

TEXTE

82/2013

Schaffung einer Datenbasis zur Ermittlung ökologischer Wirkungen der Produkte der Informations- und Kommunikationstechnik (IKT)

Teilvorhaben C des Gesamtvorhabens

Ressourcenschonung im Aktionsfeld Informations- und
Kommunikationstechnik (IKT)

UMWELTFORSCHUNGSPLAN DES
BUNDESMINISTERIUMS FÜR UMWELT,
NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT

Forschungskennzahl 3709 95 308 (Teil C)
UBA-FB 001788

**Schaffung einer Datenbasis zur
Ermittlung ökologischer Wirkungen der
Produkte der Informations- und
Kommunikationstechnik (IKT)**

Teilvorhaben C des Gesamtvorhabens
Ressourcenschonung im Aktionsfeld Informations-
und Kommunikationstechnik (IKT)

von

Siddharth Prakash, Ran Liu
Öko-Institut e.V.

Karsten Schischke, Dr. Lutz Stobbe
Fraunhofer-Institut für Zuverlässigkeit und Mikrointegration (IZM)

unter Mitarbeit von
Carl-Otto Gensch
Öko-Institut e.V.

UMWELTBUNDESAMT

Diese Publikation ist ausschließlich als Download unter <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/schaffung-einer-datenbasis-zur-ermittlung> verfügbar.

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.
Postfach 1771
791000 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:

Beratungsstelle nachhaltige Informations- und
Kommunikationstechnik – Green IT
Marina Köhn

Fachgebiet III 1.1 Übergreifende Aspekte des produktbez.
Umweltschutzes, Nachhaltige Konsumstrukturen,
Innovationsprogramm
Maike Janßen

Dessau-Roßlau, September 2013

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	V
Tabellenverzeichnis	VI
Zusammenfassung	1
1 Vorbemerkung	4
2 Ziel der Studie	7
3 Festlegung des Untersuchungsgegenstandes	7
3.1 Marktrelevanz Notebooks	8
3.2 Auswertung verfügbarer Ökobilanz- und PCF-Studien zu Notebooks	9
3.3 Komponentenauswahl	12
4 Vorgehensweise	16
4.1 Erstellung der Sachbilanzdaten	16
4.2 Import und Veröffentlichung in ProBas	16
5 Ergebnis I: Datensatz für Bildschirm-Modul	18
5.1 Beschreibung des Produktes	18
5.2 Festlegung des Untersuchungsrahmens	20
5.2.1 Bezugsgröße	20
5.2.2 Festlegung der Systemgrenze	20
5.2.3 Repräsentativität des Datensatzes	21
5.3 Ergebnis und Auswertung des Datensatzes für das Bildschirm-Modul	21
5.3.1 Erstellung des Datensatzes	21
5.3.2 Ergebnisse des Datensatzes	23
5.3.3 Abschätzung der eingesetzten Stoffmengen in Fabs	25
5.3.4 Datenqualitätsanalyse	27
6 Ergebnis II: Datensatz für Integrierte Schaltung (IC)	28
6.1 Beschreibung des Produktes	28
6.2 Festlegung des Untersuchungsrahmens	31
6.2.1 Bezugsgröße	31
6.2.2 Festlegung der Systemgrenze	33
6.2.3 Repräsentativität der Datensatz	37
6.3 Ergebnis und Auswertung des Datensatzes für ICs	38
6.3.1 Datensatz für die Herstellung des Silizium-Wafers	38

6.3.2	Datensatz für Front-End-Prozesse für Speicherchips	41
	Ermittlung der Ausbeute bei der Chip-Herstellung	41
	Energieverbrauch	43
	Chemikalienverbrauch	44
	Wasserverbrauch	47
	PFC-Emissionen	48
6.3.3	Datensatz für Back-End-Prozesse für Speicherchip	49
	Spezifikation und Materialzusammensetzung der Speicherchip	49
	Energieverbrauch	50
6.3.4	Ergebnisse der Datensätze	52
6.3.5	Datenqualitätsanalyse	55
7	Datensatz für wiederaufladbare Lithium-Batterien: Weiteres Vorgehen	56
8	Schlussforderung und weiterer Forschungsbedarf	61
9	Literatur	66
Anhang		71

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1	Metalle in einem Mobiltelefon	5
Abbildung 2	Verkaufte PCs in Deutschland (in Mio. Stück).	8
Abbildung 3	Treibhauspotenzial (GWP) in CO ₂ e in der Herstellungsphase ausgewählter Notebooks	10
Abbildung 4	Aufteilung der komponentenbezogenen Treibhausgasemissionen (CO ₂ e) in der Herstellungsphase eines Notebooks der Firma Dell.	13
Abbildung 5	Aufteilung der Subkomponentenbezogenen Treibhausgasemissionen (CO ₂ e) in der Herstellungsphase eines Motherboards eines Notebooks der Firma Dell.	14
Abbildung 6	Darstellung der Vorgehensweise dieser Studie	17
Abbildung 7	Komponente eines Bildschirms	18
Abbildung 8	Betrachtete Prozesse innerhalb der Systemgrenze	20
Abbildung 9	Vereinfachte Darstellung eines fertigen Wafers (nicht maßstabsgerecht).	29
Abbildung 10	Front-End-Prozesse und Back-End-Prozesse	30
Abbildung 11	Systemgrenze des ProBas-Datensatzes für die Herstellung des Silizium-Wafers	34
Abbildung 12	Systemgrenze des ProBas-Datensatzes für die Front-End-Prozesse	35
Abbildung 13	Systemgrenze des ProBas-Datensatzes für Back-End-Prozesse	36
Abbildung 14	Wiederaufladbare Lithium-Batterie eines Notebooks (Öko-Institut 2011)	56
Abbildung 15	Aufbau eines prismatischen Li-Polymer-Akkus	57

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1	Überblick über die in ProBas veröffentlichten Datensätze	2
Tabelle 2	Überblick über die in ProBas veröffentlichten Datensätze	17
Tabelle 3	Technische Kennwerte für den Untersuchungsgegenstand Bildschirm-Modul	19
Tabelle 4	Repräsentativität des Datensatzes für das Bildschirm-Modul	21
Tabelle 5	Zusammensetzung nach Materialien und Subkomponenten pro funktionelle Einheit (bezogen auf 1 Stück Bildschirm-Modul ohne Verpackungsmaterial)	22
Tabelle 6	Verpackungsmaterial (bezogen auf 1 Stück Bildschirm-Modul) ³¹	22
Tabelle 7	Fertigungsaufwand (bezogen auf 1 Stück Bildschirm-Modul) ³¹	23
Tabelle 8	Gesamte Input- und Outputflüsse für den Datensatz „Bildschirm- Modul“	24
Tabelle 9	Abschätzung der FC Emissionen nach den Default-Werten von IPCC für die TFT-LCD Flachbildschirmherstellung	27
Tabelle 10	Wichtige Begriffe zum Verständnis der IC-Datensätze	31
Tabelle 11	IC-Datensätze mit ihren Bezugsgrößen für den Import in Probas	33
Tabelle 12	Repräsentativität der IC-Datensätze (Ohne Vorkette)	37
Tabelle 13	Repräsentativität des Datensatzes für die Herstellung des Silizium- Wafers	38
Tabelle 14	Technische Kennwerte von der 300mm Silizium-Wafer in der vorliegenden Studie	38
Tabelle 15	Input- und Outputflüsse bei der Herstellung des Silizium-Wafers (Wiege zum Werkstor) nach der Bezugsgröße 1 kg Wafer.	39
Tabelle 16	Input- und Outputflüsse bei der Herstellung des Silizium-Wafers nach der Bezugsgröße 1 cm ² polierter Wafer.	41
Tabelle 17	Kenndaten bei der Wafer-Fertigung und Ermittlung der Ausbeute von der Chip-Herstellung	43
Tabelle 18	Energieinput im Front-End-Prozesse bezogen auf zwei Bezugsgrößen	44
Tabelle 19	Chemikalienverbrauch im Front-End-Prozesse (kg/cm ² Wafer Out)	46
Tabelle 20	Faktoren für die Berechnung der hochreinen Chemikalien aus Standardchemikalien (Higgs et al. 2010)	47
Tabelle 21	Wasserverbrauch bei der Chip-Herstellung	47
Tabelle 22	PFC-Anteile und ihre Charakterisierungsfaktoren	48
Tabelle 23	PFC-Emissionen und ihre GWP-Werte	49

Tabelle 24	Spezifikation der Speicherchips	50
Tabelle 25	Materialdeklaration eines Speicherchips der Firma Samsung	50
Tabelle 26	Überblick über die Abschätzungen zum Energieaufwand für Back-End-Prozesse	51
Tabelle 27	Energieinput im Back-End-Prozesse	51
Tabelle 28	Input- und Outputdaten für den Datensatz „Silizium-Wafer-Herstellung“	52
Tabelle 29	Input- und Outputdaten für den Datensatz „IC-Fertigung-Front End Prozess\Wafer Out“ (direkte Emissionen)	53
Tabelle 30	Input- und Outputdaten für den Datensatz „IC-Fertigung-Front End Prozess”good die out” (direkte Emissionen)	54
Tabelle 31	Input- und Outputdaten für den Datensatz „IC-Fertigung-Back End Prozess“ (direkte Emissionen)	55
Tabelle 32	Technische Parameter von Beispiellaptops mit 15,4" Bildschirm	58

Zusammenfassung

Die Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT) können in vielen wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Bereichen einen wichtigen Beitrag zum Klimaschutz leisten. Beispielsweise durch intelligente Steuerung von Stromnetzen und Gebäuden, Vermeidung von Verkehr durch Telefon- und Videokonferenzsysteme, Substitution physischer durch digitale Güter usw. Auf der anderen Seite ist aber die Produktion, Nutzung und Entsorgung der IKT-Geräte und Infrastruktur mit erheblichen Umweltauswirkungen verbunden. Die aktuellen Trends zur Konvergenz und Digitalisierung gekoppelt mit einer Erhöhung der Nutzungsintensität, die durch die Veränderungen in den Lebensstilen ausgelöst werden, und einer Steigerung in den Verkaufs- sowie Gerätezahlen, könnten zu höheren Umweltauswirkungen der IKT führen als bisher vermutet.

Kennzeichnend für die derzeitige Debatte über die Umweltbelastung durch IKT ist der starke Fokus auf die Nutzungsphase der Geräte und Infrastrukturen. Gründe für diese Schwerpunktsetzung liegen in dem aktuellen Diskurs um den Klimawandel und die deutlich steigenden Energiekosten (UBA 2009). Dabei gerät aber die Berücksichtigung der Umweltauswirkungen, die während der Produktionsphase verursacht werden, oft in den Hintergrund. Zu einem großen Teil ist die Vernachlässigung der Produktionsphase auch auf die derzeitige unbefriedigende Informations- und Datenlage bezüglich Stoff- und Energieströmen sowie dem Material- und Ressourcenverbrauch in den Herstellungsketten zurückzuführen. Außerdem bedürfen die vorhandenen Daten zur Berechnung von Ökobilanzen im Bereich der IKT-Produkte aufgrund der hohen Technologiedynamik bei Produkten und Fertigungsprozessen einer stetigen Überprüfung und Erneuerung. Derzeit verfügbare Datensätze können nur bedingt auf moderne Produkte angewendet werden, da sie nicht mehr den heute realisierten Stand der Technik abbilden.

Vor diesem Hintergrund hat das Umweltbundesamt im Rahmen des UFOPLAN 2009 „Ressourcenschonung im Aktionsfeld Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT)“ das Öko-Institut e.V. und das Fraunhofer IZM Berlin beauftragt, in einem Teilvorhaben „Schaffung einer Datenbasis zur Ermittlung ökologischer Wirkungen der Produkte der Informations- und Kommunikationstechnik (IKT)“ die Datengrundlage im Bereich IKT zu verbessern und somit eine Grundlage für die Ermittlung der Ressourceneinsparpotentiale im Aktionsfeld IKT zu schaffen.

Aufgrund der Komplexität und der Vielfalt der IKT wurde der Untersuchungsrahmen dieser Studie auf die Produktgruppe Notebooks beschränkt. Aufgrund des begrenzten Forschungsbudgets wurde auf der Komponentenebene eine weitere Fokussierung des Untersuchungsrahmens der Studie vorgenommen. Es wurden diejenigen Notebookkomponenten für die Erhebung der Lebenszyklusdaten ausgewählt, die aus Umwelt- und Ressourcengesichts-

punkten besonders relevant sind. Im Konkreten wurden im Rahmen dieser Studie öko-bilanzielle Datensätze für Bildschirm-Modul und Integrierte Schaltungen (ICs) der Notebooks erstellt und in die öffentlich zugängliche UBA-Datenbank ProBas eingestellt. Die folgende Tabelle 1 gibt einen Überblick über die in ProBas veröffentlichten Datensätze:

Tabelle 1 Überblick über die in ProBas veröffentlichten Datensätze

Nr.	Datensatz Name in ProBas	Bezugsgröße	Anmerkung
1.	Bildschirm-Modul-Herstellung	1 Stück TFT-LCD Modul	Mit Vorketten
2.	Silizium-Wafer-Herstellung	1 cm ² polierter Silizium-Wafer	Zum Teil mit Vorketten. Die Vorketten von Chlorwasserstoff, Graphit und elektrischer Energie sind nicht eingeschlossen (Beschreibung s. 6.3.1).
3.	IC-Fertigung Front-End-Prozess\“Wafer Out\”	1 cm ² fertiger Wafer Out	Ohne Vorkette. Allerdings werden die zusätzlichen Aufwandfaktoren für die Herstellung der hochreinen Prozesschemikalien beschrieben.
4.	IC-Fertigung Front-End-Prozess\“good die out\”	1 cm ² fehlerfreie Chips Out	Ohne Vorkette. Allerdings werden die zusätzlichen Aufwandfaktoren für die Herstellung der hochreinen Prozesschemikalien beschrieben.
5.	IC-Fertigung Back-End-Prozess	1 Stück Speicherchip	Ohne Vorkette

Die oben genannten Datensätze umfassen zwischen 21% (Prakash et al. 2011) und 43% (O’Connell und Stutz 2010) der Treibhausgasemissionen eines Notebooks. Es gibt noch weitere Komponenten bzw. Baugruppen, z.B. die komplett bestückte Hauptplatine (Motherboard) und das Batteriesystem (Akku), die einen erheblichen Anteil an den Gesamtumweltauswirkungen eines Notebooks haben. Diese konnten aufgrund des begrenzten Forschungsbudgets in der vorliegenden Studie nicht berücksichtigt werden.

Bei der Datenerhebung und -aufbereitung der oben genannten Datensätze wurden wichtige Erkenntnisse gewonnen, die im Rahmen dieser Studie nicht verfolgt werden konnten, jedoch einen weiteren, interessanten Forschungsbedarf darstellen. Einige Beispiele sind:

- Erstellung eines Datensatzes für Bildschirm-Modul mit LED-Hintergrundbeleuchtung;
- Erfassung der Fab-Generation und damit der Größe des Mutterglases für Bildschirm-Modul;
- Parametrisierung bzw. Skalierbarkeit der Lebenszyklusdaten, entweder auf der Ebene der Sachbilanzdaten und/oder auf der Ebene der Wirkungskategorien, innerhalb von zwei oder mehr Bildschirmgenerationen;
- Erhebung und Aktualisierung der Daten für neue Technologien, wie zum Beispiel für berührungsempfindliche oder 3-D Bildschirmen;
- Nähere Betrachtung der Prozesse bezüglich der Nachbehandlung der fluorierten-Gase;

- Untersuchung des Verhältnisses zwischen Produktionsaufwand und technologischen Parametern wie Masken- und Metallisierungsschritten, Ausbeute und Strukturbreite der integrierten Schaltungen;
- Entwicklung einer einheitlichen Bezugsgröße für die Chip-Herstellung;
- Verbesserung der Datenlage zu Verbrauchsmengen von Wasser und Chemikalien, insbesondere bei Back-End Prozessen;
- Ermittlung des Produktionsaufwandes der hochreinen Chemikalien sowie der Stoffverluste;
- Untersuchung des Produktions- und Materialaufwandes für unterschiedliche IC-Typen;
- Aktualisierung der Produktionsdaten zur Herstellung des Silizium-Wafers.

Mit dieser Studie soll ein Beitrag für die Verbesserung der Datenlage der IKT-Produkte geleistet werden, damit in der Zukunft Ressourcenschonungspotenziale im Aktionsfeld IKT zuverlässig ermittelt werden können. Außerdem sollen diese Ergebnisse als Referenzpunkt für die weiteren ökobilanziellen Berechnungen zu IKT-Produkten dienen und helfen, eine gewisse Vergleichbarkeit und Transparenz in den Ökobilanzergebnissen zu IKT-Produkten zu gewährleisten.

1 Vorbemerkung

Die Informations- und Kommunikationstechnik (IKT) bildet die technische Grundlage für die heutige Informations- und Wissensgesellschaft. Sie schafft ein dynamisches Innovationsfeld und trägt maßgeblich zur wirtschaftlichen Entwicklung bei. Außerdem kann die IKT in vielen wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Bereichen einen wichtigen Beitrag zum Klimaschutz leisten. Die in der Fachliteratur und den Expertenkreisen meist zitierten Potenzialabschätzungen gehen davon aus, dass sich durch die intelligente Nutzung von IKT-Lösungen¹ weltweit im Jahr 2020 Emissionen von rund 7,8 Mrd. t CO₂e vermieden werden könnten. Das entspräche rund 15% der für 2020 angenommenen weltweiten Emissionen in Höhe von 51,9 Mrd. t CO₂e (Climate Group 2008). Neben diesen Umweltentlastungspotenzialen war aber die IKT weltweit im Jahr 2007 für den Ausstoß von 830 Mio. t CO₂e verantwortlich (Climate Group 2008)². Es wird erwartet, dass diese Emissionen im Jahr 2020 auf 1,4 Milliarden Tonnen CO₂e steigen werden (Climate Group 2008). Damit wären die Umweltbelastungen der IKT im Verhältnis zu den oben genannten Entlastungspotenzialen deutlich geringer. Dabei müssen allerdings drei Aspekte berücksichtigt werden:

- Geräte der Unterhaltungselektronik, wie Fernseher, Media Receivers, DVD/ Blu-ray Geräte, HiFi-Anlagen usw., wurden zur Berechnung der globalen IKT-Emissionen nicht berücksichtigt. Aufgrund des aktuellen Trends zur Konvergenz und Digitalisierung ist zu vermuten, dass es in der Zukunft eine stärkere Verschmelzung von Funktionen zwischen klassischen IKT-Geräten wie Computer, Telefon und W-LAN Router und den Geräten der Unterhaltungselektronik geben wird. Der Digitalisierungsprozess wird außerdem einen erheblichen Anstieg der Datenmenge und des Datenverkehrs im Netz verursachen und somit zu einem weiteren Anstieg des Stromverbrauchs führen.³
- Kennzeichnend für die derzeitige Debatte über die Umweltbelastung durch IKT ist der starke Fokus auf die Nutzungsphase der Geräte und Infrastrukturen. Gründe für diese Schwerpunktsetzung liegen in dem aktuellen Diskurs um den Klimawandel und die deutlich steigenden Energiekosten (UBA 2009). Dabei gerät aber die Berücksichtigung der Umweltauswirkungen, die während der Produktionsphase verursacht werden, oft in den Hintergrund. Dies ist einerseits auf die fehlenden ökonomischen Anreize – im

¹ Beispiele: Intelligente Steuerung von Stromnetzen und Gebäuden, Vermeidung von Verkehr durch Telefon- und Videokonferenzsysteme, Substitution physischer durch digitale Güter (E-Mails, Fotos usw.) (UBA 2009).

² In dieser Studie beinhaltet IKT Computer, Telekommunikationsnetzwerke und Geräte, Drucker und Rechenzentren. Andere Studien schätzen weltweite Emissionen von rund 2,1 Mrd. t, die nur durch den Stromverbrauch von IKT-Geräten und Infrastrukturen in der Nutzungsphase verursacht werden (Climate Group 2008).

³ Stobbe et al. (2009): Abschätzung des Strombedarfs Energiebedarfs der weiteren Entwicklung der Informationsgesellschaft; Fraunhofer-Studie im Auftrag des BMWi; im Internet:
<http://www.bmwi.de/Dateien/BMWi/PDF/abschaetzung-des-energiebedarfs-der-weiteren-entwicklung-der-informationsgesellschaft.property=pdf.bereich=bmwi.sprache=de.rwb=true.pdf>

Gegensatz zu den Preissignalen bei der Nutzung der IKT – und andererseits auf die mangelnde Datenverfügbarkeit zu den Herstellungsprozessen zurückzuführen. Beispielsweise besagt eine Studie des Öko-Instituts, dass bei einer Nutzung von 4 Stunden pro Tag über vier Jahre im Privatbereich etwa 40 Prozent der Umweltbelastungen eines Computers auf seine Herstellung und rund 60 Prozent 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).

