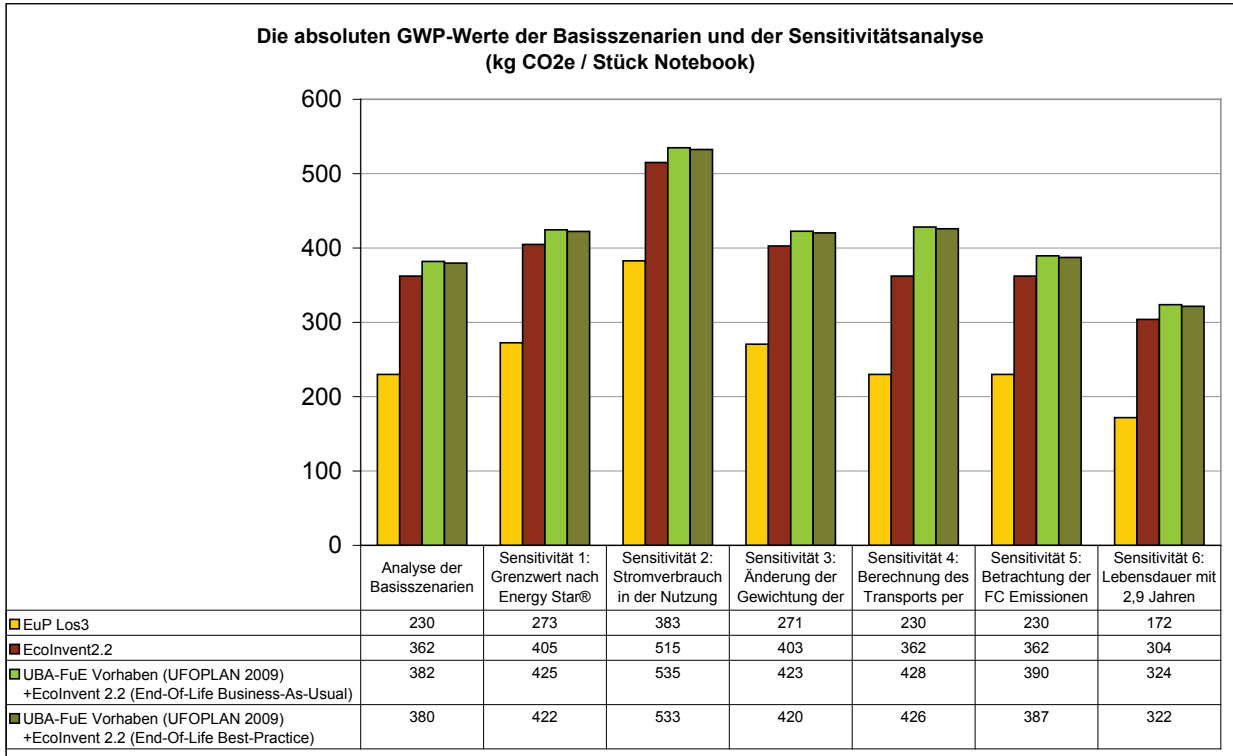


Abbildung 12: Absolute GWP-Ergebnisse der vier untersuchten Szenarien der Basis- und Sensitivitätsanalyse