- IKT-Geräte enthalten eine Vielzahl von bedeutenden Metallen wie Gold, Silber, Platingruppenmetalle, Indium, Tantal, Gallium usw. Ein Mobiltelefon kann beispielsweise aus 43 verschiedenen Metallen bestehen (Abbildung 1).

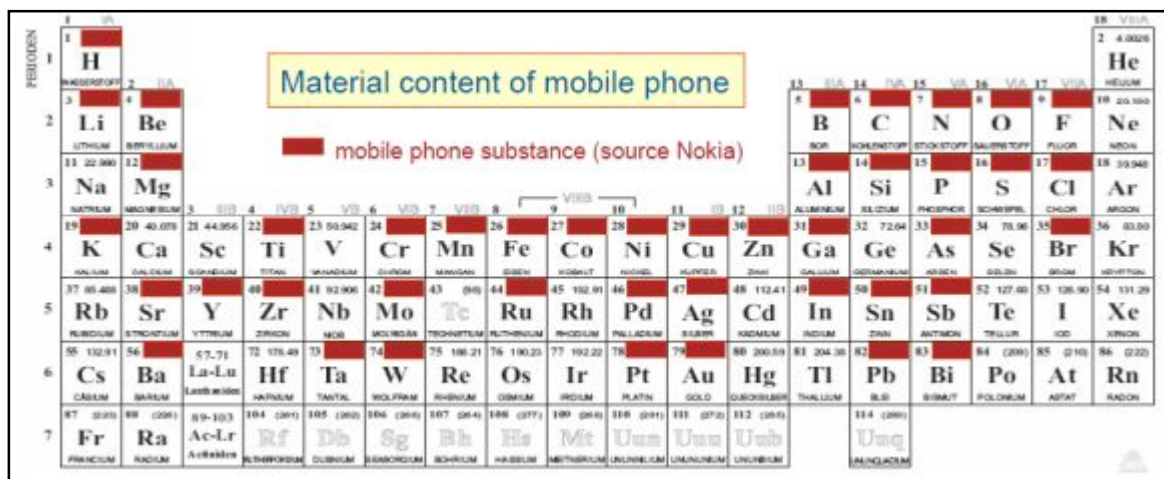


Abbildung 1 Metalle in einem Mobiltelefon
(Quelle: Hagelüken und Buchert 2008)

In einem Mobiltelefon sind zwar sehr geringe Mengen von diesen Metallen enthalten,⁴ berücksichtigt man aber die Anzahl von rund 1 Milliarde weltweit verkaufter Mobiltelefongeräte im Jahre 2006, bedeutet dies einen Verbrauch von 250 t Silber, 24 t Gold, 9 t Palladium, 9.000 t Kupfer und 3.800 t Kobalt allein in Mobiltelefonen (Hagelüken und Buchert 2008). Für PCs und Notebooks liegt nach Schätzungen der Verbrauch bei 225 t Silber, 50 t Gold, 18 t Palladium, 113.000 t Kupfer und 4.900 t Kobalt (Hagelüken und Buchert 2008). Zusätzlich haben auch die Vielfalt und der Reinheitsgrad der benötigten Elemente mit der Leistungssteigerung in der Mikroelektronik stark zugenommen. So ist z.B. die Anzahl der für die Herstellung eines Computerchips benötigten Elemente von ca. 11 im Jahre 1980 auf

⁴ Etwa 250 mg Silber, 24 mg Gold, 9 mg Palladium, 9 g Kupfer und 3,8 mg Kobalt (Hagelüken 2008).

über 45 Elemente gestiegen – dabei handelt es sich in der Mehrzahl um so genannte seltene Metalle⁵ (UBA 2009; Graedel 2008).

Die Gewinnung und Verarbeitung dieser Metalle ist mit erheblichem Materialaufwand, Flächen- und Energieverbrauch sowie hohen Umweltauswirkungen verbunden. Beispielsweise ist der Abbau von Gold und Silber an vielen Orten der Welt mit hohen ökologischen und sozialen Kosten verbunden. Der großskalige Abraum von Gestein, die energieintensive Zerkleinerung, die Laugung mit Zyanid sowie die Amalgamierung mit Quecksilber sind nur einige typische Ursachen für weitreichende Auswirkungen auf Mensch und Umwelt. Die Förderung von einer Tonne Gold verursacht Emissionen von ca. 18.000 t CO₂e und benötigt einen kumulierten Rohstoffaufwand⁶ von knapp 740.000 t (IFEU 2011). Prakash und Manhart (2010) ermittelten, dass die Primärgewinnung von Gold, Silber, Palladium, Kupfer und Eisen für den Einsatz in einem einzigen Desktop-PC Emissionen von rund 23 kg CO₂e verursacht. Nicht zuletzt führen unsachgemäße Rückgewinnungsverfahren für diese Metalle zu erheblichen negativen Auswirkungen auf Mensch und Umwelt, wie zum Beispiel durch die Verwendung von Quecksilber zur Rückgewinnung von Gold aus Elektronikschrott (Prakash & Manhart 2010, UBA 2009; MakeITfair 2007; Behrendt et al. 2008; Walle und Jennings 2001).

Die drei oben genannten Punkte sind ein deutlicher Beleg dafür, dass die IKT-bedingten Umweltbelastungen viel höher sind als bisher vermutet. Deswegen ist für eine umfassende Betrachtung der Umweltauswirkungen der IKT eine Ausweitung der Betrachtung auf die Aspekte des Materialverbrauchs und der Umweltinanspruchnahme in den vor- und nachgelagerten Produktionslebensphasen notwendig. Ein wichtiger Schritt für die Ermittlung von und Einflussnahme auf Optimierungspotentiale hinsichtlich der Nutzung natürlicher Ressourcen und der Reduzierung der Gesamtweltauswirkungen ist die Kenntnis über die Stoff- und Energieströme sowie über den Ressourcenverbrauch entlang der globalisierten Herstellungsketten der IKT-Produkte. Allerdings ist die derzeitige Informations- und Datenlage zu den Herstellungsketten, den beteiligten Akteuren und den Stoff- und Energieströmen sowie zum Material- und Ressourcenverbrauch der IKT-Produkte unbefriedigend. Hinzu kommt, dass die bestehenden Datengrundlagen zur Herstellung der IKT-Produkte selten miteinander vergleichbar sind, so dass sich keine richtungssicheren Handlungsoptionen im Hinblick auf eine Reduzierung der Umweltauswirkungen und des Ressourcenverbrauchs ableiten lassen. Neben der mangelnden Datenverfügbarkeit sind extrem kurze Produktlebenszyklen der IKT-Geräte und die hohe Innovationsgeschwindigkeit

⁵ Der Begriff der seltenen Metalle, auch kritische Metalle genannt, ist chemisch nicht definiert. Zahlreiche Studien (Buchert et al. 2009; Behrendt et al. 2007) definieren dafür folgende Kriterien: (1) Geringe Reichweite der Reserven; (2) Metalle, die in wenigen Ländern abgebaut oder produziert werden; (3) Dissipative Anwendung; (4) Geringe Rezyklierbarkeit; (5) Erhöhte Nachfrage; (6) Hohes Versorgungsrisiko (bedingt durch geologische, politische, ökonomische und soziale Effekte); (7) Hohe oder stark gestiegene Preise.

⁶ Kumulierter Rohstoffaufwand setzt sich aus dem Aufwand für die Energie- und Metallrohstoffe, Steine und Erden sowie sonstigen mineralischen Rohstoffe.

der Branche weitere Aspekte, die eine regelmäßige Aktualisierung der Datensätze notwendig machen. Die vorhandenen Daten zur Erstellung von Ökobilanzen im Bereich der IKT-Produkte bedürfen aufgrund der hohen Technologiedynamik bei Produkten und Fertigungsprozessen einer stetigen Überprüfung und Erneuerung. Derzeit verfügbare Datensätze können nur bedingt auf moderne Produkte angewendet werden, da sie nicht mehr den heute realisierten Stand der Technik abbilden.

Vor diesem Hintergrund hat das Umweltbundesamt im Rahmen des UFOPLAN 2009⁷ das Öko-Institut e.V. und das IZM Fraunhofer-Institut für Zuverlässigkeit und Mikrointegration, Berlin beauftragt, in einem Teilvorhaben „Schaffung einer Datenbasis zur Ermittlung ökologischer Wirkungen der Produkte der Informations- und Kommunikationstechnik (IKT)“ die Datengrundlage im Bereich IKT zu verbessern und somit eine Grundlage für die Ermittlung der Ressourceneinsparpotentiale im Aktionsfeld IKT zu schaffen.

2 Ziel der Studie

Das übergeordnete Ziel der Studie „Schaffung einer Datenbasis zur Ermittlung ökologischer Wirkungen der Produkte der Informations- und Kommunikationstechnik (IKT)“ ist es, einen Beitrag zur Verbesserung der Datengrundlage zur Ermittlung der Ressourcenschonungspotenziale im Bereich IKT zu leisten.

Im Konkreten adressiert die Studie die Notebook-Komponente Bildschirm-Modul und Integrierte Schaltungen (ICs) (siehe Kapitel 3 für die Begründung). Im Rahmen dieser Studie werden ökobilanzielle Datensätze für Bildschirm-Module und Integrierte Schaltungen (ICs) der Notebooks erstellt und in die öffentlich zugängliche UBA-Datenbank ProBas⁸ eingestellt.

3 Festlegung des Untersuchungsgegenstandes

Aufgrund der Komplexität und der Vielfalt der IKT wurde der Untersuchungsrahmen dieser Studie auf die Produktgruppe Notebooks beschränkt. Diese Auswahl geschah aufgrund der steigenden Marktrelevanz der Notebooks. Des Weiteren werden aufgrund der energieeffizienten Eigenschaften eines Notebooks in der öffentlichen Wahrnehmung diese positiven ökologischen Eigenschaften auf das gesamte Gerät übertragen, ohne nach Herstellungsaufwand, Nutzungsphase und Entsorgung des Gerätes zu differenzieren.

⁷ Ressourcenschonung im Aktionsfeld Informations- und Kommunikationstechnik (IKT), FKZ 3709 95 308

⁸ 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.

Außerdem lässt sich am Beispiel der Notebooks zeigen, wie unterschiedlich derzeit verfügbare Ökobilanzergebnisse ausfallen, weshalb die derzeitigen verfügbaren Ökobilanzen nicht als fundierte Grundlagen für produktpolitische Entscheidungen herangezogen werden dürfen, sondern einer Validierung hinsichtlich Aktualität der Daten und methodischer Genauigkeit unterzogen werden müssen.

3.1 Marktrelevanz Notebooks

Rund um den Globus dürften inzwischen gut 500 Millionen Notebooks im Einsatz sein⁹. Nach Einschätzung der Marktforscher Gartner Inc. wurden im ersten Quartal 2010 weltweit 49,4 Millionen Notebooks verkauft – 43,4 Prozent mehr als noch im gleichen Zeitraum 2009.⁹ In Deutschland wurde der PC-Markt auch durch den steigenden Absatz von Notebooks angetrieben, der im Jahr 2009 um 12,5 Prozent auf 8,7 Millionen Stück gestiegen ist. Im Jahr 2009 hatten die tragbaren Computer laut BITKOM einen Anteil von ca. 66% am Gesamtverkauf der PCs in Deutschland (Abbildung 2).

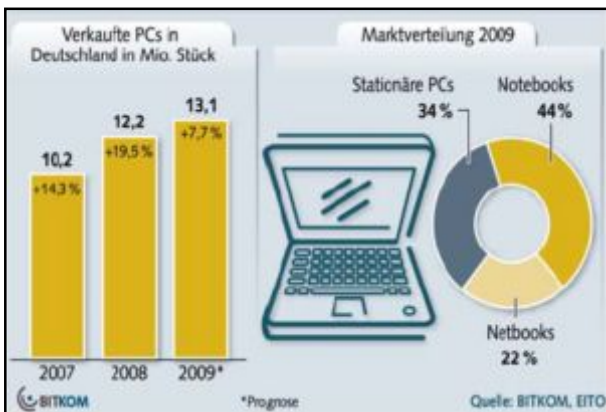


Abbildung 2 Verkaufte PCs in Deutschland (in Mio. Stück).¹⁰

Nach den Statistiken des Consumer Electronics Marktindex Deutschland (CEMIX) wurden im ersten Quartal 2010 in Deutschland ca. 2,23 Millionen PCs verkauft, was ein Zuwachs von knapp 17 Prozent im Vergleich zum selben Zeitraum im Jahr 2009 bedeutet. Der Anteil der Notebooks am Gesamtverkauf der PCs betrug ca. 81% im ersten Quartal 2010 (gfu, BVT, GfK R&T 2010). Die Zahlen des Statistischen Bundesamtes Deutschland belegen, dass etwa 40 Prozent aller Privathaushalte über mindestens einen Notebook verfügen.¹¹ Vor vier Jahren waren Notebooks nur in 17 Prozent der Haushalte vorhanden. Was den Ausstat-

⁹ Quelle: <http://www.heise.de/newsticker/meldung/Marktforscher-Rekordwachstum-auf-globalem-Notebook-Markt-1007390.html>

¹⁰ Quelle: BITKOM 2009

¹¹ Anzahl der Haushalte, in denen entsprechende Gebrauchsgüter vorhanden sind, bezogen auf die hochgerechnete Anzahl von Haushalten der jeweiligen Spalte (Ausstattungsgrad je 100 Haushalte).

tungsbestand der privaten Haushalte in Deutschland angeht, also die Anzahl der in den Haushalten vorhandenen Gebrauchsgüter, sind pro 100 Haushalte etwa 47,4 Notebooks vorhanden¹² (www.destatis.de). Geht man von ca. 40 Millionen Haushalten in Deutschland aus, beträgt der Bestand der tragbaren Computer 2009/2010 ca. 19 Millionen Geräte in den Privathaushalten in Deutschland. Berücksichtigt man den Bestand der tragbaren Computer auch im Businessbereich, sind das ca. 47 Millionen Geräte deutschlandweit (Prakash et al. 2010).

Die steigende Marktrelevanz der Notebooks ist auf verschiedene Faktoren zurückzuführen. Prakash et al. 2010 liefern eine Zusammenstellung von möglichen Ursachen für den Erfolg der Notebooks:

- **Mobilität / mobile Nutzung:** Die Geräte sind klein und kompakt dimensioniert, damit sie leicht transportiert und auch unter beengten Verhältnissen genutzt werden können. Außerdem ermöglichen Notebooks durch lange Akkulaufzeiten (einige Produkte können bis zu neun Stunden Akkulaufzeit vorweisen), dass auch unterwegs ohne Stromanschluss gearbeitet werden kann.
- **Sinkende Preise:** Der Durchschnittspreis für Notebooks in Deutschland ist im zweiten Quartal 2010 auf ca. 565 € gesunken. Damit bewegen sich die Notebooks mehr oder weniger in derselben Preisklasse wie Desktop-PCs. Im selben Zeitraum lag der Durchschnittspreis eines Desktop-PCs mit 654 € sogar höher (gfu, BVT, GfK R&T 2010). Tragbare Kleincomputer, auch Netbooks genannt, liegen sogar im noch tieferen Preissegment und sind für weniger als 300 € erhältlich.
- **Rechenleistung:** Notebooks sind mittlerweile gleichwertig zu Desktop-PCs, was Prozessorleistung, Grafikkarte, Bildschirmauflösung und Transferraten der Festplatten betrifft.
- **Geringer Energieverbrauch und geringe Geräuschemissionen:** Notebooks sind im Vergleich zu Desktop-PCs mit vergleichbarer Ausstattung deutlich energieeffizienter und häufig auch leiser.
- **Online sein:** Notebooks bieten – einen WLAN-Zugang vorausgesetzt – den Vorteil, jederzeit und überall online sein zu können und damit rund um die Uhr private und geschäftliche E-Mails zu bearbeiten oder aktuelle Themen und Nachrichten im Internet recherchieren zu können.

3.2 Auswertung verfügbarer Ökobilanz- und PCF-Studien zu Notebooks

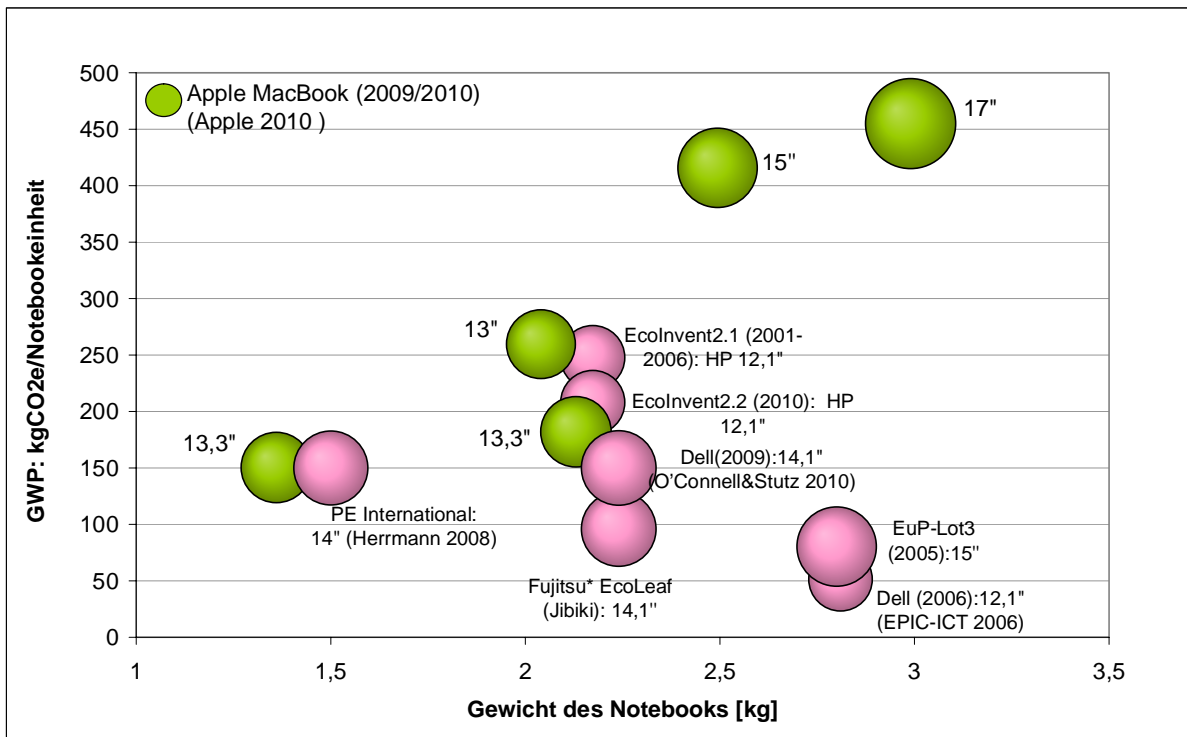
Anhand existierender Ökobilanz- und PCF-Studien zu Notebooks wird in diesem Abschnitt zunächst die aktuelle Datenlage dokumentiert und die Problematik der Vergleichbarkeit

¹² Quelle: www.destatis.de; Stand November 2010

unterschiedlicher Bewertungsergebnisse aufgrund unterschiedlicher Datengrundlage diskutiert. Die folgende Auswertung soll verdeutlichen, dass die Frage „Welche Faktoren und Komponenten die Umweltauswirkungen der Notebooks maßgeblich beeinflussen“ immer noch nicht zufriedenstellend beantwortet werden kann.

In Abbildung 3 *Da keine Angaben zum Gewicht des Fujitsu EcoLeaf Notebooks vorhanden waren, wurde das Gewicht von dem Dell-Notebook mit gleicher Displaygröße von 14,1" abgeleitet.

Abbildung 3 sind die veröffentlichten Werte für die Treibhausgasemissionen (CO₂e) in der Herstellungsphase verschiedener Notebooks zusammengefasst. In diesem Bericht wird der Begriff Treibhausgasemissionen (CO₂e) durch die Abkürzung GWP repräsentiert, was im Englischen für „Global Warming Potential“ steht.



*Da keine Angaben zum Gewicht des Fujitsu EcoLeaf Notebooks vorhanden waren, wurde das Gewicht von dem Dell-Notebook mit gleicher Displaygröße von 14,1" abgeleitet.

Abbildung 3 Treibhauspotenzial (GWP) in CO₂e in der Herstellungsphase ausgewählter Notebooks

In Abbildung 3 repräsentiert die X-Achse das Gewicht der Notebooks, die Y-Achse die GWP-Werte. Die Größe der Kugeln steht für die Displaygröße. Die Daten sind aus öffentlichen Quellen und der EcoInvent Datenbank entnommen worden. Die grünfarbigen Kugeln stellen die Ergebnisse der Apple MacBook Serie aus den Jahren 2009 und 2010 dar (Apple Environmental Report 2010). Die Ergebnisse der Apple MacBook Serie belegen, dass die GWP-Werte generell mit zunehmendem Gewicht und zunehmender Displaygröße ansteigen.

Möglicherweise hat die Firma Apple ihre Produkte auf der Basis derselben Datengrundlage und Methode bilanziert und nach entsprechender Displaygröße die Daten interpoliert. Nichtsdestotrotz ist eine Abweichung bei einem Notebook mit Displaygröße 13,3" sichtbar. Dieses Notebook weist einen geringeren GWP-Wert auf als ein 13" Apple-Notebook mit vergleichbarem Gewicht (ca. 2 kg). Wie Abbildung 3 entnommen werden kann, variiert der GWP-Wert der Apple MacBook Serie zwischen 150 und 455 kg CO₂e.

Betrachtet man das Ergebnis der EuP-Vorstudie zu Computern¹³, ist das untersuchte Notebook (15") vom Gewicht her am schwersten (2,8 kg)¹⁴, weist aber trotzdem den geringsten GWP-Wert von 80 kg CO₂e auf. Obwohl der Untersuchungsgegenstand der EuP-Vorstudie eher ein generisches Notebook gewesen ist, zeigt der Vergleich mit anderen in Abbildung 3 dargestellten Bewertungen, dass der Herstellungsaufwand eines Notebooks in der EuP-Vorstudie deutlich unterrepräsentiert ist.

Den niedrigsten GWP-Wert (51 kg CO₂e) weist das 12,1" Notebook der Firma Dell auf, obwohl es vom Gewicht her zu den schwersten Notebooks (2,8 kg) gehört. Auf der anderen Seite schneidet das leichtere 2,2 kg Notebook der Firma Dell (mit 14,1") deutlich schlechter ab als das 2,8 kg Notebook (mit 12,1") derselben Firma. Das 2,2 kg (mit 14,1") Notebook ist für die Emissionen von ca. 150 kg CO₂e verantwortlich, was dreimal höher ist als die Emissionen des 2,8 kg Notebooks (mit 12,1"). Allerdings vergleicht man die untersuchten Notebooks in den Studien Hermann (2008) und O'Connell & Stutz (2010), weisen beide Notebooks, die ähnliche Bildschirmgröße, aber unterschiedliche Gewichte haben, ähnliche GWP-Werte auf. Dieses Ergebnis könnte die Vermutung untermauern, dass sich die unterschiedlichen Displaygrößen in der Umweltbilanz eine signifikante Rolle spielen.

Das von EcoLeaf zertifizierte Notebook der Firma Fujitsu (Jibiki) mit einem angenommenen Gewicht von 2,2 kg¹⁵ und einer Displaygröße von 14,1" hat einen GWP-Wert von knapp 100 kg CO₂e. Weiterhin kann aus den Berechnungen auf der Basis der Datengrundlagen von Ecoinvent Version 2.1 und 2.2 entnommen werden, dass die GWP-Werte der Herstellungsphase beider Varianten in ähnlicher Größenordnung von 200–250 kg CO₂e liegen.

Die in der Abbildung 3 vorgenommene Gegenüberstellung verdeutlicht, dass sich die GWP-Werte der Notebooks weder über das Gewicht noch über die Bildschirmgröße grundsätzlich skalieren lassen. Die große Spannweite der GWP-Werte zwischen 50 und 450 kg CO₂e lässt

¹³ 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)

¹⁴ Mit Verpackung wiegt das Notebook aus der Vorstudie zu EuP Los 3 3,7 kg, ohne Verpackung 2,8 kg. Der GWP-Wert der Herstellungsphase des Notebooks in der Vorstudie zu EuP Los 3 beträgt insgesamt 81 kg. Zieht man den GWP-Wert des Pappkartons (Karton wiegt 921 g) ab, erhält man einen GWP-Wert von ca. 80 kg CO₂e für das Notebook (ohne Verpackung).

¹⁵ Da keine Angaben zum Gewicht des Fujitsu-Notebooks vorhanden waren, wurde das Gewicht vom 2,2 kg aus dem Dell-Notebook mit gleicher Displaygröße von 14,1" abgeleitet.

sich deswegen nicht ohne Weiteres erklären. Die notwendigen Dokumentationen zu den jeweiligen Ökobilanzstudien sind öffentlich nicht zugänglich. Somit ist eine Interpretation der Ergebnisse nur bedingt möglich. Es ist daher nur zu vermuten, dass die großen Unterschiede in den GWP-Werten sowohl auf unterschiedliche Produktkonfigurationen, Fertigungsgenerationen und andere Annahmen bzw. Fertigungsverfahren zurückzuführen sind. Mit großer Wahrscheinlichkeit spielen aber unterschiedliche Datengrundlagen sowie unterschiedliche methodische Festlegungen, wie z.B. die Definition der Systemgrenzen, eine ebenso entscheidende Rolle.

Aus diesen Gründen ist es unerlässlich, transparente Datengrundlagen sowie methodische Festlegungen zu schaffen, um einerseits die Vergleichbarkeit zwischen unterschiedlichen ökobilanziellen Bewertungen der Notebooks vorzunehmen, andererseits die tatsächlichen Umweltauswirkungen der Herstellung der Notebooks zu ermitteln.

3.3 Komponentenauswahl

Ein Notebook ist ein komplexes Produkt und besteht aus ca. 1.800 Einzelkomponenten. Diese Komponenten werden nicht durch einen OEM (Original Equipment Manufacturer) gefertigt, sondern durch eine breite und global verteilte Zulieferkette bereitgestellt. Die Erhebung vollständiger komponentenbezogener Lebenszyklusdaten bzw. aller Input- und Outputprozesse entlang der gesamten Wertschöpfungskette eines Notebooks ist daher mit einem erheblichen Kosten- und Zeitaufwand verbunden. Aufgrund des begrenzten Forschungsbudgets wurde im Rahmen dieses Projekts eine Fokussierung auf die aus Umweltgesichtspunkten besonders relevanten Komponenten eines Notebooks und auf den Umweltwirkungsindikator CO₂-Äquivalente, der die mittlere Erwärmungswirkung beschreibt (engl.: *Global Warming Potential*), vorgenommen. Mit dieser Eingrenzung wird gewährleistet, dass die Daten in definierter Qualität erhoben und beschrieben werden können. Des Weiteren konzentrierte sich die Arbeit auf eine methodisch sinnvolle Erstellung der Sachbilanz der ausgewählten Komponenten, unter Berücksichtigung bestehenden Expertenwissens sowohl zu technischen als auch umweltbezogenen Aspekten. Nicht zuletzt soll mit der vorliegenden Untersuchung auch das Verständnis darüber geschärft werden, wo generische Datensätze ggf. ausreichen bzw. umgekehrt, wo spezifische Datensätze unbedingt nötig sind, um die Notebooks adäquat, das heißt auch unter Berücksichtigung der kurzen Produktentwicklungszyklen, abbilden zu können.

Der vermutete große Anteil an der Gesamtumweltbelastung der Notebook-Komponenten war das Hauptkriterium für die Auswahl der Komponenten, die für die Erhebung der Lebenszyklusdaten im Rahmen dieses Projektes in Frage kamen. Ein zweites Kriterium für die Auswahl war der Anteil der in den Komponenten enthaltenen seltenen Metalle.

Auf der Basis beider Kriterien, nämlich hohe (allgemeine) Umweltbelastung und hoher Anteil seltener Metalle, hat sich das Projektteam am Anfang des Projektes und in Absprache mit dem Auftraggeber für zwei komplexe Komponenten (Module) zum Zweck einer Lebens-

zyklusdatenerhebung entschieden. Es handelt sich dabei um den Bildschirm (Display) und die Hauptplatine (Motherboard).¹⁶ Die Bedeutung dieser beiden Baugruppen wurde durch ein Screening vorhandener Studien ermittelt. In der Dell-Studie (O’Connell & Stutz 2010) wurde dargestellt, dass das Motherboard mit 48% am stärksten zu den Gesamtreibhausgasemissionen (kg CO₂e) in der Herstellungsphase eines Notebooks beiträgt. An die Motherboards schließen der Bildschirm mit 26%, das Chassis mit 15% und der Akku mit 7% an (vgl. Abbildung 4).

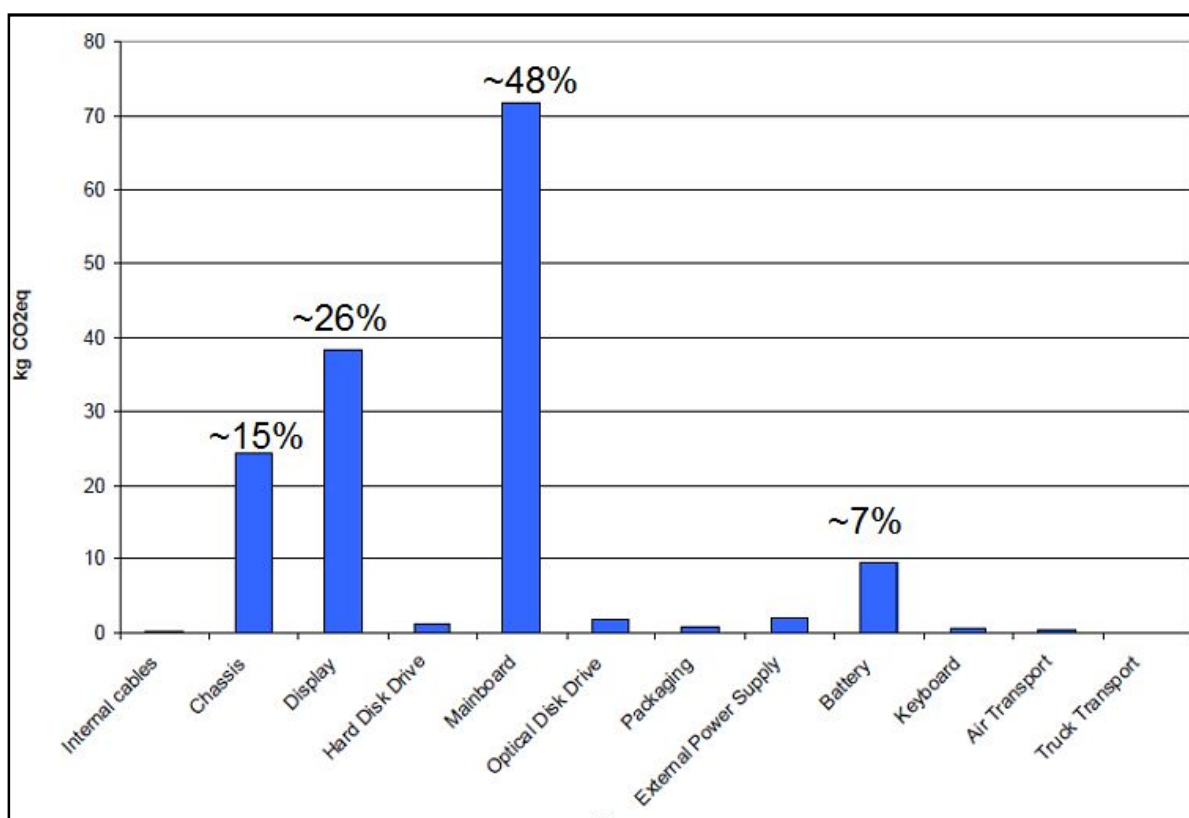


Abbildung 4 Aufteilung der komponentenbezogenen Treibhausgasemissionen (CO₂e) in der Herstellungsphase eines Notebooks der Firma Dell.¹⁷

Wie bereits angedeutet wurde, bestehen der Bildschirm und die Hauptplatine aus vielen Materialien und Subkomponenten. Die bestückte Hauptplatine (Motherboard) besteht aus unterschiedlichen elektronischen Bauteilen wie aktiven Halbleiterbauelementen (Chips) und passiven Bauelementen wie Induktivitäten, Widerständen und Kondensatoren. Hinzu

¹⁶ Obwohl Akkus auch zu großen Umweltauswirkungen beitragen und einen hohen Anteil an seltenen Metallen aufweisen, wurden sie aufgrund der von Experten eingeschätzten extrem schlechten Datenlage und mit dem mit der Erhebung der Primärdaten verbundenen hohen Kosten- und Zeitaufwand in dieser Studie nicht berücksichtigt.

¹⁷ Quelle: O’Connell und Stutz (2010). Prozentzahlen wurden durch das Projektteam abgeschätzt und ergänzt.

kommen das Substratmaterial mit den Leiterbahnen, Stecker und Verbindungskabel. Viele dieser Bauelemente sind weitgehend normiert und unterliegen standardisierten Testverfahren. Hersteller von einzelnen Baugruppen kaufen diese Subkomponenten über Zwischenhändler auf sehr flexiblen und offenen Märkten. Die OEM wissen deshalb in der Regel nicht, wo und wie einzelne Bauteile hergestellt wurden. Schließlich haben auch die unterschiedlichen Technologien der elektronikbezogenen Aufbau- und Verbindungstechnik (AVT) einschließlich der verwendeten Lote einen Einfluss auf die resultierenden Umweltauswirkungen. Daher gestaltet sich die Bilanzierung eines Motherboards entsprechend aufwändig.

Ähnlich wie bei der Auswahl der Notebook-Hauptkomponenten wird auch für das Motherboard eine weitere Auswahl wichtiger Subkomponenten zum Zweck der Lebenszyklusdatenerhebung getroffen. Das Hauptkriterium für die Auswahl war wieder die hohe Umweltbelastung der einzelnen Subkomponenten. Die folgende Abbildung 5 zeigt beispielhaft, welche Subkomponenten eines Motherboards bei der Herstellung wesentlich zu den Gesamttreibhausgasemissionen (GWP) eines Motherboards beitragen.

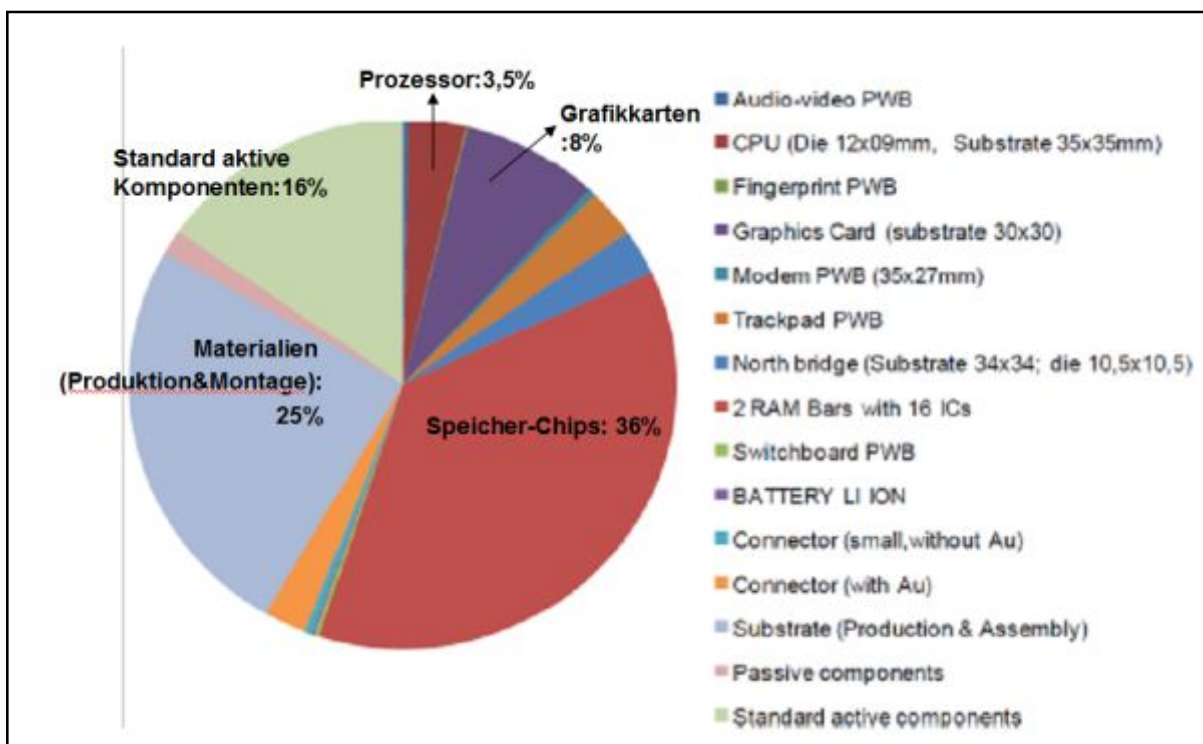


Abbildung 5 Aufteilung der Subkomponentenbezogenen Treibhausgasemissionen (CO₂e) in der Herstellungsphase eines Motherboards eines Notebooks der Firma Dell¹⁸.

Wie Abbildung 5 veranschaulicht tragen Speicherchips (36%), Herstellung und Bestückung des Substrats (25%) und aktive Komponenten (16%) wesentlich zu den Gesamttreibhaus-

¹⁸ Quelle: O’Connell und Stutz (2010). Prozentzahlen wurden durch das Projektteam abgeschätzt und ergänzt.

gasemissionen (CO₂e) bei der Herstellung eines Motherboards bei. Errechnet man den Anteil der Speicherchips an Gesamttreibhausgasemissionen eines ganzen Notebooks (Abbildung 4 und Abbildung 5), käme man noch auf einen Anteil von 17%, was die Relevanz dieser Komponente verdeutlicht.

Aus diesem Grund wurden zum Zweck der Lebenszyklusdatenerhebung im Rahmen dieses Projektes Speicherchips (Memory ICs) ausgewählt.

Mit dieser getroffenen Auswahl wird nach erster Schätzung im Rahmen dieses Projektes durch die Erhebung bzw. Verbesserung der Lebenszyklusdaten von Bildschirm-Modul und Speicherchips ca. 43% der Gesamttreibhausgasemissionen (CO₂e) der Herstellung eines durchschnittlichen Notebooks erfasst.

4 Vorgehensweise

4.1 Erstellung der Sachbilanzdaten

Zur Erstellung der Sachbilanzdaten für Bildschirm-Modul (Display) und Speicherchip (ICs) wurde einerseits auf bestehende und öffentlich verfügbare Publikationen und Datenbanken zurückgegriffen. Andererseits wurde eine Expertenrunde, die aus Vertretern der IKT-Industrie und wissenschaftlichen Organisationen zusammengesetzt war, ins Leben gerufen. Die Aufgabe der Expertenrunde war nicht nur die Bereitstellung der über die Sekundärquellen hinaus verfügbaren Daten, sondern auch die Verifizierung der Qualität, Repräsentativität und Aktualität der erhobenen Daten. Den Mitgliedern der Expertenrunde wurde zunächst ein Fragenkatalog geschickt. Der Rücklauf des Fragenkatalogs und die durch das Projektteam erhobenen Sekundärdaten wurden in zwei Workshops mit den Mitgliedern diskutiert. Im Nachgang der Expertenworkshops wurden die noch offenen Fragen und Datenlücken in Form eines revidierten Fragenkatalogs an die ausgewählten Mitglieder der Expertenrunde (aus den Bereichen Bildschirmproduktion und Herstellung Integrierter Schaltungen) gesendet. Der Rücklauf der Fragebögen sowie die Daten aus Sekundärquellen dienten zur Erstellung der spezifischen Datensätze für Bildschirm-Modul und Speicherchips (Memory ICs).

4.2 Import und Veröffentlichung in ProBas

Die Datensätze zu Bildschirm-Modul und Speicherchips wurden in die ProBas-Datenbank importiert. In diesem Bericht sowie in der ProBas-Datenbank liegen die verwendeten Daten (sofern dies möglich war) sowohl disaggregiert auf Prozessebene als auch aggregiert als Ergebnis-Datensätze vor. Diese sind veröffentlicht unter:

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

Tabelle 2 gibt einen Überblick über die im Rahmen dieser Studie erstellten Datensätze, die anschließend in die öffentlich zugängliche Datenbank ProBas eingestellt werden.