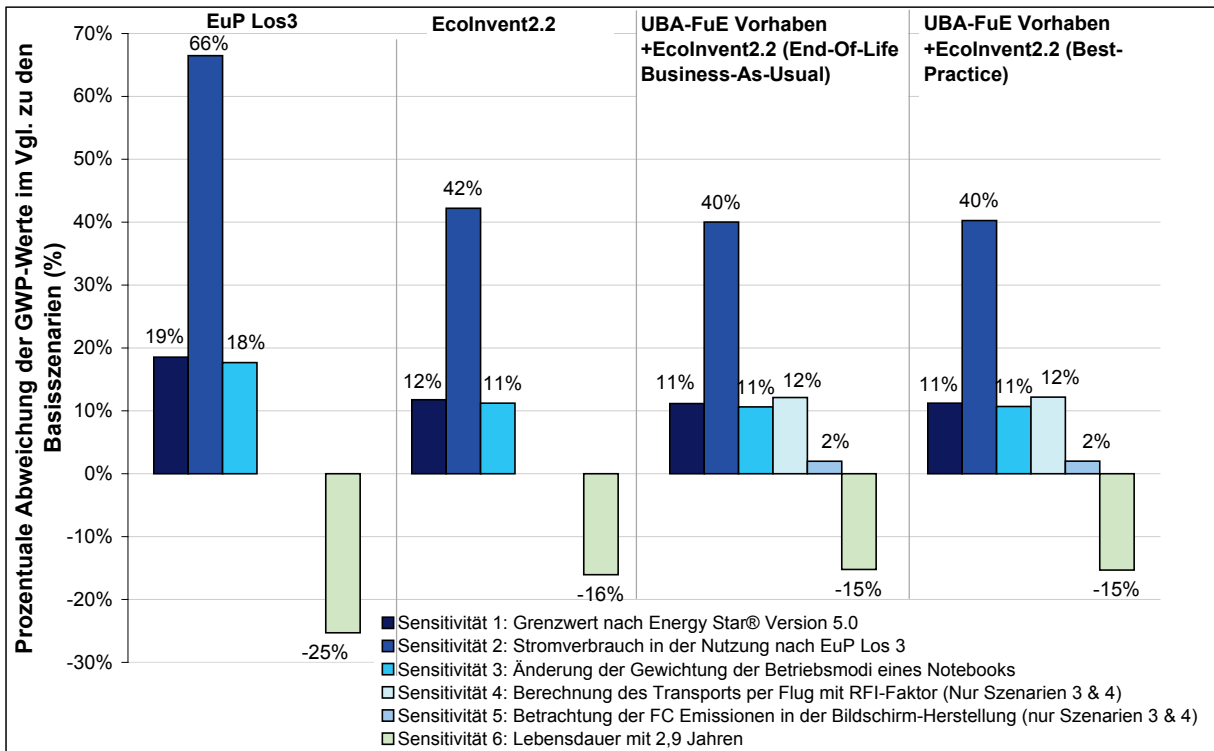


Abbildung 13: Prozentuale Abweichungen der vier untersuchten Szenarien der Sensitivitätsanalyse von der Basisanalyse

5.7.1 Amortisationsrechnung auf Basis der Sensitivitätsanalysen

In Abbildung 14 wird die Amortisationsrechnung anhand des Szenarios 4 vergleichend mit den Basisergebnissen dargestellt.

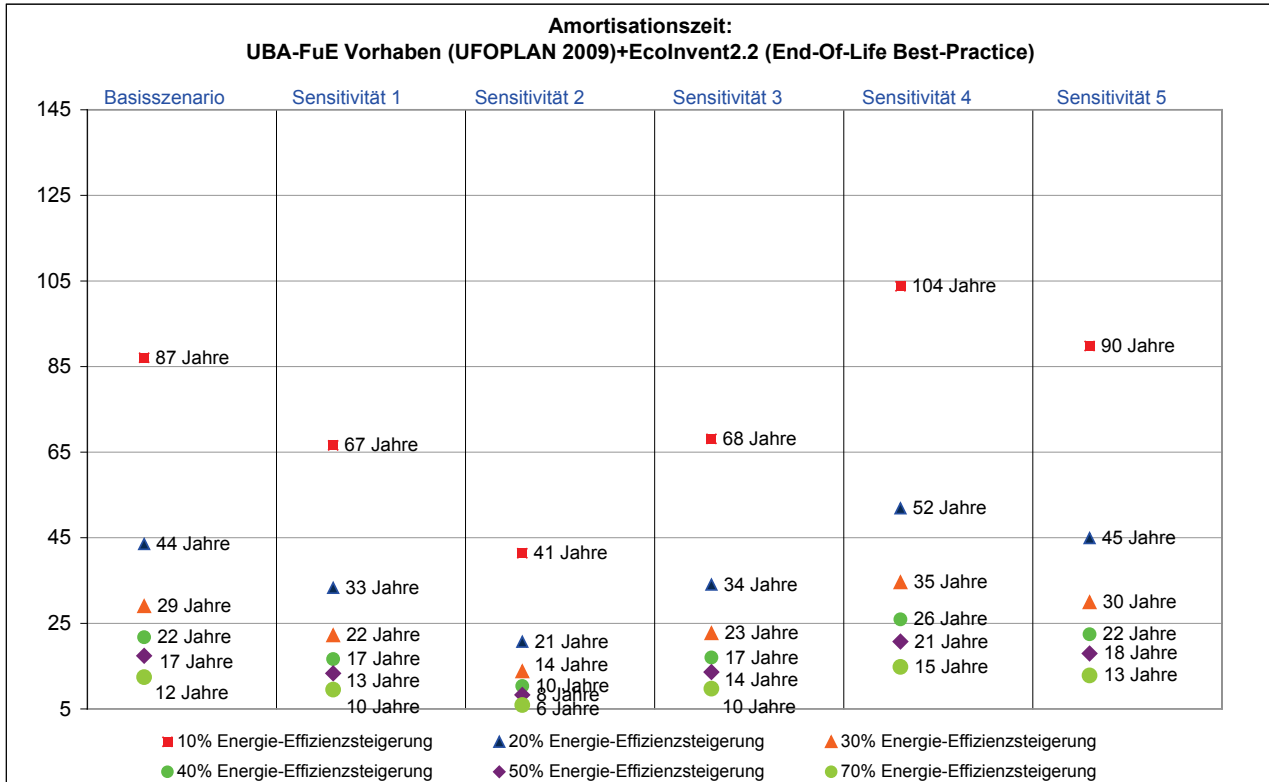


Abbildung 14: Die Amortisationszeit der Basis- und Sensitivitätsanalyse im Fall von Szenario 4 UBA-FuE-Vorhaben (UFOPLAN 2009) + Ecolnvent 2.2 (End-of-Life Best-Practice)

Bei den Sensitivitätsanalysen 1, 2 und 3 handelt es sich um die Erhöhung des Stromverbrauchs in der Nutzungsphase, entweder durch den von den Grenzwerten gerichteten Stromverbrauch oder durch die Zunahme der Idle- und Ruhephasen. In diesen Fällen führt die Zunahme des Stromverbrauchs zu einer Zunahme des Einsparpotenzials. Somit sind die Amortisationszeiten im Vergleich zu denen in der Basisanalyse generell kürzer.