Tabelle 2 Überblick über die in ProBas veröffentlichten Datensätze

Nr.	Datensatz Name in ProBas	Bezugsgröße	Anmerkung
1.	Bildschirm-Modul-Herstellung	1 Stück TFT-LCD Modul	Mit Vorketten
2.	Silizium-Wafer-Herstellung	1 cm ² polierter Silizium-Wafer	Zum Teil mit Vorketten. Die Vorketten von Chlorwasserstoff, Graphit und elektrischer Energie sind nicht eingeschlossen (Beschreibung s. 6.3.1).
3.	IC-Fertigung Front-End-Prozess"\"Wafer Out"	1 cm ² fertiger Wafer Out	Ohne Vorkette. Allerdings werden die zusätzlichen Aufwandfaktoren für die Herstellung der hochreinen Prozesschemikalien beschrieben.
4.	IC-Fertigung Front-End-Prozess"\"good die out"	1 cm ² fehlerfreie Chips Out	Ohne Vorkette. Allerdings werden die zusätzlichen Aufwandfaktoren für die Herstellung der hochreinen Prozesschemikalien beschrieben.
5.	IC-Fertigung Back-End-Prozess	1 Stück Speicherchip	Ohne Vorkette

Die folgende Abbildung 6 stellt die Vorgehensweise vereinfacht in einzelnen Schritten dar:

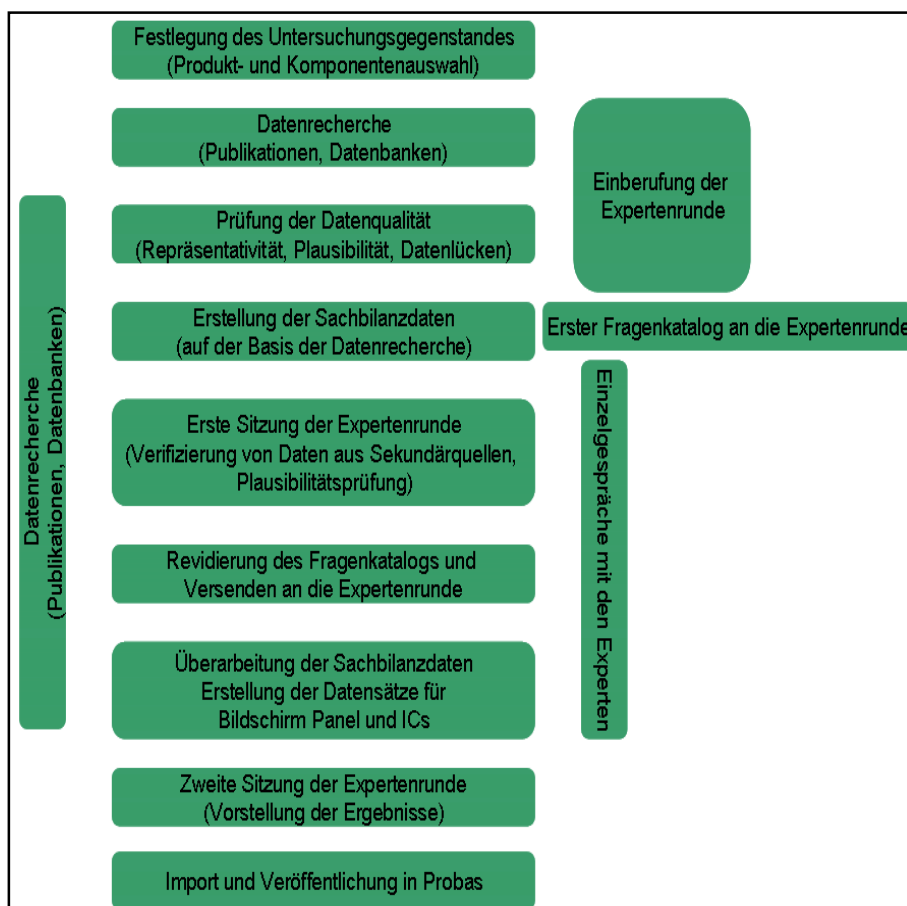


Abbildung 6 Darstellung der Vorgehensweise dieser Studie

5 Ergebnis I: Datensatz für Bildschirm-Modul

5.1 Beschreibung des Produktes

Die Firma Chi Mei Optoelectronics (CMO)¹⁹ hat in 2009 eine Umwelt-Produktdeklaration (EPD, Environment Product Declaration) eines Computerbildschirm-Moduls veröffentlicht (CMO EPD 2010). Unter Bildschirm-Modul wird ein Bildschirm ohne Gehäuse verstanden. Die folgende Abbildung 7 zeigt die Komponenten und den Aufbau eines Bildschirm-Moduls von der Chimei Innolux Website. Die konkret berücksichtigten Bestandteile sind in Kapitel 5.2.2 aufgeführt.

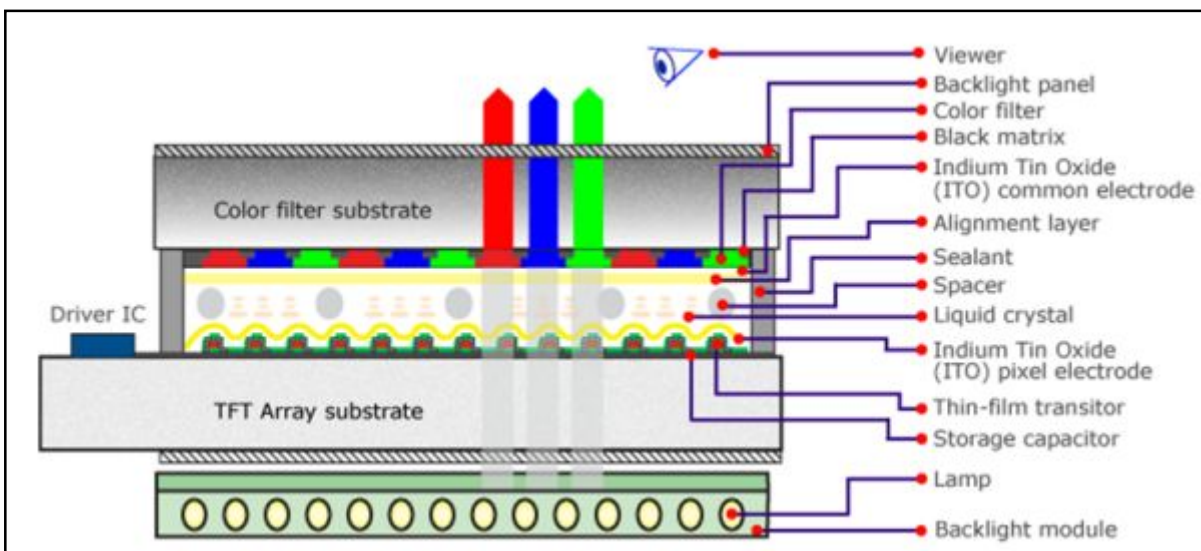


Abbildung 7 Komponente eines Bildschirms²⁰

Die dieser Umwelt-Produktdeklaration zugrundeliegenden Primärdaten wurden in einem Zeitraum zwischen April und August 2007 erhoben. Die Systemgrenze des Datensatzes dieses Bildschirm-Moduls umfasst die Rohstoffentnahme bis zur fertigen Produkteinheit am Werkstor (cradle-to-gate). Das heißt im Datensatz sind die Rohstoffentnahme, die Her-

¹⁹ 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 Flüssigkristallbildschirmen (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).

²⁰ Quelle: Chimei Innolux Website 2011;
http://www.chimei-innolux.com/opencms/cmo/technology/TFT-LCDx_What_is_it/?_locale=en

stellung der Materialien und der Vorprodukte, die Fertigungsprozesse und der Transport der Güter bis zur CMO-Fabrik enthalten.

Die technischen Kennwerte des Bildschirm-Moduls sind in Tabelle 3 zusammengefasst.

Tabelle 3 Technische Kennwerte für den Untersuchungsgegenstand Bildschirm-Modul²¹

Bezugsgröße	1 Stück TFT-LCD Modul
Panel-Größe	15,4 Zoll
Auflösung	1680x1050
Betriebsart	TN (Twisted Nematic)
Pixelabstand	0,1971mm
Aktive Fläche	331,2x207mm
Leuchtdichte	200 cd/m ²
Unterstützte Farben	262K
Gewicht	0,53kg ²²

Der bilanzierte Untersuchungsgegenstand ist ein Flüssigkristallflachbildschirm mit Dünnschichttransistortechnologie (TFT-LCD: TFT = Thin Film Transistor; LCD = Liquid Crystal Displays) der N154 Serie. Die Größe des Moduls beträgt 15,4 Zoll. Das Anzeigemodul basiert auf konventionellen TN-Zellen (Twisted Nematic) und damit auf einer bereits lang etablierten Technologie.²³ Die Hintergrundbeleuchtung funktioniert bei dem gewählten Display auf der Basis von Leuchtstoffröhren (CCFL, Cold Cathode Fluorescent Lamp).²⁴ In Anlehnung an ISO 14040/44 und ISO 14025 sowie Produkt-Deklarationsregel (PCR 2005:6)²⁵ wurde mithilfe dieses Datensatzes eine Umwelt-Produktdeklaration erstellt. Die dafür verwendete Software und Datenbank war die DoITPro LCA Database, die von dem taiwanesischen Forschungsinstitut Industrial Technology Research Institute (ITRI) entwickelt wurde.

²¹ Umwelt-Produktdeklaration der Firma CMO 2010 (CMO EPD 2010).

²² Abweichung von original angegeben Gewicht mit 515 g. Grund s. Kapitel 5.3.1.

²³ Die Twisted Nematic-Zelle bzw. auch nach dem Erfinder Schadt-Helfrich-Zelle benannte Technologie ist ein älterer, aber heutzutage für viele Anwendungen noch gängiger Typ für Flüssigkristall-Anzeigen. Neben diesem Anzeigetyp gibt es für LCDs noch zwei weitere Technologien, das Vertical Aligned (VA) und In-Plane Switching (IPS) Display.

²⁴ CCFL Hintergrundbeleuchtung wird seit geraumer Zeit durch LED-Systeme abgelöst. Die LED-Technik wird grundsätzlich als energieeffizienter beurteilt, ist aber im Vergleich zu konventionellen Leuchtstoffröhren noch eine sehr junge Technologie.

²⁵ Product-Category Rules for preparing an environmental product declaration for TFT-LCD Displays. Die Produkt-Deklarationsregeln stellen die Grundlage für die spätere Umwelt-Produktdeklaration dar.

5.2 Festlegung des Untersuchungsrahmens

5.2.1 Bezugsgröße

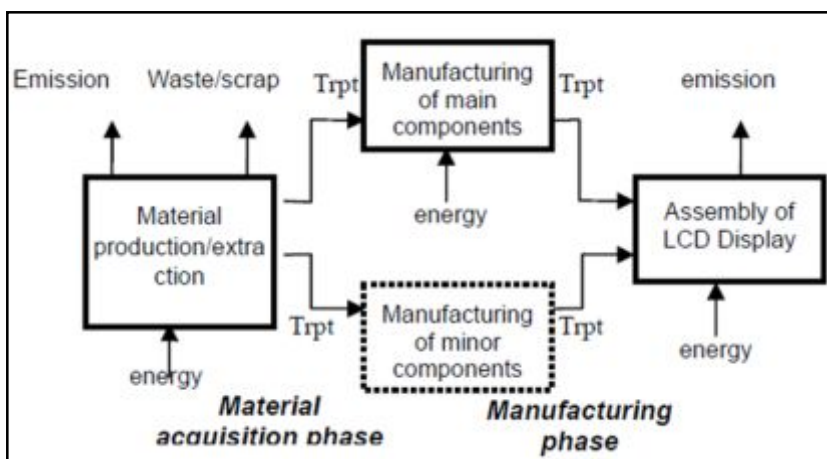
Die Bezugsgröße des Datensatzes für Bildschirm-Module ist ein Stück verbauter Bildschirm mit 15,4 Zoll. Die technischen Parameter können aus der Tabelle 3 entnommen werden.

5.2.2 Festlegung der Systemgrenze

Laut der Umwelt-Produktdeklaration (EPD) der Firma CMO werden folgende Komponenten in der Bilanz des TFT-LCD Moduls berücksichtigt (CMO EPD 2010):

- Dünnschichttransistorenplatte (TFT Board),
- Farbfilterplatte (Colour Filter Board),
- Hintergrundbeleuchtung (CCFL),
- Polarisationsfilter,
- Leiterplatte,
- Rahmen,
- Verpackung.

In der Umwelt-Produktdeklaration der Firma CMO ist die Sachbilanz differenziert nach der Herstellung der Materialien bzw. Komponenten, dem Fertigungsprozess (Energieaufwand und Betriebs-/Hilfsstoffe) und dem Transport dargestellt. Die Systemgrenze (s. Abbildung 8) umfasst laut der Umwelt-Produktdeklaration der Firma CMO „Cradle-to-Gate“. Das heißt, von der Rohstoffentnahme bis zur Fertigerstellung des TFT-LCD Moduls.



* (Trpt=Transport)

Abbildung 8 Betrachtete Prozesse innerhalb der Systemgrenze²⁶

²⁶ Umwelt-Produktdeklaration der Firma CMO 2010 (CMO EPD 2010).

5.2.3 Repräsentativität des Datensatzes

Die Gültigkeit der Umwelt-Produktdeklaration der Firma CMO zum Bildschirm-Modul (TFT-LCD) wird für 2 Jahre angegeben und wird als repräsentativ für die aktuell im Markt befindliche Generation der Notebookbildschirme angesehen. Wichtiger als der zeitbezogene Erfassungsbereich ist allerdings der technologische Gültigkeitsbereich des Datensatzes. In diesem Zusammenhang muss festgestellt werden, dass die Fertigungsgeneration (Fab-Generation) für den vorliegenden Datensatz unbekannt ist. Die Kenntnis der Fab-Generation würde Rückschlüsse auf die Produktivitätseffizienz sowie auf den technologischen Fortschritt zulassen. Nach unserer Einschätzung wird das Bildschirm-Modul der Firma CMO in einer Fertigung hergestellt, die der fünften Fab-Generation zugeordnet werden kann. Mittlerweile werden LCD-Bildschirme bereits in Fertigungswerken der achten bis zehnten Generation gefertigt.²⁷ Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass für die jeweils vorgegebene Bildschirmgröße die bzgl. der Glasausbeute optimale Fab-Generation zum Einsatz kommt.

Daneben muss festgestellt werden, dass die Funktion einer berührungsempfindlichen Bedienung (Touch Screen) nicht berücksichtigt ist.

Die folgende Tabelle 4 fasst die Repräsentativität des Datensatzes für das Bildschirm-Modul zusammen:

Tabelle 4 Repräsentativität des Datensatzes für das Bildschirm-Modul

Komponenten	Datenquelle	Datensätze	Ortsbezug	Zeitbezug
Bildschirm-Modul	EPD der Firma CMO	Herstellung des Bildschirm-Moduls	Taiwan	2007

5.3 Ergebnis und Auswertung des Datensatzes für das Bildschirm-Modul

5.3.1 Erstellung des Datensatzes

Bei der Qualitätsprüfung des Datensatzes der Firma CMO wurde festgestellt, dass die Kupfermenge offenkundig zu gering angesetzt war.²⁸ Dieser Fehler wurde in einem Dialog mit dem für die Erstellung der Umwelt-Produktdeklaration zuständigen taiwanesischen Institut, Industrial Technology Research Institute (ITRI), bestätigt. Allerdings war eine Korrektur der Kupfermenge seitens ITRI nicht mehr möglich. Daher wurde in der vorliegenden Studie die Kupfermenge genauer abgeschätzt. In einer eher konservativen Schätzung wurde die Kupfermenge auf 15 g festgelegt. Dadurch hat sich das Gesamtgewicht des Bildschirm-Panels in der vorliegenden Studie von 515 g, wie ursprünglich in der Umwelt-Produktdeklaration der Firma CMO angegeben, auf 530 g erhöht. Der unter ProBas angebo-

²⁷ http://www.displaysearch.com/cps/rde/xchg/displaysearch/hs.xsl/090916_panel_production_shifting_larger_tft_lcd_fabs_focus_tv_panels_monitor_panel_production_moving_gen_6.asp

²⁸ 0,00000021 kg Kupfererz in der Vorkette.

tene Datensatz²⁹ für die primäre Kupferherstellung wird für die Modellierung der Kupfer-Herstellung zugrunde gelegt. Der Datensatz umfasst die Erzförderung bis zur Erzeugung von Primärkupfer ab Raffinerie. Dieser Datensatz repräsentiert eine Primärkupferherstellung im Zeitraum von 2000–2004. Der geographische Bezug wird durch einen Weltmix repräsentiert. Der für den Import in ProBas erstellte Datensatz für das Bildschirm-Modul wurde aus dem Datensatz der Firma CMO (einschließlich der Vorketten) und dem in ProBas verfügbaren Datensatz zur Kupferherstellung²⁹ zusammengestellt.

In den folgenden Tabellen (Tabelle 5 und Tabelle 6) werden jeweils auf Prozessebene die Materialzusammensetzung des Bildschirm-Moduls sowie das Verpackungsmaterial pro funktionelle Einheit dargestellt:

Tabelle 5 Zusammensetzung nach Materialien und Subkomponenten pro funktionelle Einheit (bezogen auf 1 Stück Bildschirm-Modul ohne Verpackungsmaterial)³⁰

Material Input	Menge	Einheit	Anteil
Metall (Fe)	0,0512	kg	9,7%
Polycarbonat (PC)	0,0165	kg	3,1%
Polyethylenterephthalat (PET)	0,0697	kg	13,2%
Polymethylmethacrylat (PMMA)	0,1331	kg	25,1%
Kabel	0,0014	kg	0,3%
Kautschuk	0,0004	kg	0,1%
Glasfaser	0,0148	kg	2,8%
Lampe	0,0009	kg	0,2%
- davon Quecksilber	0,000007	kg	
Glas (TFT-Glas)	0,2264	kg	42,7%
Kupfer	0,0150	kg	2,8%
ITO-Schicht	0,00005	kg	0,01%
Summe	0,530	kg	100%

Tabelle 6 Verpackungsmaterial (bezogen auf 1 Stück Bildschirm-Modul)³¹

Verpackungsmaterial	Menge	Einheit
Verpackungsmaterial: Kunststoff	0,050	kg
Verpackungsmaterial: Karton/Pappe	0,230	kg
Summe	0,282	kg

²⁹ Quelle: IFEU (IFEU - Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg) 2011

³⁰ Umwelt-Produktdeklaration der Firma CMO 2010 (CMO EPD 2010)

Die folgende Tabelle 7 stellt den Aufwand zur Fertigung des Bildschirm-Moduls dar.

Tabelle 7 Fertigungsaufwand (bezogen auf 1 Stück Bildschirm-Modul)³¹

Fertigungsprozess	Menge	Einheit
Energie ³¹	36,84	MJ
Wasser	185,88	kg
Gas	2,88	kg
Entwicklerlösungsmittel	0,0963	kg
Säure	0,086	kg
Reinigungsmittel	0,0527	kg
Stripper (dient zur Entfernung des Farblacks)	0,167	kg
Kaliumhydroxid	0,000169	kg
N-methylpyrrolidone (NMP)	0,002	kg
Druckluft	0,000956	kg

5.3.2 Ergebnisse des Datensatzes

In der Tabelle 8 sind die Ergebnisse des Datensatzes für "Bildschirm-Modul" zusammengefasst. Der Datensatz enthält die Aufwände für die Vorprozesse- und für den Produktionsprozess (siehe Kapitel 5.2.2). Es muss jedoch eingeschätzt werden, dass die Daten über den Rohstoffinput derzeit nicht abgesichert sind. Aufgrund fehlender Dokumentation und trotz Nachfrage bei der für die Umweltproduktdeklaration (EPD) zuständige Institution, ITRI konnten nicht alle widersprüchlichen Angaben geklärt werden. Beispielsweise geben die Angaben über den Rohstoffeinsatz keinen Hinweis über den prozentualen Anteil der verwendeten Primär- und Sekundärrohstoffe, was eine genaue Einschätzung über das tatsächlich verwendete Inputmaterial erschwert. Hier besteht noch weiterer Forschungsbedarf, um die Angaben zu den Rohstoffinputdaten genauer zu untersuchen.

Die Qualitätssicherung der in Tabelle 8 dargestellten Daten wurde allerdings durch die im Rahmen dieses Vorhabens ins Leben gerufene Expertenrunde durchgeführt. Im Rahmen dieser Qualitätssicherung und durch eigene Prüfungen der Datenqualität kann eingeschätzt werden, dass die Daten über die Emissionen plausibel sind.

³¹ Siehe Kapitel 5.3.2 für Details

Tabelle 8 Gesamte Input- und Outputflüsse für den Datensatz „Bildschirm-Modul“

Ressource	Vorkette	Direkte Produktionsprozesse	Summe	Einheit
Kohle	6,36E+01	4,27E+01	1,06E+02	MJ
Erdöl ³²	1,49E+02	6,32E+00	1,55E+02	MJ
Erdgas	7,14E+01	2,03E+02	2,74E+02	MJ
Uranerz	6,32E+01	4,27E+01	1,06E+02	MJ
Eisen	2,12E-02	-9,02E-03	1,22E-02 ³³	kg
Zinn	5,78E-04	0,00E+00	5,78E-04	kg
Kupfererz	1,92E+00	-1,10E-05	1,92E+00	kg
Kalkstein	4,15E-02	4,20E-02	8,35E-02	kg
Dolomit	3,70E-03	-6,53E-05	3,63E-03	kg
Phosphat	9,12E-04	3,74E-02	3,83E-02	kg
NaCl	2,97E-01	-2,31E+00	-2,01E+00	kg
Bauxit	8,81E-03	4,00E-03	1,28E-02	kg
sonstiges	8,09E+00	6,87E+01 ³⁴	7,68E+01	kg
Holz	4,14E-01	4,68E-01	8,82E-01	kg
Wasser	1,38E+02	4,02E+02	5,40E+02	kg
Quecksilber	7,00E-06	0,00E+00	7,00E-06	kg
Luftemissionen	Vorkette	Direkte Produktionsprozesse	Summe	Einheit
CO ₂	1,48E+01	1,74E+01	3,22E+01	kg
SO _x	1,97E-01	4,53E-02	2,43E-01	kg
NO _x	1,31E-01	1,37E-01	2,68E-01	kg
CH ₄	3,28E-02	1,59E-01	1,92E-01	kg
CO	1,71E-02	1,01E+00	1,03E+00	kg
NM _{VO} C	5,77E-05	7,41E-04	7,99E-04	kg
organische Stoffe	1,43E-03	8,21E-07	1,43E-03	kg
Staub	1,18E-01	-1,09E-03	1,17E-01	kg
Gewässereinleitungen	Vorkette	Direkte Produktionsprozesse	Summe	Einheit
Emissionen				
BSB (biochemischer Sauerstoffbedarf)	4,74E-04	7,39E-03	7,86E-03	kg
CSB (chem. Sauerstoffbedarf)	3,41E-03	1,31E-02	1,65E-02	kg
SS (suspendierte Stoffe)	1,35E-02	2,66E-01	2,80E-01	kg
Abfälle	Vorkette	Direkte Produktionsprozesse	Summe	Einheit
unspezifische Abfälle	4,18E-03	6,23E-06	4,19E-03	kg
Klärschlamm	3,38E-01	5,70E-03	3,44E-01	kg
anorganische Abfälle	9,74E-01	2,53E+00	3,50E+00	kg
gefährliche Abfälle	1,83E+03 ³⁵	5,52E-02	1,83E+03	kg

³² Es ist davon auszugehen, dass die Inputdaten stoffliche und energetische Verwendung des Erdöls umfassen.