Die Ergebnisse der Sensitivitätsanalysen 4 und 5 hingegen führen zu einer Zunahme der Amortisationszeit im Vergleich zur Basisanalyse. Grund dafür ist entweder die Erhöhung der GWP-Werte in der Herstellungsphase oder in anderen Lebensphasen wie der Distribution.

Es ist außerdem wichtig zu erwähnen, dass die Einzelbilanzen mit gewissen Unsicherheiten behaftet sind. Die vorliegenden Sensitivitätsanalysen dienen allerdings zur Abschätzung dieser Unsicherheiten und führen insgesamt zu einer erhöhten Richtungssicherheit der Studienaussagen. Diese Unsicherheiten können aus dem methodischen Vorgehen (z.B. Sensitivität 4, 5), aus der schwierigen Erfassung des Nutzerverhaltens (Sensitivität 1, 2, 3) oder aus den betrachteten Rahmenbedingungen, wie beispielweise Berücksichtigung von Fabs mit oder ohne FC-Nachbehandlung, resultieren (Sensitivität 5).

6 Diskussion

Die Gesamttreibhausgasemissionen eines durchschnittlichen Notebooks liegen zwischen 230 und 382 kg CO₂e bei einer Lebensdauer von 5 Jahren, je nachdem, welche Datengrundlage für die Herstellung eines Notebooks zugrunde gelegt wird. Die geringsten Treibhausgasemissionen (230 kg CO₂e pro Notebook) werden bei der Datengrundlage von EuP Los 3 (Szenario 1) errechnet. Die auf der Basis von EcoInvent 2.2. errechneten Treibhausgasemissionen pro Notebook liegen bei 362 kg CO₂e. Die Treibhausgasemissionen sind am höchsten (382 kg CO₂e pro Notebook), wenn die Daten zur Herstellung des Bildschirm-Moduls sowie des Speicherchips aus dem UBA-FuE-Vorhaben UFOPLAN (2009) und die zur Herstellung sonstiger Notebookkomponenten aus EcoInvent 2.2 zugrunde gelegt werden (Szenario 3).

Beitrag der Herstellungs- sowie der Nutzungsphase an den Gesamttreibhausgasemissionen eines Notebooks

Die Verteilung der Treibhausgasemissionen eines Notebooks auf einzelne Lebensphasen zeigt, dass die Nutzungsphase mit 60,2% deutlich stärker ins Gewicht fällt als der Herstellungsaufwand (35,2%), wenn die Datengrundlage von EuP Los 3 verwendet wird. Im Gegensatz dazu fällt die Herstellungsphase eines Notebooks stärker ins Gewicht, wenn Datengrundlagen von EcoInvent 2.2 und UBA-FuE-Vorhaben UFOPLAN 2009 (Prakash et al. 2011) verwendet werden: Mit der Datengrundlage von EcoInvent 2.2 werden 54% aller Treibhausgasemissionen der Herstellungsphase und nur 38,2% der Nutzungsphase zugeordnet. Mit der Datengrundlage von UBA-FuE-Vorhaben UFOPLAN 2009 (Prakash et al. 2011) kommen etwa 56% aller Treibhausgasemissionen auf die Herstellungsphase und nur ca. 36% auf die Nutzungsphase. In absoluten Zahlen liegt der Herstellungsaufwand eines Notebooks bei nur 81 kg CO₂e bei EuP Los 3. Bei EcoInvent sind es ca. 195 kg CO₂e und bei UBA-FuE-Vorhaben UFOPLAN 2009 (Prakash et al. 2011) ca. 214 kg CO₂e pro Notebook.

Möglicherweise entspricht das in der vorliegenden Studie zugrunde gelegte Nutzungsszenario nicht mehr dem aktuellsten Stand des Nutzerverhaltens, insbesondere im Business-Bereich. Das zugrunde gelegte Nutzungsszenario, das dem Energy Star® Version 5.0 für Computers entnommen wurde, ist aber der weltweit gebräuchlichste Standard bei der Ermittlung des Energieverbrauchs von Computerendgeräten. Allerdings berücksichtigt dieser Standard nicht die aktive Nutzung (höhere CPU-Last als im Idle-Modus) der Computerendgeräte, die möglicherweise im Bürobereich eine entscheidende Rolle spielt. Darüber hinaus 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 Betriebsmodi führt als bisher angenommen. Die Berücksichtigung der Prozessorleistung und die damit verbundene Leistungsaufnahme der Computer fehlen bisher in jeglicher Bewertung des Stromverbrauchs in der aktiven Nutzungsphase.

Nichtsdestotrotz zeigen die Sensitivitätsanalysen 1, 2 und 3, dass der Herstellungsaufwand trotz einer Erhöhung bzw. einer Verdoppelung des Stromverbrauchs in der Nutzungsphase nicht vernachlässigt werden kann. Außerdem bestätigt der Vergleich unterschiedlicher Datengrundlagen, dass der Aufwand für die Herstellung von Notebooks im EuP Los 3 deutlich unterbewertet worden ist. Andere Studien ermitteln den Herstellungsaufwand nur für das Motherboard eines Notebooks in einer Größenordnung von 70 kg CO₂e (PE International 2008; O'Connell und Stutz 2010) bis 85 kg CO₂e (Tekawa et al. 1997). In Prakash et al. (2011) wurden die Treibhausgasemissionen durch die Herstellung eines Notebookbildschirm-Moduls mit 35,1 kg CO₂e berechnet und die der Speicherchips mit ca. 7,6 kg CO₂e pro Notebook. Auch O'Connell

und Stutz (2010) berechnen die mit der Herstellung des Notebookbildschirms verbundenen Treibhausgasemissionen mit knapp 41,0 kg CO₂e pro Notebook.