³³ Die Umweltproduktdeklaration (EPD) der Firma CMO beschreibt, dass es sich um den Einsatz von recycelten Prozessabfällen handelt. Außerdem soll an dieser Stelle erwähnt werden, dass die Aufwände für Recycling im Datensatz nicht eingerechnet sind.

³⁴ Die Ressource „Sonstiges“ konnte von der für die Umweltproduktdeklaration (EPD) zuständige Institution, ITRI, trotz mehrfacher Nachfrage nicht aufgeschlüsselt werden.

³⁵ Dieser Wert ist unerwartet hoch und konnte nicht mehr von den Autoren der Produktdeklaration (ITRI) verifiziert werden.

5.3.3 Abschätzung der eingesetzten Stoffmengen in Fabs

Ein Problem des Datensatzes der Firma CMO besteht in der knappen Dokumentation. Beispielsweise ist der Polarisationsfilter berücksichtigt worden, aber die Art des Polarisationsfilters bleibt unbekannt. Außerdem sind weitere Informationen, wie die Menge des Flüssigkristalls, des Quecksilbers (in den CCFL) sowie des Indium-Zinn-Oxids (ITO) für die transparente Elektrodenschicht auf dem Glassubstrat, nicht aufgeführt. Laut der Umwelt-Produktdeklaration der Firma CMO sind ITO und Hintergrundbeleuchtung in der Bilanz berücksichtigt worden. Allerdings lassen sich die Informationen zu den eingesetzten Mengen dieser Materialien aus der Umwelt-Produktdeklaration der Firma CMO nicht separat entnehmen. Daher werden im Folgenden diese fehlenden Informationen anhand weiterer Literaturquellen abgeschätzt:

- Flüssigkristall: King County Solid Waste Division (2008) berichtet, dass die Menge von Flüssigkristall in einem LCD-Bildschirm in der Größenordnung von $0,6 \text{ mg pro cm}^2$ (bei einer mittleren Schichtdicke von $6 \text{ }\mu\text{m}$ und einer Dichte des Flüssigkristalls von ca. 1 g/cm^3) sehr klein ist. Das im Rahmen dieser Studie untersuchte Bildschirm-Modul der Firma CMO hat eine aktive Fläche von $331,2 \text{ mm} \times 207,0 \text{ mm}$, das entspricht einer Fläche von $685,58 \text{ cm}^2$. Hochgerechnet enthält das $15,4''$ Bildschirm-Modul ca. $0,4 \text{ g}$ Flüssigkristall ($0,6 \text{ mg/cm}^2 \times 685,58 \text{ cm}^2$). Der Flüssigkristall hat daher einen Anteil in Masse-Prozent von $0,075\%$ bezogen auf das Gesamtgewicht des Gesamtbildschirm-Moduls mit 530 g . Diese Abschätzung entspricht im Wesentlichen der Information der Firma Merck KGaA, die diesen Anteil auf $0,12\%$ – $0,14\%$ bezogen auf das LCD-Modul³⁶ bestimmt hat (Becker und Vollmer 2010).
- Indiumzinnoxid (ITO)-Schicht ist eine transparent-leitfähige und teilweise strukturierte Elektrodenschicht auf den Innenseiten der beiden Glaspanels (Glassubstrate), die die Grundlage der LCD-Flachbildschirmtechnologie bildet. Einer einfachen Abschätzung zufolge enthält ein 15 -Zoll Bildschirm ca. $0,05 \text{ g}$ von ITO. Die ITO-Schichten haben daher einen Anteil in Masse-Prozent von ca. $0,01\%$ bezogen auf das Gesamtgewicht des Gesamtbildschirm-Moduls mit 530 g .
- Quecksilber (Hg): Für die Kaltkathoden-Leuchtstofflampen (CCFL) Beleuchtung ist Quecksilber ein wichtiger Bestandteil. King County Solid Waste Division (2008), Socolof et al. (2001) und HDP User Group schätzen, dass die Menge von Quecksilber in einem 15 -Zoll LCD-Bildschirm zwischen 4 und 5 mg (Socolof et al.) und zwischen 5 und 10 mg (HDP User Group) schwankt. Berechnet mit einer Bandbreite zwischen 4 mg und 10 mg Quecksilber in einem 15 -Zoll LCD-Bildschirm kommt man zu einem Anteil in Masse-Prozent zwischen $0,00075\%$ und $0,002\%$ bezogen auf das Gesamtgewicht des Gesamtbildschirm-Moduls mit 530 g . In dieser vorliegenden Studie wurde die Quecksilbermenge in dem Bildschirm-Modul mit einem Mittelwert 7 mg festgesetzt.

³⁶ Die Montage von Glas und Polymerfolien.

Darüber hinaus werden in der Herstellung eines Flachbildschirms fluorierte Verbindungen (auf Englisch: fluorinated compounds: FC) verwendet. Der IPCC-Leitfaden aus dem Jahr 2006 enthält Default-Werte für die FC-bedingten Emissionen und unterscheidet in so genannten Tier 1, Tier 2a und Tier 2b³⁷ Methoden (Tabelle 9). Die Default-Werte werden für jede Methode differenziert dargestellt.

Fertigungsstätten mit und ohne FC-Nachbehandlung haben unterschiedliche prozessbedingte Emissionen. In der Umwelt-Produktdeklaration zum Bildschirm-Modul der Firma CMO wurden keine FC-bedingten Emissionen wie SF₆ und NF₃ angegeben. Allerdings wird in der Dokumentation der Umwelt-Produktdeklaration der Firma CMO ausdrücklich erwähnt, dass Fabs eine Verpflichtung zur Reduktion der PFC- und NF₃-Emissionen haben.

Für den Treibhauseffekt spielen FC-bedingte Emissionen eine große Rolle. Zu betonen ist aber, dass diese in dem Datensatz, der im Rahmen dieser Studie für den Import in ProBas erstellt wurde, nicht enthalten sind. Allerdings wird im Rahmen dieser Studie eine Abschätzung der FC-bedingten Emissionen auf der Basis der IPCC Default-Werte getroffen. Dieser Vorgang kann für die Berechnung der prozessbedingten FC-Emission für die Fabs ohne FC-Nachbehandlung als Grundlage dienen. Denn der zugrunde liegende CMO-Datensatz repräsentiert Fabs mit FC-Nachbehandlung. Die unten stehende Tabelle 9 soll daher als Hilfestellung für diejenigen Nutzer dienen, die FC-Emissionen anhand der IPCC-Methode berechnen und in die Bilanz integrieren möchten.

Für die Bildschirmgröße wie die des in dieser Studie untersuchten Bildschirm-Moduls der Firma CMO (aktive Fläche mit 331,2 x 207 mm) könnten je nach der verwendeten Methode zwischen 2,0 kg CO₂e bis 7,6 kg CO₂e mehr emittiert werden (siehe nachstehende Tabelle 9). Diese Tabelle zeigt beispielhaft, wie die FC-Emissionen anhand von IPCC-Methoden abgeschätzt werden.

³⁷ Tier 1, Tier 2a und Tier 2b sind die Methoden, die die verschiedenen Präzisionsebenen der Berechnung der FC-Emissionen repräsentieren. Tier 1 ist am wenigsten präzise und wird verwendet, wenn keine spezifischen Daten zur Verfügung stehen. Tier 2 wird angewendet, wenn die spezifischen Daten teilweise vorhanden sind. Der Unterschied zwischen Tier 2a und Tier 2b liegt darin, dass Tier 2a Methode nicht zwischen Prozessen unterscheidet, während die Tier 2b Methode die Daten fordert, die für unterschiedliche Prozesse relevant sind.

Tabelle 9 Abschätzung der FC Emissionen nach den Default-Werten von IPCC für die TFT-LCD Flachbildschirmherstellung³⁸

	Tier 1 Default FC Emissions Factor	Tier 2a Default FC Emissions Factor	Tier 2b Default FC Emissions Factor	GWP- Emissions- faktoren (IPCC 2007)	FC Emissionen nach Tier 1	FC Emissionen nach Tier 2a	FC Emissionen nach Tier 2b
	(g FC/m ² of glass processed)	(g FC/m ² of glass processed)	(g FC/m ² of glass processed)		(kg CO ₂ e/Stück Bildschirm mit der aktiven Fläche 331,2x207mm)		
CF ₄	0,5	0,6	0,6	7390	0,3	0,3	0,3
CHF ₃	-	0,32	0,32	14800	-	0,3	0,3
c-C ₄ F ₈	-	0,13	0,13	10300	-	0,1	0,1
NF ₃	0,9	0,30	0,30	17200	1,1	0,4	0,4
SF ₆	4	0,6	1,2	22800	6,3	0,9	1,9
Summe					7,6	2,0	2,9

5.3.4 Datenqualitätsanalyse

Die Informationen und Daten, die zur Auswertung des in dieser Studie untersuchten Bildschirms notwendig waren, lagen vor. Die Daten repräsentieren somit den technologischen Hintergrund vom Jahr 2007.

Allerdings gibt es die nachstehend aufgeführten kritischen Punkte:

- Die Größe des Grundpanels (Mutterglas) bzw. die Fabs-Generation sind unbekannt. Somit ist es nicht möglich zu beurteilen, welche Produktionseffizienz die Produktionsdaten wiedergeben. Es kann jedoch aus Wirtschaftlichkeitserwägungen davon ausgegangen werden, dass die bezüglich der Ausbeute jeweils günstigste Fab-Generation zum Einsatz kommt.
- Die Kupfermenge wurde nach eigener Abschätzung ermittelt. Außerdem wurde die Vorkette „Kupfer-Herstellung“ aus einem generischen, unter ProBas verfügbaren Datensatz²⁹ modelliert. Dieser Datensatz repräsentiert eine Primärkupferherstellung und einen Zeitraum von 2000–2004. Der geographische Bezug ist Weltmix (Kapitel 5.2.3). Der 100% Primärkupfereinsatz ist nur eine Annahme. Wie viel Sekundärkupfer in der Praxis tatsächlich eingesetzt wird, ist allerdings ungewiss.
- Außerdem gibt es keine absolute Information über den Produktionsaufwand und die damit verbundenen Umweltbelastungen des Flüssigkristalls im CMO-Datensatz, jedoch relative Angaben (Merck KGaA, persönliche Mitteilung von Herrn Werner Becker). Da die Flüssigkristallmenge sehr gering ist (Kapitel 5.3.3), kann gesagt werden, dass der Flüssigkristall nur minimale Umweltbelastungen verursacht.

³⁸ IPCC Guidelines 2006 Volume 3.

Insgesamt können die Datenqualität und die Datensymmetrie dieses Datensatzes als gut eingestuft werden. Die Umwelt-Produktdeklaration für das TFT-LCD Bildschirm-Modul der Firma CMO hat eine gute Qualität, was die Repräsentativität der technologischen Parameter innerhalb dieser Geräte-Generation angeht. Die Daten bieten zusätzlich eine Grundlage für die weitere Verbesserung des Datensatzes.

6 Ergebnis II: Datensatz für Integrierte Schaltung (IC)

6.1 Beschreibung des Produktes

Eine Integrierte Schaltung (IC, Integrated Circuit), auch integrierte Schaltkreise oder Mikrochip³⁹ genannt, ist eine elektronische Schaltung, die auf einem einzelnen Halbleiter-substrat untergebracht ist. ICs werden aus hochreinem Silizium und unter Verwendung einer Reihe von Chemikalien mit sehr hohem Reinheitsgrad in Arbeitsräumen hergestellt, die so genannte Reinraumbedingungen aufweisen müssen. Mehr als hundert Chips werden auf einmal durch mehrere Prozesse in der Fertigungslinie gleichzeitig auf eine Wafer-Scheibe aufgebracht. Der Durchmesser dieser Wafer-Scheiben ist je nach Generation unterschiedlich. Die heute in der Massenproduktion verwendeten Siliziumwafer haben Durchmesser von 6, 8 oder 12 Zoll (entsprechend 150, 200 oder 300 mm). Der in dieser Studie untersuchte Wafer hat einen Durchmesser von 300 mm, was dem aktuellsten technologischen Stand entspricht. ITRS (2005) gibt an, dass die nächste Generation Wafer mit einem Durchmesser von 450 mm umfassen wird. Die polierten Wafer-Scheiben werden als Rohmaterial in der Fertigungsfabrik angeliefert und dann zum fertigen Wafer weiterverarbeitet. Jede einzelne Wafer-Scheibe besteht aus mehreren Hundert einzelnen Chips. Durch die Miniaturisierung enthält ein Stück Chip mehrere Millionen Transistoren.⁴⁰ Vor der Verkapselung werden Chips im Englischen als „die“ bezeichnet.⁴¹ Man kann sie auch als unverkapselte oder „nackte“ Chips bezeichnen. Abbildung 9 gibt einen vereinfachten Überblick über den fertigen Wafer. Eine ganze Wafer-Scheibe wird nach der Fertigungslinie als „wafer out“ bezeichnet. Die grau markierten Felder sind die so genannten „dies“. Es wird zwischen „good die“ und „bad die“ unterschieden, je nachdem ob die Chips nach der Fertigung fehlerfrei oder defekt sind. Bei den Funktionstests werden „bad dies“ automatisch markiert. Darüber hinaus gibt es noch den Randverlust des Wafers, deren Fläche zur Produktion eines Stücks „die“ nicht mehr

³⁹ Zur Vereinfachung wird in Folge des Berichtes als Chip bezeichnet.

⁴⁰ Intel®Pentium® 4 (2.2GHz) hatte 55 Millionen Transistoren im Jahr 2002 (Yao et al. 2004). Das bekannte Moore Gesetz besagt, dass sich die Transistorenanzahl auf einem Chip alle 18 oder 24 Monate (je nach Quellen) verdoppeln würde. Die aktuellste Prozessorgeneration von Intel, Corei7, das im Vergleich zu einem Atomprozessor (etwa 47 Millionen Transistoren) ca. 16-fach höhere Transistorenzahl aufweist (c't 07/2010).

⁴¹ Es gibt keine deutsche Übersetzung des Wortes „Die“.

ausreicht. Die in der vorliegenden Studie verwendete Ausbeute wird in Kapitel 6.3.2 beschrieben.

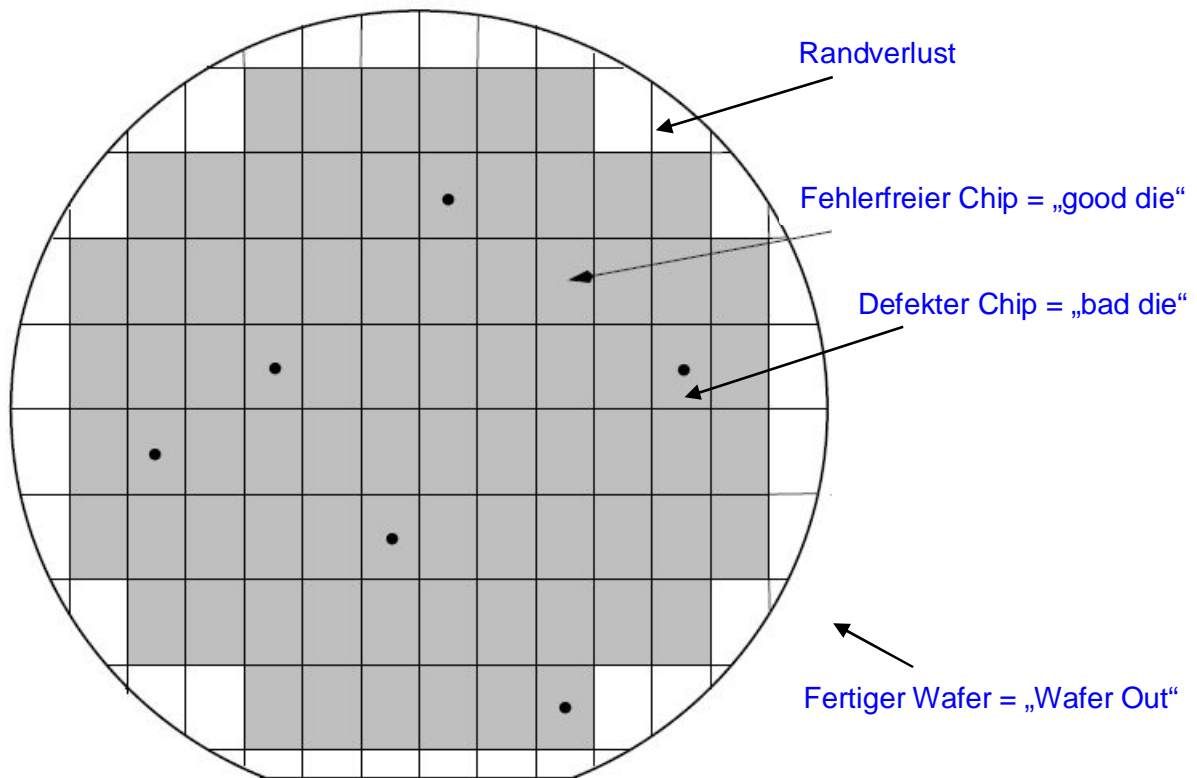


Abbildung 9 Vereinfachte Darstellung eines fertigen Wafers (nicht maßstabsgerecht).

In der Herstellungsphase der Chips werden zwei Prozessschritte unterschieden: der Front-End- und der Back-End-Prozess. Der Output aus einem Front-End-Prozess ist der fertige Wafer, (Abbildung 9 oder das linke Bild in der Abbildung 10). Danach wird der Wafer zu einzelnen Chips geschnitten. Die weiter folgenden Prozesse bis zum fertig verpackten IC werden als Back-End-Prozesse bezeichnet (Abbildung 10). Zudem finden im Back-End-Prozess Bestückung, Verdrahtung, Verkapselung und Funktionstests statt.

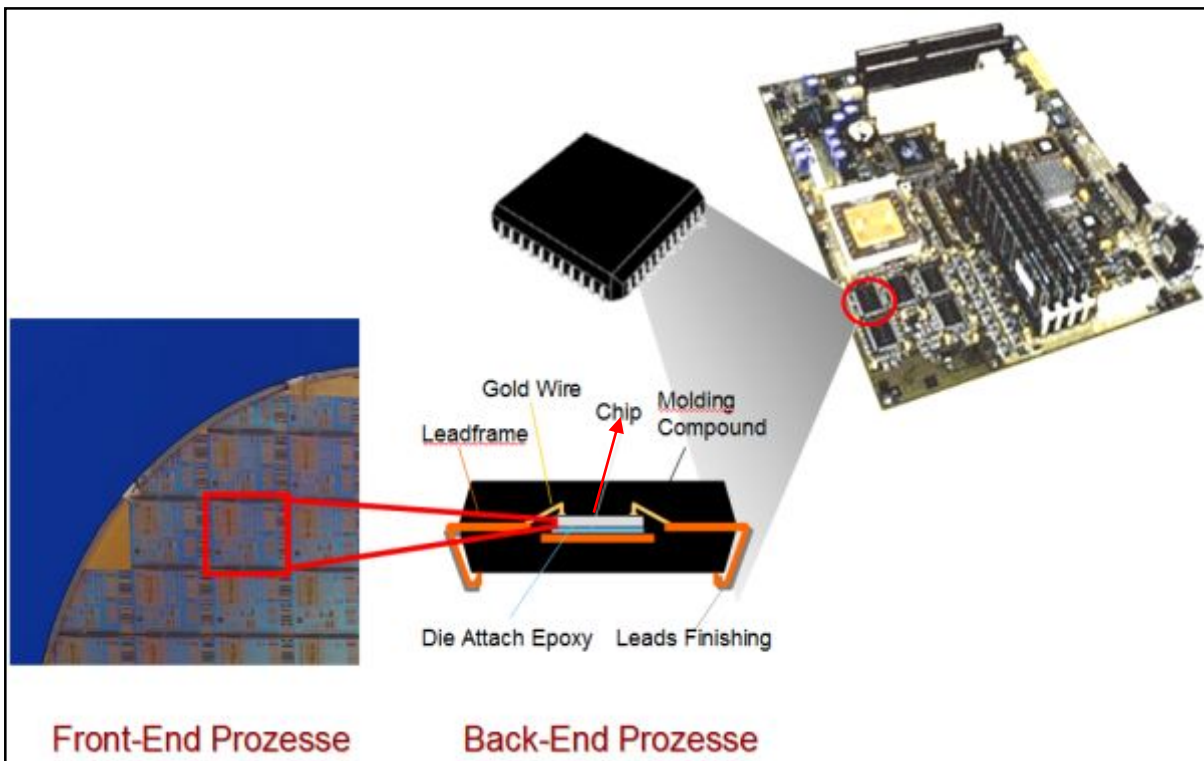


Abbildung 10 Front-End-Prozesse und Back-End-Prozesse

ICs sind komplexe Komponenten. Verschiedene technische Parameter und Prozessschritte beeinflussen den Prozess- und Energieaufwand, der mit der Produktion der ICs verbunden ist.