Die Sensitivitätsanalyse 6, in der die Lebensdauer der Notebooks auf unter aktuellen Markt- und Konsumbedingungen realistische 2,9 Jahre (Williams und Hatanka 2005) reduziert wurde, bestätigt, dass die Nutzungsphase eines Notebooks nur 25% aller Treibhausgasemissionen ausmacht (Prakash et al. 2011). Erhöht man die Lebensdauer der Notebooks auf 5 Jahre, wie auch in den Basisszenarien angenommen, macht die Nutzungsphase 36% aller Treibhausgasemissionen aus.

Beitrag des Recyclings bzw. der End-of-Life-Phase an den Gesamttreibhausgasemissionen eines Notebooks

Die End-of-Life-Phase wird in dieser Studie nach Business-as-Usual (siehe Kapitel 3.5.1) und Best-Practice (siehe Kapitel 3.5.2) unterschieden. Der Unterschied in den Treibhausgasemissionen der beiden Szenarien ist minimal und liegt nur um 2 kg CO₂e auseinander. Die beiden Recyclingpraktiken unterscheiden sich nur bezüglich der Rückgewinnungsquoten von Gold, Silber und Palladium. Bei Business-as-Usual wird mit einer Rückgewinnungsquote von je 40% für Gold, Silber und Palladium gerechnet, bei Best-Practice mit 93% für Gold, 87% für Silber und 91% für Palladium. Dass die hohen Rückgewinnungsquoten beim Best-Practice-Recycling im Vergleich zum Business-as-Usual-Recycling nur geringe Treibhausentlastungspotenziale aufweisen, liegt an dem geringen Anteil von Gold, Silber und Palladium in den Notebooks. Betrachtet man allerdings die Gesamtanzahl der in Deutschland vorhandenen Notebooks (Bestand im privaten sowie im Business-Bereich in 2009/2010: ca. 47 Millionen Notebooks), läge das Entlastungspotenzial deutlich höher, wenn alle Notebooks in Deutschland nach dem Best-Practice-Szenario recycelt würden. Zudem könnten die Entlastungspotenziale noch weiter erhöht werden, wenn folgende Aspekte betrachtet würden:

- Umwelteffekte wie Versauerung, Eutrophierung, Rohstoffaufwand, Biodiversitätsverlust, Toxizität usw.
- Soziale Auswirkungen, wie beispielweise sichere und gesunde Lebensbedingungen der den Abbaugebieten benachbarten Bevölkerungsgruppen.
- Berücksichtigung der sekundären Rückgewinnung weiterer Edel- und Sondermetalle. Tatsächlich können in existierenden High-Tech-Anlagen bis zu 17 verschiedene Edel- und Sondermetalle aus dem Elektronikschrott zurückgewonnen werden. Dass nur die Rückgewinnung von Gold, Silber und Palladium berücksichtigt wurde, ist lediglich der Datenverfügbarkeit geschuldet.
- Berücksichtigung von Extremszenarien, wie beispielweise Recycling und Entsorgung der Notebooks in Entwicklungs- und Schwellenländern mit unterentwickelten Recyclinginfrastrukturen und -technologien. Hierzu gibt es bis heute keinen Datensatz in den vorhandenen Datenbanken.

Amortisationszeitrechnung

Im zweiten Teil des Ergebniskapitels wurde die Frage untersucht, wie effizient ein neu beschaffenes Notebook sein müsste, damit sich die Treibhausgasemissionen, die bei der Herstellung, Distribution und Entsorgung des Neugeräts entstehen, durch die Steigerung der Energieeffizienz in der Nutzungsphase amortisieren. In diesem Zusammenhang sollten ökologisch optimale Zeiträume für die Nutzung bzw. den Ersatz eines Notebooks ermittelt

werden. Damit sollten ökologisch fundierte Entscheidungsgrundlagen für Endkunden geschaffen werden, um eine Antwort auf die folgende Frage zu geben: *„Wenn das neue Notebook in der Nutzung X% energieeffizienter ist als das alte, wie lange muss dann das alte Notebook genutzt worden sein, damit die Umweltauswirkungen der Herstellung, Distribution und Entsorgung des Neugeräts kompensiert?“*

Die Analyse der Amortisationszeiten hat gezeigt, 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 amortisieren lässt – unabhängig davon, welche Datenbasis zugrunde gelegt wird. Das Szenario 1 EuP Los 3 ermittelt im Vergleich zu den anderen Daten Grundlagen bei Betrachtung der gleichen Energieeffizienzquote eindeutig die kürzeste Amortisationszeit. Geht man also von einer angenommenen Lebensdauer von 5 Jahren aus, bedeutet dies, dass sich der Austausch des Notebooks aus ökologischer Sicht lediglich unter Berücksichtigung der Datengrundlage der EuP Los 3 lohnt, allerdings erst bei einer Energieeffizienzsteigerung um 70%. Eine solche Effizienzsteigerung ist zwischen zwei Notebookgenerationen ähnlicher Ausstattung und Funktionalität unrealistisch. Denn Notebooks sind heute bereits auf hohe Energieeffizienz ausgelegt, da dies eine längere Laufzeit der Akkus ermöglicht – eine wesentliche Voraussetzung für den mobilen Gebrauch. Nimmt man eine annäherungsweise realistische Energieeffizienzsteigerung von 10% zwischen zwei Notebookgenerationen an, liegen die Amortisationszeiten zwischen 33 und 88 Jahren, bei einer 20%igen Energieeffizienzsteigerung zwischen 17 und 44 Jahren, je nachdem, welche Datengrundlage in Bezug auf die Notebookherstellung herangezogen wurde. Selbstverständlich weist kein Notebook eine solche Lebensdauer auf.