Um die in der vorliegenden Studie beschriebenen IC-Datensätze besser zu verstehen, werden die grundlegenden Begriffe in Tabelle 10 erläutert:

Tabelle 10 Wichtige Begriffe zum Verständnis der IC-Datensätze

Name	Kurzbeschreibung
Die (English)	Unverkapselte einzelne Chips vor der Verkapselung („nackte“ Chips)
Good die out (English)	Netto produzierte fehlerfreie Chips
„Die“ Ausbeute	Verhältnis Fehlerfreie „Die“ / Brutto produzierte Chips
Wafer-Ausbeute („Wafer yield“)	Anteil der Produktion fehlerfreier unverkapselter Chips pro Stück Wafer-Scheibe (in %). Dieser Anteil wird auch als „Netto-Ausbeute“ bezeichnet. (Boyd et al. 2009a)
Brutto-Ausbeute	Einfach produzierte Chips aus einem Stück Wafer-Scheibe. Das heißt, diese umfassen sowohl fehlerfreie als auch defekte Chips. (Boyd et al. 2009a)
Produktionslinie-Ausbeute (auf Englisch „Line yield“)	Verhältnis Finished wafer / Wafer start. (Boyd et al. 2010b). Durch die Fertigung werden auch Test- und Monitoring-Wafer durchgeschleust. Außerdem verringern die beschädigten Wafer die Ausbeute der Produktionslinie.
Strukturbreite (auf Englisch „technology node“)	Charakterisiert den Entwicklungsstand der Halbleitertechnologie und beschreibt die minimal fertigen Strukturen in Nanometer Bereich. Mit abnehmender Strukturbreite werden somit ICs mit immer mehr Transistoren und immer höheren Schaltfrequenzen möglich (Nissen 2001). Gleichzeitig sinken die Betriebstemperatur und der Energieverbrauch pro Transistor.
Metallschicht (auf Englisch „Metal layer“)	Werden auf der Oberfläche des Wafers aufgebracht, um elektrische Verbindungen zu erzeugen. Typische Metallschichten bestehen aus Aluminium oder Kupfer.
Maskenschritte (auf Englisch „Mask layer“)	Schritte zur Belichtung und dienen als ein Anhaltspunkt für die Komplexität der Chips. Je mehr Maskenschritte, desto komplexer ist die Herstellung der Chips und damit der Prozessaufwand.
Front-End-Prozess	Herstellung der elektrischen Bauelementen, wie Transistoren auf einem Chip
Back-End-Prozess	Einzelchip durch Bestückung, Verdrahtung, Verkapselung, Funktionstests

6.2 Festlegung des Untersuchungsrahmens

In dieser Studie werden insgesamt vier IC-relevante Datensätze für den Import in ProBas erstellt (Tabelle 11). Die IC-Datensätze in der vorliegenden Studie sind repräsentativ für Speicherchips. Anzumerken ist, dass bei diesen Datensätzen nur direkte Prozesse dargestellt werden, da die Plausibilität nur über die Daten sichergestellt werden kann, die im Kontext dieser Studie untersucht werden konnten. Die Vorketten können von ProBas-Nutzern eigenständig mit geeigneten Datensätzen ergänzt und mit den vier bereitgestellten IC-Datensätzen verknüpft werden.

6.2.1 Bezugsgröße

Eine Bezugsgröße bietet eine einheitliche Grundlage für die erhobenen Input- und Outputdaten. Die Bezugsgröße soll ebenfalls den Herstellungsaufwand oder den Nutzen der Produkte oder der Dienstleistung reflektieren. Durch die Miniaturisierung im Bereich IC ist das Gewicht der ICs nicht als Bezugsgröße geeignet, da sich die verschiedenen technologischen Generationen von ICs nicht wesentlich unterscheiden. Insofern kann auch ein IC-Datensatz nicht auf einen anderen IC-Typ anhand von Gewichtsverhältnissen skaliert werden, weil eben kein direkter Zusammenhang zwischen dem Gewicht der ICs und dem

Produktionsaufwand besteht. Die Parameter, die mit dem Produktionsaufwand einhergehen, sind die Maskenschritte, Metallisierungsschritte, Fläche sowie die Funktionalität der ICs. Ein Prozessor-Chip hat beispielsweise einen höheren Produktionsaufwand aufgrund der zunehmenden Funktionalität (Komplexität des Designs) im Vergleich zu einem weniger komplexen aber auch hoch miniaturisierten Speicherchip.

Im Themenfeld ICs werden unterschiedliche Bezugsgrößen vorgeschlagen bzw. verwendet. Nissen (2001) beschreibt, dass die Bezugseinheit „pro cm² und Anzahl Maskenschritte“ für die Abschätzung der Umweltauswirkungen sinnvoll ist. GLOBALFOUNDRIES hat in einem Pilotprojekt einen so genannten „Manufacturing Index_{dies out}“ (MI) verwendet. MI ist das Produkt von „good dies“ und der Anzahl der Maskenschritten (Hermanns 2010). Eine gängige Bezugsgröße in der Halbleiter-Industrie ist Manufacturing Index (MI) = Waferfläche * Maskenschritte ohne Berücksichtigung von Ausbeute. Die Firma UMC veröffentlicht ihre Umweltdaten bezogen auf cm² fertiger Wafer mit einem durchschnittlichen Maskenschritt. Der Europäische Verband der Halbleiterindustrie (ESIA) empfiehlt ebenfalls pro cm² fertiger Wafer als Bezugsgröße (ESIA 2010). Die Anzahl der Maskenschritte wird als Betriebsgeheimnis angesehen und daher nicht nach außen bekanntgegeben. Normalerweise wissen nicht mal die Markenhersteller, die keine „Front-End“ Fertigung betreiben, mit wie vielen Maskenschritten ein IC gefertigt wird.

In diesem Kontext werden in der vorliegenden Studie zwei Bezugsgrößen für „Front-End“ Datensätze erstellt, nämlich cm² fertiger Wafer und cm² „good die“. Dadurch können Nutzer, denen der Ausbeute-Faktor beim fertigen Wafer bekannt ist, den Datensatz mit der Bezugsgröße cm² fertiger Wafer nutzen und anschließend zu der Bezugsgröße „good die“ wechseln. Die anderen Nutzer, denen diese Aspekte unbekannt sind, können den Datensatz mit der Bezugsgröße „good die“ verwenden, in dem die Ausbeute und der Randflächenverlust berücksichtigt werden.

Bezüglich der Anzahl der Maskenschritte werden durchschnittliche Werte aus dem Jahr 2007 verwendet, da auch der Stromverbrauch für die Prozessierung auf 2007 bezogen ist. Die genaue Anzahl der Maskenschritte ist unbekannt. Ein Prozessor hat generell mehr Maskenschritte als ein Speicherchip. Daher wird davon abgeraten, den Datensatz für Speicherchips für Prozessorenchips zu verwenden. Es gibt zurzeit keine zuverlässige Aussage, ob und wie zwischen den unterschiedlichen Chip-Typen umgerechnet werden kann; dies müsste in vertiefenden Arbeiten geklärt werden.

Bezüglich der Bezugsgröße im Back-End-Prozess ist laut der Empfehlung von ESIA (2010) eine Bezugsgröße „pro Stück Chip“ zurzeit angemessen. Je nach Funktionalität gibt es allerdings verschiedene Einhausungs- und Kontaktierungstechnologien für ICs (Packaging-Typen). Einen allgemeinen Datensatz für alle Packaging-Typen gibt es momentan nicht; er würde auch keinen Sinn machen. In der vorliegenden Studie wurde ein spezifischer Speicherchip mit seinem Packaging-Typ (Kapitel 6.3.3) betrachtet.

Tabelle 11 IC-Datensätze mit ihren Bezugsgrößen für den Import in ProBas

Datensatz in ProBas	Bezugsgröße
Silizium-Wafer-Herstellung	1 cm ² polierter Silizium-Wafer
IC-Fertigung Front-End-Prozess\„Wafer Out“	1 cm ² fertiger Wafer Out
IC-Fertigung Front-End-Prozess\„good die out“	1 cm ² fehlerfreier Chip Out
IC-Fertigung Back-End-Prozess	1 Stück Speicherchip

6.2.2 Festlegung der Systemgrenze

Abbildung 11 stellt die Systemgrenze des ProBas-Datensatzes für die Herstellung des Silizium-Wafers dar. Die Herstellung des Silizium-Wafers kann als Vorkette des Front-End-Prozesses betrachtet werden. Die Systemgrenze für die Herstellung des Silizium-Wafers beginnt mit der Rohstoffentnahme Quarzsand und geht bis zur produzierten Silizium-Wafer-Scheibe (cradle-to-gate). Die Herstellung von Graphit und Chlorwasserstoff sowie die Strombereitstellung sind nicht berücksichtigt, jedoch werden die Verbrauchsmengen ausgewiesen (Tabelle 15). Die Herstellung von Graphit und Chlorwasserstoff kann in der Datenbank ProBas oder in anderen, öffentlich zugänglichen Ökobilanzdatenbanken ergänzt werden. Die Nutzer können somit kontextspezifisch den Strom-Mix (länderspezifisch oder regional-spezifisch) in der Bilanz der Vorkette entsprechend modellieren.

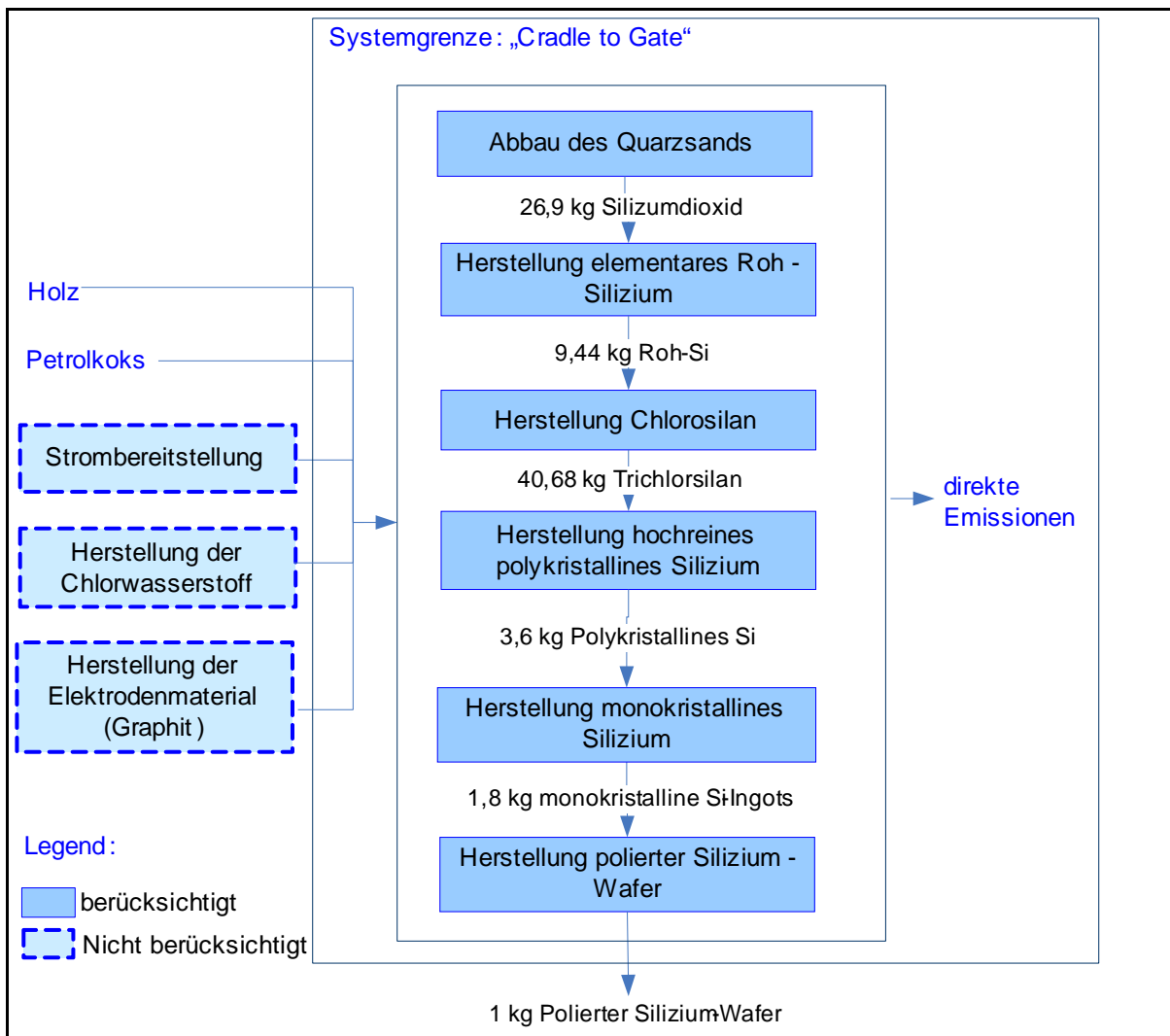


Abbildung 11 Systemgrenze des Probas-Datensatzes für die Herstellung des Silizium-Wafers

Die Systemgrenze bei den Front-End- und Back-End-Prozessen geht von Werkstor zu Werkstor (gate-to-gate) (Abbildung 12 und Abbildung 13). Es werden nur die direkten Herstellungsprozesse berücksichtigt. Die Nutzer können kontextspezifisch (z.B. länder-spezifischer Strom-Mix) die entsprechenden Vorketten aus öffentlich verfügbaren Datenbanken wie ProBas oder GEMIS bilanzieren.

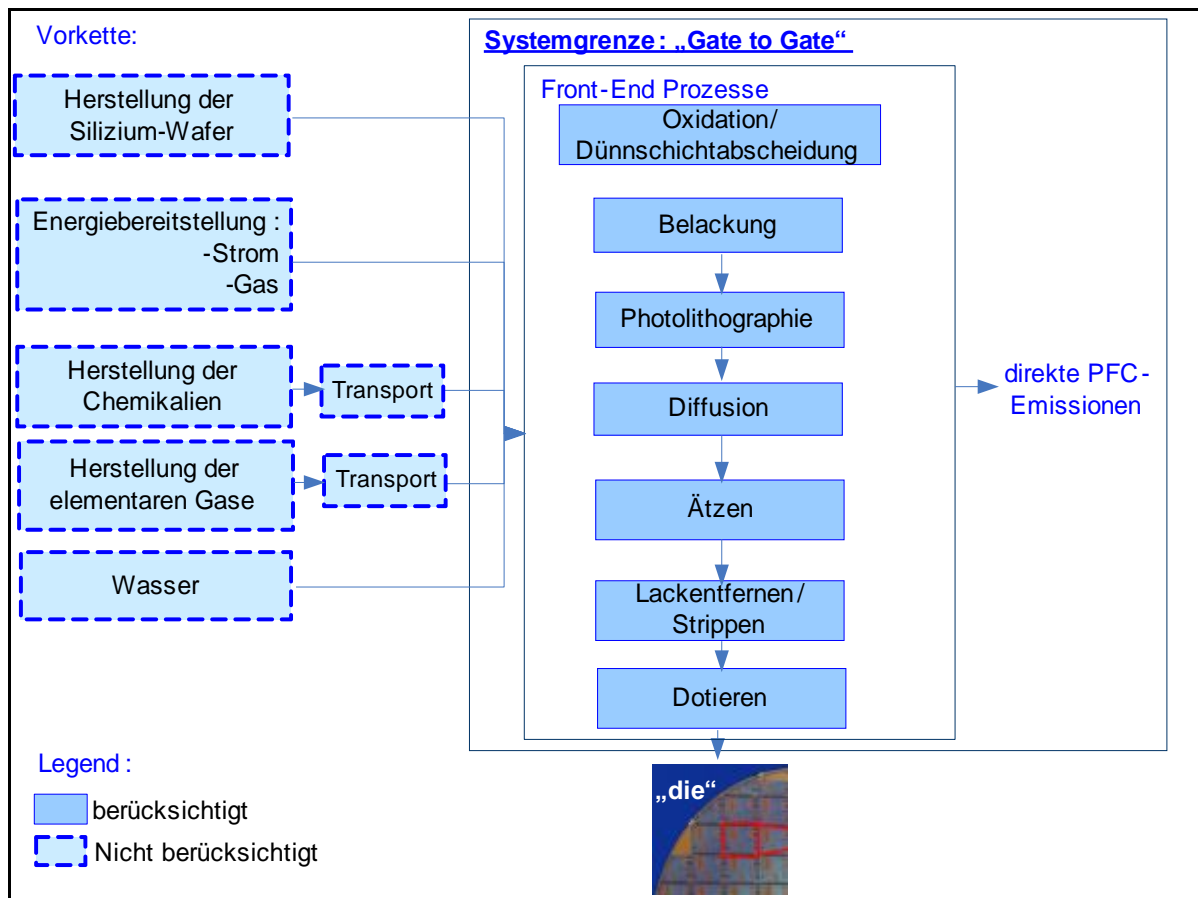


Abbildung 12 Systemgrenze des ProBas-Datensatzes für die Front-End-Prozesse

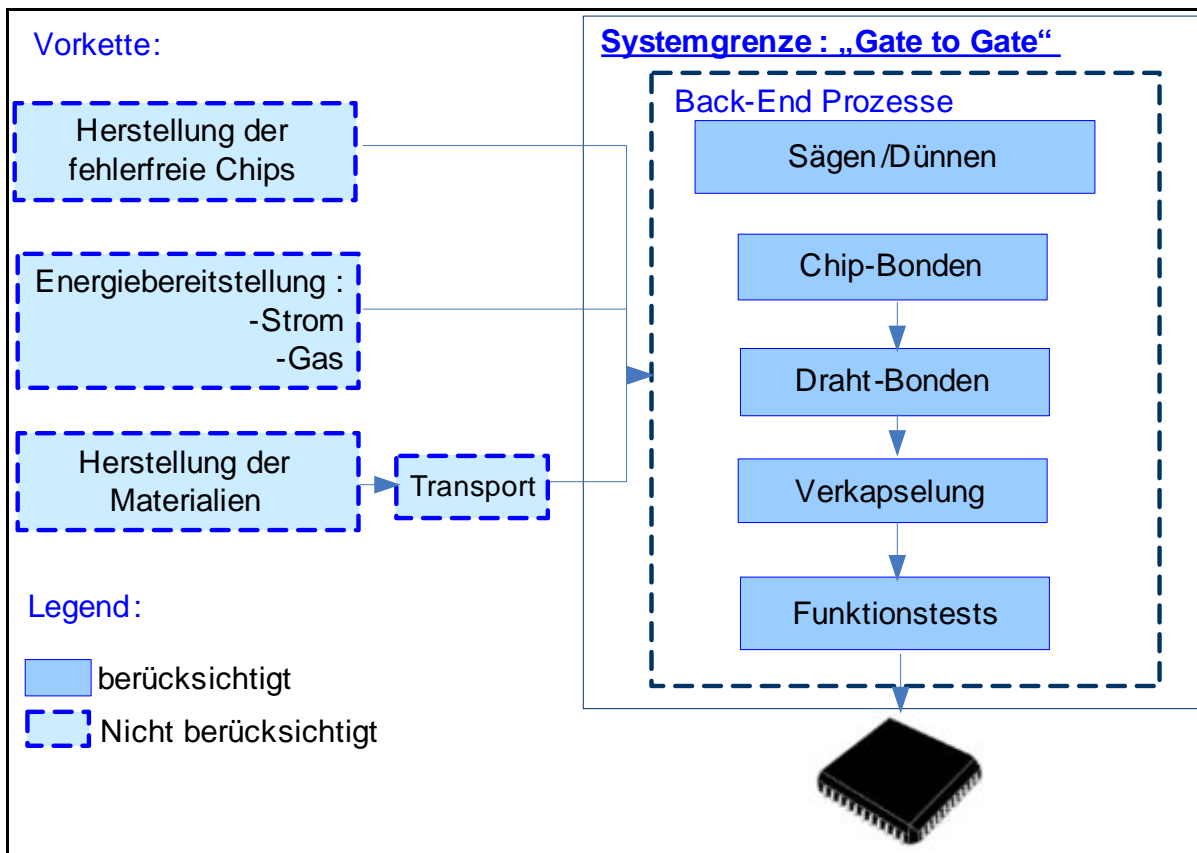


Abbildung 13 Systemgrenze des ProBas-Datensatzes für Back-End-Prozesse

Innerhalb der Systemgrenze der IC-Datensätze wurden folgende Aspekte nicht berücksichtigt:

- Für die unverkapselten Chips wird in dieser Studie ausschließlich das reine Silizium berücksichtigt. Das heißt, die Dotierungsatome (wie Arsen, Phosphor, Bor oder Aluminium) sind in der Studie vernachlässigt worden. Nissen (2001) hat in seiner Dissertation die Menge der Dotierungsatome konservativ abgeschätzt und kommt zu dem Ergebnis, dass die Anteile der Dotierungsatome kleiner als 0,5% in Masse-Prozent bezogen auf den Flächenanteil sind. Tatsächlich könnte der Arsen-Anteil deutlich unter 0,5% liegen (Persönliche Mitteilung von Frau Silke Hermanns, GLOBAL-FOUNDRIES, 17.05.2011).
- In der vorliegenden Studie werden die elementaren Gase und wichtigste Chemikalien (nach der Empfehlung von ESIA 2010) sowie Perfluorcarbone (PFC) (Boyd et al. 2010) erfasst. Damit werden zwar die wesentlichen, aber nicht alle Chemikalien berücksichtigt.
- Wasserverbrauch und Chemikalienverbrauch im Back-End-Prozess konnten mangels Daten nicht berücksichtigt werden. Allerdings werden in den Back-End-Prozessen

keine signifikanten Chemikalien verbraucht, und der Materialeinsatz geht laut ESIA (2010) praktisch vollständig in das Produkt ein.

Außerdem werden in der vorliegenden Studie keine Allokationsregeln angewendet und keine Gutschriften vergeben, wenn Koppel-Produkte anfallen. Das heißt, der Produktionsaufwand und die Umweltauslastung werden vollständig den Hauptprodukten zugeschrieben.

Siliziumreste bei der Herstellung des Silizium-Wafers werden als erfasste Koppel-Produkte ausgewiesen (Tabelle 15), dadurch können Nutzer des Datensatzes auch andere Allokationsregeln anwenden.

6.2.3 Repräsentativität der Datensatz

Die Repräsentativität der vier IC-Datensätze ist in Tabelle 12 und Tabelle 13 zusammengefasst:

Tabelle 12 Repräsentativität der IC-Datensätze (Ohne Vorkette)

Datensatz in ProBas	Zeitlicher Bezug	Geographischer Bezug	Technologischer Bezug
IC-Fertigung-Front End Prozess\“Wafer Out“	2002-2010	Welt-Mix	<ul style="list-style-type: none"> Technologie Generation ist 300 mm Silizium-Wafer (12 Inch), abgeschätzt mit 775 µm Dicke. Gewicht pro Stück Silizium-Wafer: 128 g. Stromverbrauch aus dem Jahr 2007 (ESIA 2010). Chemikalienverbrauch beruht zum Teil auf 2002 und zum Teil auf 2009 (Tabelle 19). Produktionslinie-Ausbeute (Finished Wafer per Wafer start) entnommen aus Boyd et al. (2010b) und Chip-Ausbeute von ITRS (2009a) (Tabelle 17).
IC-Fertigung-Front End Prozess\“good die out“	2002-2010	Welt-Mix	<ul style="list-style-type: none"> Technologie Generation ist 300 mm Silizium-Wafer (12 Inch), abgeschätzt mit 775 µm Dicke. Gewicht pro Stück Silizium-Wafer: 128 g. Stromverbrauch aus dem Jahr 2007 (ESIA 2010). Chemikalienverbrauch beruht zum Teil auf 2002 und zum Teil auf 2009 (Tabelle 19). Produktionslinie-Ausbeute (Finished Wafer per Wafer start) entnommen aus Boyd et al. (2010b) und Chip-Ausbeute von ITRS (2009a) (s. Tabelle 17). Randbereichverlust erfolgt nach eigener Abschätzung.
IC-Fertigung-Back End Prozess	2007-2010	Welt-Mix	Spezifischer Speicherchip von Samsung DRAM DDR3. Part Nummer: K4B1G0846E-HCH9. Speicherkapazität: 1 GB. „Die“ Fläche beträgt 43 mm ² . Gesamter Chip (mit Gehäuse) wiegt 0,162 g pro Stück.

Tabelle 13 Repräsentativität des Datensatzes für die Herstellung des Silizium-Wafers

Datensatz in ProBas	Zeitlicher Bezug	Geographischer Bezug	Technologischer Bezug
Silizium-Wafer-Herstellung	2000-2002	Welt-Mix	<ul style="list-style-type: none"> Produktionsdaten repräsentieren die Technologie in 2000. Stromverbrauch stammt aus Williams et al. 2002

6.3 Ergebnis und Auswertung des Datensatzes für ICs

6.3.1 Datensatz für die Herstellung des Silizium-Wafers

Der Hauptbestandteil des Wafers ist Silizium. Silizium aus Quarzsand ist nach Kohlenstoff der zweithäufigste Rohstoff auf der Erde. Die folgende Tabelle 14 beschreibt die technischen Kennwerte des in dieser Studie erfassten Silizium-Wafers mit 300 mm Durchmesser.

Tabelle 14 Technische Kennwerte von der 300mm Silizium-Wafer in der vorliegenden Studie

Technische Parameter	Menge	Einheit
Durchmesser	300	mm
Dicke	775	µm
Gewicht	128	Gramm pro Stück 300mm-Silizium-Wafer

Die Grundlage für den Datensatz, insbesondere für die Ermittlung des Energieverbrauchs, zur Herstellung des Silizium-Wafers bildet die Studie Williams et al. (2002). In der vorliegenden Studie wurde angenommen, dass 2127 kWh Strom für die Herstellung von 1 kg poliertem Wafer verbraucht wird. Schischke und Kohlmeyer (2003) zeigten, dass die Herstellung von 1 kg poliertem Wafer mit einem Stromverbrauch von 1560 kWh verbunden ist. Schischke und Kohlmeyer (2003) bezogen sich auf die ältere Williams-Studie aus dem Jahr 2000. Alle Materialien und Energieverbräuche sowie die Emissionen für die Herstellung von 1 kg poliertem Wafer sind in Tabelle 15 zusammengefasst.

Tabelle 15 Input- und Outputflüsse bei der Herstellung des Silizium-Wafers (Wiege zum Werkstor) nach der Bezugsgröße 1 kg Wafer⁴².

Input			Output ⁴³		
Trockenes Holz	22	kg	polierte Wafer	1	kg
Strom	2127	kWh	Abgasemissionen		
Siliziumdioxid	26,9	kg	CO ₂	46,0	kg
Holzschnitzel	10,1	kg	CO	0,92	kg
Petrolkoks	3,3	kg	NO _x	0,076	kg
Elektrodenmaterial	0,9	kg	Methanol	0,47	kg
Chlorwasserstoff (HCl)	37,3	kg	Methan	0,38	kg
			Ethan	0,16	kg
			Partikel	1,11	kg
			H ₂ O	10,4	kg
			SO ₂	0,19	kg
			Wasserstoff	0,69	kg
			Abfälle		
			SiO ₂	0,09	kg
			Abwasser		
			Metallchloride	4,35	kg
			Koppelprodukte:		
			Si in anderen Koppelprodukten	1,58	kg
			Si-Reste für Solarzellen	0,36	kg
			Siliziumtetrachlorid	22,9	kg

Zu beachten sind die Produktionsdaten, insbesondere der Energieaufwand für die Herstellung des Silizium-Wafers aus der Studie von Williams et al. 2002 bzw. 2000 (Tabelle 15). Die Produktionsdaten für die Herstellung des Silizium-Wafers sind relativ alt. Aktuelle Studien, wie Boyd et al. (2009b) und Krishnan et al. (2008), verwenden ebenfalls die Input- und Outputdaten von Williams et al. (2002). Dem Vernehmen nach ist die Studie von Williams et al. (2002) die aktuellste veröffentlichte Studie, in der die Herstellung des Silizium-Wafers detailliert beschrieben wurde. Ob und in welchem Umfang sich Technologie und Effizienz bei der Herstellung des Silizium-Wafers geändert haben, kann nicht eingeschätzt werden. Somit ist eine Aktualisierung der Beschreibung der Herstellung des Silizium-Wafers angezeigt (vgl. Kapitel 8).

Zu beachten ist zudem, dass die in Tabelle 15 dargestellten Zahlenwerte sich auf kg Wafer beziehen. Die Zahlenwerte müssen auf die Oberfläche des Wafers umgerechnet werden, da

⁴² Quelle von Materialien und Emissionen ist Williams 2000 (zitiert im Schischke und Kohlmeyer (2003); Stromverbrauch nach Willisam et al. 2002 (zitiert im Boyd et al. (2009b) und Krishnan et al. (2008)

⁴³ Die Zuordnung der Emissionen nach Umweltmedien beruht auf eigene Annahmen.

diese entscheidend für die Produktion der daraus hergestellten ICs ist. Dafür ist die Angabe der Wafer-Dicke erforderlich. Wie schon erwähnt, beträgt der Durchmesser des betrachteten Silizium-Wafers 300 mm, was auch dem aktuellsten Stand der Technologie entspricht. Watanabe und Kramer (2006) und ITRS (2005) haben die Verhältnisse zwischen Durchmesser und Dicke des Wafers ermittelt. Ein Wafer mit 300 mm Durchmesser hat in der Regel eine Dicke von 775 µm (Watanabe und Kramer 2006 und ITRS 2005). Unter Berücksichtigung der Dichte von Silizium (2,336 g/cm³)⁴⁴ ist die Anzahl Wafer je kg polierter Wafer mit 300 mm folgendermaßen zu bestimmen:

$$n[\text{Anzahl Wafer je kg mit 300mm}] = \frac{1000g}{\pi \left(\frac{D[\text{cm}]}{2}\right)^2 \cdot d[\text{cm}] \cdot \rho\left[\frac{g}{\text{cm}^3}\right]}$$

$$\Rightarrow n = \frac{1000g}{3,1415 \left(\frac{30[\text{cm}]}{2}\right)^2 \cdot 0,0775[\text{cm}] \cdot 2,336\left[\frac{g}{\text{cm}^3}\right]} = 7,815$$

Das bedeutet, dass aus 1 kg poliertem Wafer 7,815 Stück 300 mm Wafer erzeugt werden können. Für ein Stück 300 mm Wafer ergibt sich eine Oberfläche von 706,86 cm². Somit ist die Gesamtoberfläche von 7,815 Stück polierten Wafern je 300 mm Wafer dementsprechend insgesamt 5524,11 cm². Aus den in Tabelle 15 aufgeführten Outputflüssen kann entnommen werden, dass Silizium sowie Siliziumtetrachlorid als Koppel-Produkte bei der Herstellung des Silizium-Wafers anfallen. Eine Allokation wird allerdings nicht durchgeführt (Kapitel 6.2). Das heißt, dass der Produktionsaufwand und die Emissionen vollständig dem Hauptprodukt Silizium-Wafer zugeschrieben werden.

Die Input- und Outputflüsse werden in nachfolgender Tabelle 16 bezogen auf die Oberfläche in cm² aufgeführt:

⁴⁴ Quelle: N. N. Greenwood, A. Earnshaw: Chemie der Elemente. 1. Auflage, 1988, ISBN 3-527-26169-9, S. 426.

Tabelle 16 Input- und Outputflüsse bei der Herstellung des Silizium-Wafers nach der Bezugsgröße 1 cm² polierter Wafer⁴⁵.

Input			Output ⁴⁶		
Trockenes Holz	3,98E-03	kg	polierte Wafer	1	cm ²
Strom	3,85E-01	kWh	Abgasemissionen		
			CO ₂	8,33E-03	kg
Siliziumdioxid	4,87E-03	kg	CO	1,67E-04	kg
Holzschnitzel	1,83E-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
			Wasserstoff	1,25E-04	kg
			Abfälle		
			SiO ₂	1,63E-05	kg
			Abwasser		
			Metallchloride	7,87E-04	kg
			Koppelprodukte		
			Si in anderen Koppelprodukten	2,86E-04	kg
			Si-Reste für Solarzellen	6,52E-05	kg
			Siliziumtetrachlorid	4,15E-03	kg

6.3.2 Datensatz für Front-End-Prozesse für Speicherchips

Ermittlung der Ausbeute bei der Chip-Herstellung

Wie in Abbildung 9 dargestellt wird, gibt es sowohl Randverluste als auch defekte Chips. Folgende Berechnung zeigt, auf welcher Grundlage die Ausbeute in dieser Studie ermittelt wurde. Die Kalkulation der Chip-Ausbeute erfolgte nach ITRS (2009a) Tabelle YE3 (Yield-Enhancement), die für DRAM-Speicherchip (Dynamic Random Access Memory)⁴⁷ 85% fehlerfreie DRAM-Chips ausweist. Die Produktionslinie-Ausbeute mit 88% erfolgt nach Boyd

⁴⁵ Eigene Berechnung nach Tabelle 15.

⁴⁶ Die Zuordnung der Emissionen nach Umweltmedien beruht auf eigene Annahmen.

⁴⁷ DRAM bezeichnet die Standard-Technologie für elektronische Speicherbausteine in Computern, bestehend aus einer Vielzahl von Kondensatoren, die entweder geladen oder entladen sind, und so die Information speichern. Über einen Schalttransistor wird jeder einzelne Kondensator zugänglich und entweder ausgelesen oder mit neuem Inhalt beschrieben. Jede Speicherzelle speichert ein Bit ist aus je einem Kondensator und einem Transistor aufgebaut. Bei fehlender Betriebsspannung oder zu später Wiederauffrischung geht die gespeicherte Information verloren. Daher spricht man von flüchtigem Speicher. DRAM-Module werden als Arbeitsspeicher eingesetzt.

et al. (2010b). Der Verlust wird aus der Summe des zusätzlichen Aufwandes für Wafer-Test und Wafer-Monitoring mit 10% und Beschädigung der Wafer mit 2% gebildet.

Die Randverluste wurden nach eigener Abschätzung, die auf den Daten von Boyd et al. (2010b) beruhen, ermittelt. Tabelle 17 zeigt die Eckdaten von der Boyd-Studie. Auf der Fläche mit 300 mm Durchmesser werden insgesamt 590 Stück Chip je 1,1 cm² hergestellt. Dadurch wird der Randverlust folgendermaßen berechnet:

$$\begin{aligned}
 \text{Flächenverlust}[cm^2\text{Wafer}] &= 3,1415 \left(\frac{30[cm]}{2} \right)^2 - (1,1[cm^2] * 590\text{Stück}) \\
 &= 706,86[cm^2] = 654,9[cm^2] = 51,96[cm^2]
 \end{aligned}$$

Das heißt, der Flächenverlust aufgrund des Randes der Wafer-Scheibe beträgt 51,96 cm².

Somit ist der Randverlust ca. 7% ($= \frac{51,96cm^2}{706,86cm^2}$) der gesamten Wafer-Fläche.

Auf dieser Basis wurde der Randverlust für die in der vorliegenden Studie untersuchten Chips abgeschätzt. Dabei gilt: je kleiner die Chip-Größe ist, desto kleiner ist die Fläche am Ende, die nicht benutzt werden kann. Um einen Randverlust nach der Speicherchip-Größe in der vorliegenden Studie anzupassen, wurde ein Randverlust von 3% angenommen.

Durch die drei Ausbeute-Raten, nämlich Produktionslinie-Ausbeute, benutzte Fläche und fehlerfreie Chip-Ausbeute, ergibt sich eine gesamte Wafer-Ausbeute von 72,6%. Das bedeutet, aus 1 cm² Silizium-Wafer werden 0,726 cm² fehlerfreie Chips („die“) produziert.

Tabelle 17 Kenndaten bei der Wafer-Fertigung und Ermittlung der Ausbeute von der Chip-Herstellung

Kenndaten	Menge	Quelle
Wafer-Durchmesser	300 mm	Boyd et al. 2010b
Strukturbreite	45 nm	
Produktionslinie-Ausbeute (finished Wafer per Wafer start)	88%	
Brutto-Ausbeute (chips/Wafer)	590	
Netto-Ausbeute (fehlerfreie Chips/Wafer)	443	
Chip-Größe (mm ²)	111	
Chip-Ausbeute (%)	85%	Table YE3 in ITRS (2009a) für DRAM
Randverlust	3%	Eigene Abschätzung
Benutzte Fläche bei Wafer-Scheiben (abgezogen von der Randfläche)	97%	= 100% - 3%
Wafer-Ausbeute (%) (von „Wafer Start“ zu den fehlerfreien Chips)	$88\% * 85\% * 97\% = 72,6\%$	Eigene Berechnung
Wafer-Ausbeute (%) (von „Wafer Out“ zu den fehlerfreien Chips)	$85\% * 97\% = 82,45\%$	Eigene Berechnung

Zu beachten ist, dass für den Datensatz mit der Bezugsgröße cm² fertiger „Wafer Out“ nur die Produktionslinie-Ausbeute mit 88% berücksichtigt wurde. Im Gegensatz dazu wird im Datensatz mit der Bezugsgröße cm² fehlerfreie „die“ noch ein Randverlust mit 3% und eine Chip-Ausbeute mit 85% berücksichtigt. Daraus ergibt sich die gesamte Wafer-Ausbeute von 72,6%.

Energieverbrauch

Der Stromverbrauch im Front-End-Prozess beträgt 1,05 kWh pro cm² fertiger Wafer im Jahr 2007 auf der Basis des Weltmix (ESIA 2010). Im Jahr 2007 repräsentiert die Technologiegeneration der Chip-Herstellung 60 nm Strukturbreite. Neben Strom als Energiequelle werden noch andere Energieträger wie z.B. Erdgas verwendet. Williams et al. (2002) zitieren aus dem JEIDA⁴⁸-Bericht, dass 83% des gesamten Energieverbrauchs der Halbleiterindustrie aus Strom stammt. Die anderen genutzten Energieträger könnten Öl, Erdgas, Flüssiggas (Liquified Petroleum Gas, LPG) oder Benzin sein.

UMC weist in ihrem Umweltbericht 2009 als Energiequellen 89% Strom und 11% Erdgas aus. In einer anderen vertraulichen Studie aus Taiwan wurden die Daten zum Energieverbrauch der vier untersuchten DRAM Fabriken analysiert. Dabei wurde gezeigt, dass in den DRAM-Fabriken neben Strom Öl und Dampf verwendet werden, wobei deren Summenanteil

⁴⁸ JEIDA ist die alte Bezeichnung für den Japanischen Elektronik- und IT-Verband (Japan Electronic Industries Development Association) heute JEITA (Japan Electronics and Information Technology Industries Association)

kleiner als 1% ist. Öl und Dampf wurden daher in der vorliegenden Studie nicht berücksichtigt. Die Verteilung von Strom und Erdgas wurde auf der Basis der o.g. Anteile aus den vergleichsweise aktuellen Angaben der Firma UMC zugrunde gelegt.

Wie schon erwähnt, kommen bei den Fertigungsprozessen in Wafer-Fabs defekte Chips und Randverluste vor. Für den Datensatz mit der Bezugsgröße auf fehlerfreie Chips muss daher noch die Ausbeute berücksichtigt werden. Der Energieinput im Front-End-Prozess bezogen auf zwei Bezugsgrößen ist in Tabelle 18 dargestellt:

Tabelle 18 Energieinput im Front-End-Prozess bezogen auf zwei Bezugsgrößen

Energie Input	Menge	Einheit	Quelle
Strom	1,05	kWh/cm ² fertiger Wafer	ESIA 2010
Erdgas	0,13	kWh/cm ² fertiger Wafer	$= \frac{1,05kWh / cm^2}{89\%} * 11\%$
Energie Input	Menge	Einheit	Quelle
Strom	1,27	kWh/cm ² fehlerfreie Chip	$= \frac{1,05kWh / cm^2}{82,45\%}$
Erdgas	0,16	kWh/cm ² fehlerfreie Chip	$= \frac{0,13kWh / cm^2}{82,45\%}$

Chemikalienverbrauch

Die in der Halbleiterindustrie verwendeten Chemikalien weisen besondere Merkmale auf: zum einen werden sehr vielfältige Chemikalien eingesetzt, zum anderen werden hohe Reinheitsgrade gefordert. Die verwendeten Chemikalien umfassen elementare Gase (He, N₂, O₂, Ar, H₂), Säuren, Laugen sowie Chemikalien für Ätzverfahren und lithographische Prozesse. Hinzu kommen Chemikalien zur Reinigung der Produktionslinien und der Reinräume. Williams et al. (2002) und Boyd et al. (2010b) haben ca. 30 Chemikalien in ihren Studien aufgelistet. Die hochreinen Chemikalien brauchen aufgrund mehrerer Reinigungsprozesse mehr Energie im Vergleich zu normalen Standardchemikalien. Dieser Aspekt wird allerdings bei der Bewertung der Umweltauswirkungen häufig mangels Daten vernachlässigt. Higgs et al. (2010) sehen dies jedoch kritisch, da der Energieaufwand zur Herstellung von hochreinen Chemikalien keineswegs mit dem Herstellungsaufwand von Standardchemikalien gleich gesetzt werden kann. Es sei notwendig, die weiteren durchgeführten Reinigungsprozesse genauer zu betrachten. In den meisten Fällen dürften die Reinigungsschritte energieintensive Prozesse sein, wie Rektifikation oder Umkehrosmose.