Es ist daher eindeutig, dass sich die Treibhausgasemissionen, die durch die Herstellung, Distribution und Entsorgung eines neuen Notebooks verursacht werden, durch die Energieeinsparung bzw. Energieeffizienzverbesserungen des neuen Notebooks in der Nutzungsphase nur bedingt kompensieren lassen. Selbst bei einer Steigerung der Energieeffizienz um 70% in der Nutzungsphase, amortisiert sich die Herstellung des Neugeräts erst nach 13 Jahren, berechnet mit der Datengrundlage des UBA-FuE-Vorhabens UFOPLAN 2009 (Prakash et al. 2011).

Aufgrund dieser Untersuchung ist es demzufolge ökologisch (hinsichtlich des Treibhauspotenzials) nicht sinnvoll, sich bereits nach wenigen Jahren ein neues Notebook anzuschaffen, selbst wenn dessen angenommene Energieeffizienz die Grenzen des technisch Machbaren ausschöpft.

7 Schlussfolgerung

Die Ergebnisse der vorliegenden Studie bestätigen, dass die Herstellungsphase einen signifikanten Beitrag zu den Gesamttreibhausgasemissionen eines Notebooks leistet und deswegen im Fokus einer nachhaltigen Produktpolitik stehen sollte. Die europäische Ökodesignpolitik (EuP) legt ihren Fokus bislang jedoch auf die Steigerung der Energieeffizienz bzw. die Reduzierung des Energieverbrauchs in der Nutzungsphase. Für die Produktgruppe Notebook ist dieser Fokus nur beschränkt zielführend, denn Notebooks sind bereits jetzt auf hohe Energieeffizienz ausgelegt, u.a. um die Laufzeit und die Lebensdauer der Akkus für die mobile Nutzung zu verlängern. Deswegen sollte die europäische Ökodesignpolitik die sogenannten Original Equipment Manufacturers (OEMs) sowie die Komponentenhersteller der IKT-Geräte im Kontext des gesamten Lebenszyklus adressieren. Dabei sollte der Fokus der verpflichtenden produktpolitischen Maßnahmen für IKT-Geräte auf folgende Aspekte, die zu einer Lebensdauerverlängerung führen, gelegt werden:

- Möglichkeiten der Auf- und Nachrüstung,
- Modularer Aufbau,
- Recyclinggerechte Konstruktion,
- Ersatzteilverfügbarkeit,
- Standardisierung von Komponenten und
- Verlängerung der Mindestgarantie.

Nicht zuletzt sollte der Fokus der Bewertung der Umweltauswirkungen von IKT-Geräten nicht nur auf Treibhausgasemissionen beschränkt werden, sondern auch auf die anderen Wirkungskategorien ausgeweitet werden, wie Versauerungs- und Eutrophierungspotenzial, Rohstoffaufwand, Biodiversitätsverlust, Toxizität usw.

8 Literatur

- Atmosfair 2008; Atmosfair. Der Emissionsrechner; online unter http://www.atmosfair.de/fileadmin/user_upload/image4/PDF_Dokumentation_deutsch.pdf, besucht am 07.01.2008
- CarbonNeutral Company 2010; Calculations and Emission Factors; online unter <http://www.carbonneutralcalculator.com/Carbon%20Offset%20Factors.pdf>, besucht am 21.01.2011
- Chancerel, P.; Substance flow analysis of the recycling of small waste electrical and electronic equipment, An assessment of the recovery of gold and palladium, Dissertation, TU Berlin, 2010
- Deng, L.; Babbitt, C.W.; Williams, E.D.; Economic-balance hybrid LCA extended with uncertainty analysis: case study of a laptop computer; in: Journal of Cleaner Production (2011); doi:10.1016/j.jclepro.2011.03.004
- EcoInvent v2.2, 2010; EcoInvent Centre (Swiss Centre for Life cycle Inventories); <http://www.ecoinvent.ch/>
- EcoInvent 2.2 Report Nr.16 2010; Documentation of changes implemented in ecoinvent Data v2.1 and v2.2, Swiss Centre for Life Cycle Inventories; St. Gallen 2010
- Energy Star® 2009; Amtsblatt der Europäischen Union, zur Festlegung des Standpunkts der Gemeinschaft für einen Beschluss der nach dem Abkommen zwischen der Regierung der Vereinigten Staaten von Amerika und der Europäischen Gemeinschaft über die Koordinierung von Kennzeichnungsprogrammen für Strom sparende Bürogeräte eingesetzten Verwaltungsorgane über die Änderung der Spezifikationen für Computer in Anhang C Teil VIII des Abkommens, vom 16. Juni 2009
- 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
- Gmünder, S.; Recycling – from waste to resource. Assessment of optimal manual dismantling depth of a desktop PC in China based on eco-efficiency calculations. Diploma thesis at ETH Zurich; Zürich 2007
- Grassl, H.; Brockhagen, D.; Climate forcing of aviation emissions in high altitudes and comparison of metrics, An update according to the Fourth Assessment Report, IPCC 2007; online unter <http://www.mpimet.mpg.de/wissenschaft/publikationen/papers/climate-forcing-of-aviation-emissions-in-high-altitudes-and-comparison-of-metrics.html>
- Gref, O.; Georgi, L.; Hahn, D.; Wöhrmann, M.; Kruse, K.; Laborbericht, Umweltgerechte Produktentwicklung in der Elektronik; TU Berlin und Fraunhofer IZM, Lehrveranstaltung 0431 L 718, Wintersemester 2008/09
- Hagelüken, C.; Buchert, M.; The mine above ground – Opportunities and challenges to recover scarce and valuable metals from EOL electronic devices; Presentation at the IERC Salzburg, 17 January 2008
- Hermanns, S.; “Experiences from Piloting a Carbon Footprint Method for Semiconductor Manufacturing”, Präsentation bei der UBA-Experten-Runde, 21.09.2010
- Higgs, T.; Yao, M.; Cullen, M.; Stewart, S. (Intel Corporation); “Developing an Overall CO₂ Footprint for Semiconductor Products”, IEEE International Symposium on Sustainable Systems and Technology ISSST May 2009

- Higgs, T.; Cullen, M.; Yao, M.; Stewart, S.; "Review of LCA methods for ICT products and the impact of high purity and high cost materials", Sustainable Systems and Technology (ISSST), 2010 IEEE International Symposium on, pp.1-6, 17-19 May 2010; doi: 10.1109/ISSST.2010.5507691
- Hischier, R.; EcoInvent2.0 Report Nr. 18, Part V: Disposal of Electric and Electronic Equipment (e-Waste), Swiss Centre for Life Cycle Inventories; St. Gallen 2007
- IPCC 1999; „Aviation and the Global Atmosphere“. A Special Report of IPCC Working Groups I and III in collaboration with the Scientific Assessment Panel to the Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer. J.E. Penner, D.H. Lister, D.J. Griggs, D.J. Dokken, M. McFarland (Eds.), Cambridge University Press; Cambridge 1999
- IPCC Guidelines 2006 for National Greenhouse Gas Inventories, Volume 3: Industrial Processes and Product Use; online unter <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol3.html>
- ITRI (Industrial Technology Research Institute) Taiwan, Projekttreffen am 02.09.2010
- Jain, S.; A comparative assessment of the carbon footprint of AMD Fusion™ products with the previous generation products, 2011; online unter <http://www.amd.com/us/Documents/APU%20Carbon%20Footprint%20white%20paper%20FINAL%20%2021%2011.pdf>, besucht am 31.01.2011
- KBA – Kraftfahrt-Bundesamt; Emissionen, Kraftstoffe-Deutschland und seine Länder am 1. Januar 2010, Bestand an Personenkraftwagen am 1. Januar 2010 nach Bundesländern und Kraftstoffen absolut, 2010; online unter http://www.kba.de/nn_269000/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/EmissionenKraftstoffe/2010__b__emi__eckdaten__absolut.html, besucht am 31.01.2011
- Lehmann, M. & Hischier, R.; EcoInvent Report Nr. 18 Part III: Electronic Devices, Empa/Technology&Society Lab, Swiss Centre for Life Cycle Inventories; St. Gallen 2007
- Memorandum Product Carbon Footprint 2009; Positionen zur Erfassung und Kommunikation des Product Carbon Footprint für die internationale Standardisierung und Harmonisierung; Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Umweltbundesamt und Öko-Institut 2009
- O’Connell, S.; Stutz, M.; 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
- Öko-Institut e.V., M. Buchert: Life Cycle Assessment of Nickel Metal hydride Batteries for HEV Application, Vortrag auf IARC, Basel, 4. März 2010
- PCF Notebook Computers 2008; Product-Category Rules (PCR) for preparing an environmental product declaration (EPD) for Notebook Computers, PCR 2008: 1.0, online unter http://www.environdec.com/pcr/pcr_Notebook.pdf
- PE International 2008; Environmental footprint of ICT equipment in manufacture, use and end-of-life. Presentation held at ECOC Brussels, Belgium, 23. Sept. 2008
- Prakash, S.; Brommer, E. (2010); PROSA Stationäre Arbeitsplatzcomputer – Entwicklung der Vergabekriterien für ein klimaschutzbezogenes Umweltzeichen, Studie im Rahmen des Projektes „Top 100 – Umweltzeichen für klimarelevante Produkte“; Öko-Institut 2010

- Prakash, S.; Brommer, E.; Manhart, A.; PROSA Tragbare Computer - Entwicklung der Vergabekriterien für ein Klimaschutzbezogenes Umweltzeichen, Studie im Rahmen des Projektes „Top 100 – Umweltzeichen für klimarelevante Produkte“; Öko-Institut 2010
- Prakash, S.; Manhart, A.; Socio-economic assessment and feasibility study on sustainable e-waste management in Ghana; Öko-Institut e.V. in Kooperation mit Ghana Environmental Protection Agency (EPA) & Green Advocacy Ghana, Ministry of Housing, Spatial Planning and the Environment, VROM-Inspectorate; Den Haag 2010
- Prakash, S.; Liu, R.; Schischke, K. und Stobbe, L. (2011); Schaffung einer Datenbasis zur Ermittlung ökologischer Wirkungen der Produkte der IKT, unter Mitarbeit von Gensch, C.-O. im Rahmen des Ufoplanvorhabens 2009 Ressourcenschonung im Aktionsfeld Informations- und Kommunikationstechnik (IKT) – FKZ 3709 95 308; Öko-Institut e.V. in Kooperation mit Fraunhofer Institut für Zuverlässigkeit und Mikrointegration (IZM)
- Tekawa M.; Miyamoto, S.; Inaba, A.; Life Cycle Assessment; an approach to environmentally friendly PCs, Proc IEEE Int Symp Electron Environ, May 5-7, San Francisco, CA, pp. 125-130
- Umweltbundesamt (UBA); Fluorierte Treibhausgase vermeiden: Wege zum Ausstieg; UBA 2010
- Wang, X.; Greenhouse Gas Emissions of the Agricultural and Livestock Products in China, 2009; online unter www.seiofbluemountain.com/en/search/detail.php?id=5830, besucht am 20.01.2011
- Williams, E.; Hatanka, T.: Residential computer usage patterns in Japan und associated life cycle energy use. In: Proceedings of the IEEE International Symposium on Electronics and the Environment, IEEE, May 2005, Piscataway, New Jersey, pp. 177-182

9 Anhang

Tabelle 42: Länderspezifische Emissionsfaktoren für die Strombereitstellung (Strommix)

Datenquelle	Datensatz	verwendeter GWP-Emissionsfaktor in der vorliegenden Studie: kg CO ₂ e/kWh	Ortsbezug	Zeitbezug
GEMIS 4.6	Netz-el-DE-Verteilung-MS-2010	0,591	Deutschland	2010
GEMIS 4.6	El-KW-Park-JP-2005	0,502	Japan	2005
GEMIS 4.6	El-KW-Park-US-2010	0,638	USA	2010
GEMIS 4.6	El-KW-Park-EU-30-2010	0,377	EU25+BG+RO+TR+CH+NO	2010
Wang 2009		0,997	China	2008
Persönliche Mitteilung von ITRI Taiwan		0,810	Taiwan	2009
CarbonNeutral Company 2010		0,673	Singapur	k.A.
		0,532	Korea	k.A.
		0,678	Malaysia	k.A.
		0,608	Philippinen	k.A.

Tabelle 43: Input- und Outputdaten zum Datensatz „Silizium-Wafer-Herstellung“ (Prakash et al. 2011)

Input			Output		
Strom	3,85E-01	kWh	polierte Wafer	1	cm ²
Siliziumdioxid	4,87E-03	kg	CO ₂	8,33E-03	kg
Holzschnitzel	1,83E-03	kg	CO	1,67E-04	kg
Trockenes Holz	3,98E-03	kg	NO _x	1,38E-05	kg
Petrolkoks	5,97E-04	kg	Methanol	8,51E-05	kg
Elektrodenmaterial	1,63E-04	kg	Methan	6,88E-05	kg
Chlorwasserstoff (HCl)	6,75E-03	kg	Ethan	2,90E-05	kg
			Partikel	2,01E-04	kg
			H ₂ O	1,88E-03	kg
			SO ₂	3,44E-05	kg
			SiO ₂	1,63E-05	kg
			Wasserstoff	1,25E-04	kg
			Metallchloride	7,87E-04	kg
			Koppelprodukte: Silizium-Reste	4,50E-03	kg

Tabelle 44: Input- und Outputdaten zum Datensatz „IC-Fertigung Front-End-Prozess/Wafer Out“ (Prakash et al. 2011)

Input			Output		
Silizium-Wafer	1,14	cm ²	fertiger Wafer Out	1	cm ²
Strom	1,05	kWh	HFC-23 (Trifluormethan)	1,86E-06	kg
Gas	0,13	kWh	Perfluorethan (C ₂ F ₆)	3,16E-06	kg
Wasser	6,5	kg	Tetrafluormethan (CF ₄)	2,68E-06	kg
N ₂ (hochrein)	5,00E-01	kg	Perfluorpropan (C ₃ F ₈)	1,86E-06	kg

Zeitoptimierter Ersatz eines Notebooks unter ökologischen Gesichtspunkten

Input			Output		
O ₂ (hochrein)	3,41E-03	kg	SF ₆	1,86E-06	kg
Ar (Argon) (hochrein)	1,93E-03	kg	Stickstofftrifluorid (NF ₃)	1,29E-05	kg
H ₂ (hochrein)	5,23E-05	kg			
Schwefelsäure (hochrein)	6,04E-03	kg			
Wasserstoffperoxid (hochrein)	1,68E-03	kg			
Fluorwasserstoffsäure (hochrein)	4,56E-04	kg			
Phosphorsäure (hochrein)	2,74E-03	kg			
2-Propanol (C ₃ H ₈ O)/ Isopropylalkohol (IPA) (hochrein)	2,30E-03	kg			
Ammoniumhydroxid (hochrein)	8,95E-04	kg			
CF ₄	4,89E-05	kg			
CHF ₃	4,67E-06	kg			
NF ₃	2,49E-04	kg			
C ₂ F ₆	5,68E-05	kg			
SF ₆	7,39E-06	kg			
NaOH (für Abwasserbehandlung)	1,68E-03	kg			

Tabelle 45: Input- und Outputdaten zum Datensatz „IC-Fertigung Front-End-Prozess\„good die out“ (Prakash et al. 2011)

Inputs			Outputs		
Silizium-Wafer	1,38	cm ²	„good die out“	1	cm ²
Strom	1,27	kWh	HFC-23 (Trifluormethan)	2,26E-06	kg
Gas	0,16	kWh	Perfluorethan (C ₂ F ₆)	3,84E-06	kg
Wasser	7,88	kg	Tetrafluormethan (CF ₄)	3,25E-06	kg
N ₂ (hochrein)	6,06E-01	kg	Perfluorpropan (C ₃ F ₈)	2,26E-06	kg
O ₂ (hochrein)	4,13E-03	kg	SF ₆	2,26E-06	kg
Ar (Argon) (hochrein)	2,34E-03	kg	Stickstofftrifluorid (NF ₃)	1,56E-05	kg
H ₂ (hochrein)	6,34E-05	kg			
Schwefelsäure (hochrein)	7,33E-03	kg			
Wasserstoffperoxid (hochrein)	2,04E-03	kg			
Fluorwasserstoffsäure (hochrein)	5,53E-04	kg			
Phosphorsäure (hochrein)	3,32E-03	kg			
2-Propanol (C ₃ H ₈ O)/ Isopropylalkohol (IPA) (hochrein)	2,78E-03	kg			
Ammoniumhydroxid (hochrein)	1,09E-03	kg			
CF ₄	5,94E-05	kg			
CHF ₃	5,66E-06	kg			
NF ₃	3,02E-04	kg			
C ₂ F ₆	6,89E-05	kg			
SF ₆	8,96E-06	kg			
NaOH (für Abwasserbehandlung)	2,04E-03	kg			

Tabelle 46: Input- und Outputdaten zum Datensatz „IC-Fertigung Back-End-Prozess“ (Prakash et al. 2011)

Input			Output		
Strom	0,5476	kWh	Speicherchips	1	Stück (0,162 g)
Erdgas	0,0678	kWh			
Unverkapselte Chip (Silizium)	0,024	g			
Polymer	0,011	g			
SiO ₂	0,048	g			
Au	0,000	g			
Carbon Black	0,000	g			
Ag	0,001	g			
Cu	0,0001	g			
Sn	0,026	g			
BT-Core (Bismaleimide-triazine) + Cu + Au + Ni	0,053	g			

Tabelle 47: Faktoren von hochreinen Chemikalien zu normalen Chemikalien (Higgs et al. 2010)

Elementare Gase	Faktoren von hochreinen Chemikalien zu normalen Chemikalien
N ₂	1,8
O ₂	1,9
Argon, Ar	3
Wasserstoff, H ₂	9
Chemikalien	Faktoren von hochreinen Chemikalien zu normalen Chemikalien
Schwefelsäure	10
Phosphorsäure	1,45
Wasserstoffperoxid	1,17
2-Propanol (C ₃ H ₈ O)/Isopropylalkohol (IPA)	1,39
Ammoniumhydroxid	1,17
Fluorwasserstoffsäure	1,21

Tabelle 48: Emissionsfaktoren für Primär- und Sekundärmetallgewinnung (EcoInvent 2.1)

GWP [kg CO ₂ e/kg]	Fe (Stahl)	Al	Cu	Ag	Au	Pd
Primäre Produktion	2,04	10,20	2,81	112,14	17.879,75	9.284,30
Sekundäre Produktion	0,40	1,32	0,10	14,31	835,40	437,57

Tabelle 49: Die in der Bilanz gewonnenen Metallfraktionen in kg bezogen auf das jeweils betrachtete Notebook

kg/Notebook	Szenario 2: EcoInvent 2.2 (End-of-Life Business-as-Usual)	Szenario 3 und 4: UBA-FuE-Vorhaben (UFOPLAN 2009) + EcoInvent
Al	1,5E-01	1,6E-01
Cu	2,2E-01	2,4E-01
Fe	3,5E-01	3,8E-01
Ag	1,3E-04	3,1E-04
Au	8,7E-05	2,2E-04
Pd	8,7E-06	2,1E-05

Zeitoptimierter Ersatz eines Notebooks unter ökologischen Gesichtspunkten

Gewicht des jeweiligen Notebooks	2,17	2,4
----------------------------------	------	-----

Tabelle 50: Absolute GWP-Ergebnisse und prozentuale Anteile der Speicherchipherstellung

Prozesse	kg CO ₂ e/pro Speicherchip (1 GB)	Anteil
Silizium-Wafer-Herstellung	0,13	14,0%
Front-End-Prozess	0,62	65,7%
Back-End-Prozess	0,19	20,0%
Transporte (Silizium-Wafer -> Front-End-Prozess -> Back-End-Prozess -> Notebook Assembly)	0,003	0,3%
Summe (kg CO ₂ e/Speicherchip)	0,95	100%