In der vorliegenden Studie wurden bei der Erhebung der Daten zu den Chemikalien mit Unterstützung des europäischen Verbandes der Halbleiterindustrie (ESIA) zunächst die wichtigsten Chemikalien identifiziert. Mithilfe von ESIA konnten die in der Studie Boyd et al.

(2010b) aufgeführten Verbrauchsmengen der Chemikalien geprüft werden. Beispielsweise wies ESIA darauf hin, dass Chemikalien wie Fomaldehyd (CH_2O) nicht mehr in der Halbleiterindustrie verwendet werden. Daher wurden nur drei PFC-Chemikalien (CF_4 , CHF_3 , NF_3) aus der Studie Boyd et al. (2010) entnommen. Zwei weitere PFC-Chemikalien (C_2F_6 und SF_6) wurden aus der Studie Williams et al. (2002) entnommen, denn diese wurden in Boyd et al. (2010) nicht aufgeführt. Weitere Chemikalien wie Schwefelsäure, Wasserstoffperoxid usw. wurden aus dem Umweltbericht 2009 der Firma UMC herangezogen (Tabelle 19). Die Daten des Umweltberichtes 2009 der Firma UMC sind aktuell und adressieren auch die Front-End-Prozesse. Chemikalien wie Phosphorsäure und Ammoniumhydroxid, die im Umweltbericht 2009 der Firma UMC nicht berücksichtigt wurden, wurden aus der Studie Williams et al. (2002) entnommen (Tabelle 19).

Zur Berechnung des zusätzlichen Energiebedarfs bei der Reinigung dieser Chemikalien werden die von Higgs et al. (2010) entwickelten Faktoren zugrunde gelegt. Die Faktoren sind auf der Basis von CO_2 -Emission und Energieverbrauch berechnet (Higgs et al. 2010) und in Tabelle 20 dargestellt. Beispielsweise werden Energieaufwand und CO_2 -Emissionen bei Wasserstoffperoxid (H_2O_2) mit hohem Reinheitsgrad um ca. 17% höher eingeschätzt als für Standard-Wasserstoffperoxids (Higgs et al. 2010). In diesem Fall führen die Prozesse wie Ionenaustauschverfahren zu einem hohen Reinheitsgrad. Dieser Prozess ist vergleichsweise energieintensiv. Im Gegensatz dazu benötigt die Herstellung der Schwefelsäure mit hohem Reinheitsgrad einen rund zehnfach höheren Energieaufwand im Vergleich zu Standard-Schwefelsäure (Higgs et al. 2010), was auf die Reinigungsprozesse zurückzuführen ist. Hier erfolgt die Entfernung von Spurenmetallen durch Destillation des gelösten Schwefeloxidgases, was einen hohen Energieaufwand erfordert. Zu betonen ist, dass der Datensatz in ProBas ohne Vorkette eingestellt wird. Die Faktoren können daher nur als Referenz in der Beschreibung des Front-End-Datensatzes dienen. Zur Berechnung des Produktionsaufwandes der hochreinen Chemikalien könnten die Nutzer die Faktoren als Referenz nehmen, die auf der Basis des Produktionsaufwandes der normalen Chemikalien ermittelt wurden.

Tabelle 19 Chemikalienverbrauch im Front-End-Prozesse (kg/cm² Wafer Out)

Elementare Gase und Chemikalien	Menge	Einheit	Quelle	Zeitbezug	Ortsbezug	Anmerkung
Elementare Gase						
N ₂ (hochrein)	5,00E-01	kg/cm ² Wafer Out	Williams et al. 2002	2000	Anonyme Firmendaten in Westeuropa	Daten von Williams et al. bezogen auf „Wafer In“. Berechnet in "Wafer Out" mit Faktor 1,14 (siehe Produktionslinie-Ausbeute)
O ₂ (hochrein)	3,41E-03	kg/cm ² Wafer Out	Williams et al. 2002	2000		
Ar (Argon) (hochrein)	1,93E-03	kg/cm ² Wafer Out	Williams et al. 2002	2000		
H ₂ (hochrein)	5,23E-05	kg/cm ² Wafer Out	Williams et al. 2002	2000		
Chemikalien in der Produktion						
Schwefelsäure (hochrein)	6,04E-03	kg/cm ² Wafer Out	UMC Umweltbericht 2009	2009	UMC Taiwan & Singapore	UMC hat nur Front-End-Prozesse
Wasserstoffperoxid (hochrein)	1,68E-03	kg/cm ² Wafer Out	UMC Umweltbericht 2009	2009	UMC Taiwan & Singapore	UMC hat nur Front-End-Prozesse
Fluorwasserstoffsäure (hochrein)	4,56E-04	kg/cm ² Wafer Out	UMC Umweltbericht 2009	2009	UMC Taiwan & Singapore	UMC hat nur Front-End-Prozesse
Phosphorsäure (hochrein)	2,74E-03	kg/cm ² Wafer Out	Williams et al. 2002	2000	anonymous firm data in Westeuropa	Daten von Williams et al. bezogen auf Wafer in. Berechnet zu "Wafer Out" mit Faktor 1,14 (s. Produktionslinieausbeute)
2-Propanol (C ₃ H ₈ O)/Isopropylalkohol (IPA) (hochrein)	2,30E-03	kg/cm ² Wafer Out	Williams et al. 2002	2000		
Ammoniumhydroxid (hochrein)	8,95E-04	kg/cm ² Wafer Out	Williams et al. 2002	2000		
PFC-Verbrauch						
CF ₄	4,89E-05	kg/cm ² Wafer Out	Boyd et al. 2010b	2010	USA	Daten sind auf die Technologie mit 45nm-Strukturebereite bezogen.
CHF ₃	4,67E-06	kg/cm ² Wafer Out	Boyd et al. 2010b	2010		
NF ₃	2,49E-04	kg/cm ² Wafer Out	Boyd et al. 2010b	2010		
C ₂ F ₆	5,68E-05	kg/cm ² Wafer Out	Williams et al. 2002	2000	Anonyme Firmendaten in Westeuropa	Daten von Williams et al. bezogen auf „Wafer In“. Berechnet in "Wafer Out" mit Faktor 1,14 (siehe Produktionslinie-Ausbeute)
SF ₆	7,39E-06	kg/cm ² Wafer Out	Williams et al. 2002	2000		
Chemikalien für Abwasserbehandlung						
NaOH	1,68E-03	kg/cm ² Wafer Out	UMC Umweltbericht 2009	2009	UMC Taiwan & Singapore	UMC hat nur Front-End-Prozesse

Tabelle 20 Faktoren für die Berechnung der hochreinen Chemikalien aus Standardchemikalien (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	1,39
Ammoniumhydroxid	1,17
Fluorwasserstoffsäure	1,21

Wasserverbrauch

Bei der Datenerhebung zum Wasserverbrauch wurden teilweise sehr unterschiedliche Angaben gefunden. Die Firma UMC gibt an, sehr geringe Mengen an Wasser zu verbrauchen. Da es in Taiwan regelmäßig zu Wasserknappheit und Nutzungskonflikten zwischen Landwirtschaft und Industrie kommt, sind taiwanische Wafer-Fabs üblicherweise auf eine besonders hohe Wasserkreislaufführung ausgelegt. In der vorliegenden Studie wird die Wasserverbrauchsmenge der ITRS Roadmap 2009 herangezogen, was einen durchschnittlichen Wert der Halbleiterindustrie repräsentiert. Die Wasserverbrauchsmenge, wie sie in Plepys (2004) aufgeführt wird, liegt in einer ähnlichen Größenordnung wie in der vorliegenden Studie angenommen (Tabelle 21).

Tabelle 21 Wasserverbrauch bei der Chip-Herstellung

Quelle	Menge	Einheit/Bezugsgröße
UMC Umweltbericht 2009	0,0934	kg/cm ² Wafer Out
ITRS 2009b (in der vorliegenden Studie)	6,5	kg/cm ² Wafer Out
Williams et al. 2002	20	kg/cm ² Wafer Input
Plepys 2004: Mittelwert (300mm) von 2001 aus der Tabelle A-2	6,95	kg/cm ² Wafer Out

PFC-Emissionen

EECA-ESIA⁴⁹ (2006) berichtet, dass die folgenden Perfluorcarbone (PFC) im Fertigungsprozess im Halbleiterbereich verwendet werden: Hexafluoroethane (C₂F₆), Oktofluoropropan (C₃F₈), Tetrafluoromethane (CF₄), Oktofluorocyclobutane (c-C₄F₈), Stickstofftrifluorid (NF₃), Schwefelhexafluorid (SF₆) und Fluorchlorkohlenwasserstoffe wie Trifluoromethane (CHF₃). Die PFC-Emissionen könnten, je nachdem ob die Fabrik mit der Abgasreinigung ausgerüstet ist oder nicht, einen Unterschied von Faktor 3 aufweisen (Boyd et al. 2010b). Allerdings gibt es keine Daten zu den einzelnen PFC-Emissionen. ISMI (2011) gibt die prozentualen Massen-Anteile von NF₃, C₂F₆ und CF₄ auf der Seite der Verbrauchsmenge an. Auf Basis des aggregierten Wertes der Treibhausgasemissionen (GWP) aus PFC, wie er von ESIA vermittelt wurde, und der prozentualen Anteile in Masse-Prozent des PFC-Verbrauchs aus ISMI (2011) sowie eigener Annahme können die einzelnen PFC-Emissionen berechnet werden.

Die getroffenen Annahmen sind:

- Die Anteile der PFC-Emissionen sind gleich wie die Anteile der eingesetzten PFC-Verbrauchsmenge in Masse-Prozent.
- PFC-Emissionen betreffen NF₃, C₂F₆, CF₄, CHF₃, C₃F₈ und SF₆.
- CHF₃, C₃F₈ und SF₆ sind massenmäßig gleich verteilt, da keine Daten verfügbaren waren.

Tabelle 22 PFC-Anteile und ihre Charakterisierungsfaktoren

PFC	Anteil	Quelle	Charakterisierungsfaktoren (kg CO ₂ e.)	Quelle
NF ₃	53,0%	ISMI 2011	17200	IPCC 2007
C ₂ F ₆	13,0%		12200	
CF ₄	11,0%		7390	
CHF ₃	23%	=100%-53%-13%-11%	14800	
C ₃ F ₈			8830	
SF ₆			22800	

Ein durchschnittlicher Charakterisierungsfaktor von CHF₃, C₃F₈ und SF₆ ist 15477. Es wird berechnet nach

$$\frac{(14800 + 8830 + 22800)}{3} = 15477.$$

⁴⁹ European Electronic Component Manufacturers Association (EECA) – European Semiconductor Industry Association (ESIA)

Laut Angabe von ESIA werden insgesamt 0,3667 kg CO₂e/cm² aus PFC-Emissionen in 2007 verursacht. Die gesamte Summe der PFC-Emissionen (im Folgenden als „X“ bezeichnet) kann aus folgender Gleichung berechnet werden:

$$17200 * X * 53\% + 12200 * X * 13\% + 7390 * X * 11\% + 15477 * X * 23\% = 0,3667 \text{ kg CO}_2\text{e / cm}^2$$

Tabelle 23 PFC-Emissionen und ihre GWP-Werte

		Charakterisierungs- faktoren (IPCC2007)	PFC-Emissionen (kg/cm ²)	GWP von PFC (kg CO ₂ e/cm ²)
NF ₃	53,0%	17200	1,29E-05	2,22E-01
C ₂ F ₆	13,0%	12200	3,16E-06	3,86E-02
CF ₄	11,0%	7390	2,68E-06	1,98E-02
CHF ₃	7,7%	14800	1,86E-06	2,76E-02
C ₃ F ₈	7,7%	8830	1,86E-06	1,65E-02
SF ₆	7,7%	22800	1,86E-06	4,25E-02
Summe	100%	-	2,43E-05	3,67E-01

Die genauen PFC-Emissionen bezogen auf zwei Bezugsgrößen in den Front-End-Prozessen befinden sich in Tabelle 29 und Tabelle 30.

6.3.3 Datensatz für Back-End-Prozesse für Speicherchip

Spezifikation und Materialzusammensetzung der Speicherchip

Die Back-End-Prozesse umfassen verschiedene Packaging-Typen. Ein generischer Datensatz, der alle Packaging-Typen umfassen könnte, liegt nicht vor. Hermanns (2010) und ESIA (2010) wiesen ebenfalls darauf hin, dass es keine „typischen“ Chip-Packages einer bestimmten Bauart (Speicherchip, Logik-Chip oder Prozessor) gibt. Selbst innerhalb einer Produktgruppe, wie z.B. Notebooks, existiert eine große Variabilität bezüglich Aufbau, Herstellungsart, Größe, etc.).

Ein spezifischer Samsung Speicherchip wird in der vorliegenden Studie als Referenz für die Modellierung der Back-End-Prozesse der Speicherchip herangezogen. Samsung hat im dritten Quartal 2010 mit 40,7% und im zweiten Quartal mit 35% den größten Marktanteil des globalen DRAM-Speicher-Marktes (iSuppli 2010).

Der in der vorliegenden Studie betrachtete Speicherchip ist ein 1 GB (Giga-Byte) DDR3 (Double Data Rate 3) DRAM (Dynamic Random Access Memory) Arbeitsspeicher mit FBGA (Fine Pitch Ball Grid Array) Packaging-Typ (Tabelle 24). DRAM-Chips werden gewöhnlich in Reihe auf einem so genannten Speicherriegel zu größeren Arbeitsspeicher-Modulen verschaltet.

Tabelle 24 Spezifikation der Speicherchips

Name	Spezifikation	Quelle
Produkt-Typ	DRAM DDR3	(Samsung 2011b)
Part Nummer	Samsung K4B1G0846E-HCH9	(Samsung 2011b)
Packaging-Typ	78FBGA (Fine Pitch Ball Grid Array)	(Samsung 2011b)
Speicher	1 GB	(Samsung 2011b)
"Die" Fläche (Chip ohne Verkapselung)	43 mm ²	(Techinsights 2009)
Gewicht	0,162 g	(Samsung 2011b)

Tabelle 25 Materialdeklaration eines Speicherchips der Firma Samsung

Material	Menge	Einheit
Polymer	1,06E-05	kg
SiO ₂	4,75E-05	kg
Au	2,08E-07	kg
Si (Anmerkung: Herstellung wurde unter Front-End-Prozessen berücksichtigt)	2,37E-05	kg
Carbon Black	1,59E-07	kg
Ag	6,79E-07	kg
Cu	1,36E-07	kg
Sn	2,63E-05	kg
BT-Core+Cu+Au+Ni (BT: Bismaleimide-triazine)	5,26E-05	kg
Summe	1,62E-4	kg

Energieverbrauch

Die in der Literatur vorhandenen Angaben zum Energieverbrauch in Back-End-Prozessen sind in Tabelle 26 zusammengefasst. In der im Rahmen der Ökodesign-Richtlinie (EuP) erstellten Studie „*MEEUP Methodology Report*“ wurde angenommen, dass der Energieaufwand für Back-End-Prozesse etwa 25% des Aufwandes der Front-End-Prozesse entspricht. Laut der persönlichen Mitteilung der Firma ASE⁵⁰ machen die Back-End-Prozesse ca. 30% des Gesamtenergieaufwandes aus. Auf der anderen Seite gibt ESIA (2010) an, dass das Packaging ca. 25%–37% des Gesamtenergieaufwands ausmacht. Aufgrund der heute existierenden Vielfalt an Packaging-Typen (ca. 20 bis 30 Varianten) ist diese Spanne durchaus verständlich.

Zudem ist bei einer prozentualen Verteilung über den gesamten Fertigungszyklus wie schon betont auch die Chip-Fertigung selbst sehr unterschiedlich. In der vorliegenden Studie wird daher sehr pragmatisch der von ESIA vermittelte Mittelwert (31%) für die Back-End-Prozess berücksichtigt. Die genauen Werte für den Energieverbrauch sind in Tabelle 27 aufgeführt.

⁵⁰ Advanced Semiconductor Engineering (ASE) ist ein taiwanesischer Halbleiterhersteller und eines der größten Unternehmen im Bereich der Chip-Packaging.

Tabelle 26 Überblick über die Abschätzungen zum Energieaufwand für Back-End-Prozesse

Quelle	Spezifikation
MEEuP Report 2005	25% der Front-End-Prozesse
ASE (persönliche Mitteilung) 2010	30% des Gesamtenergieaufwandes
ESIA 2010	25%-37% des Gesamtenergieaufwandes
In der vorliegenden Studie (Mittelwert von ESIA 2010)	31%

Tabelle 27 Energieinput im Back-End-Prozesse

Energie Input	Menge	Einheit
Strom	0,55	kWh/cm ² fehlerfreie Chip
Erdgas	0,07	kWh/cm ² fehlerfreie Chip

6.3.4 Ergebnisse der Datensätze

Die Ergebnisse der in der vorliegenden Studie beschriebenen Datensätzen werden in ProBas unter <http://www.probas.umweltbundesamt.de/php/index.php> veröffentlicht. Diese Datensätze befinden sich auch in nachfolgenden Tabellen:

Tabelle 28 Input- und Outputdaten für den Datensatz „Silizium-Wafer-Herstellung⁵¹“

Input			Output ⁵²		
Strom	3,85E-01	kWh	polierte Wafer	1	cm ² (=1,81E-4 kg)
Siliziumdioxid	4,87E-03	kg	Abgasemissionen		
			CO ₂ ()	8,33E-03	kg
Holzschnitzel (Zur Energiebereitstellung)	1,83E-03	kg	CO	1,67E-04	kg
Holzkohle (Zur Energiebereitstellung)	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
			Wasserstoff	1,25E-04	kg
			Abfälle		
			SiO ₂	1,63E-05	kg
			Abwasser		
			Metallchloride ()	7,87E-04	kg
			Koppelprodukte: Silizium-Reste	4,50E-03	kg

⁵¹ Die Emissionen sind keine direkten Emissionen, s. Abbildung 11. Die Zuordnung der Emissionen nach Umweltmedien beruht auf eigene Annahmen.

⁵² Die Zuordnung der Emissionen nach Umweltmedien beruht auf eigene Annahmen.

Tabelle 29 Input- und Outputdaten für den Datensatz „IC-Fertigung-Front End Prozess\Wafer Out“ (direkte Emissionen)

Inputs			Outputs ⁵³		
Silizium-Wafer	1,14E+00	cm ²	Fertiger Wafer Out	1,00E+00	cm²
Strom	1,05E+00	kWh	HFC-23 (Trifluormethan) (Abgasemissionen)	1,86E-06	kg
Gas	1,30E-01	kWh	perfluorethan (C ₂ F ₆) (Abgasemissionen)	3,16E-06	kg
Wasser	6,50E+00	kg	Tetrafluormethan (CF ₄) (Abgasemissionen)	2,68E-06	kg
N ₂ (hochrein)	5,00E-01	kg	Perfluorpropan (C ₃ F ₈) (Abgasemissionen)	1,86E-06	kg
O ₂ (hochrein)	3,41E-03	kg	SF ₆ (Abgasemissionen)	1,86E-06	kg
Ar (Argon) (hochrein)	1,93E-03	kg	Stickstofftrifluorid (NF ₃) (Abgasemissionen)	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			

⁵³ Die Zuordnung der Emissionen nach Umweltmedien beruht auf eigene Annahmen. Abfälle und Abwasser konnten wegen fehlenden Daten nicht erfasst werden.

Tabelle 30 Input- und Outputdaten für den Datensatz „IC-Fertigung-Front End Prozess\“good die out“ (direkte Emissionen)

Inputs			Outputs ⁵⁷		
Silizium-Wafer	1,38E+00	cm ²	„good die out“	1,00E+00	cm ²
Strom	1,27E+00	kWh	HFC-23 (Trifluormethan) (Abgasemissionen)	2,26E-06	kg
Gas	1,60E-01	kWh	perfluorethan (C ₂ F ₆) (Abgasemissionen)	3,84E-06	kg
Wasser	7,88E+00	kg	Tetrafluormethan (CF ₄) (Abgasemissionen)	3,25E-06	kg
N ₂ (hochrein)	6,06E-01	kg	Perfluorpropan (C ₃ F ₈) (Abgasemissionen)	2,26E-06	kg
O ₂ (hochrein)	4,13E-03	kg	SF ₆ (Abgasemissionen)	2,26E-06	kg
Ar (Argon) (hochrein)	2,34E-03	kg	Stickstofftrifluorid (NF ₃) (Abgasemissionen)	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 31 Input- und Outputdaten für den Datensatz „IC-Fertigung-Back End Prozess“ (direkte Emissionen)

Input			Output ⁵⁴		
Strom	2,46E-01	kWh	Speicherchip ⁵⁵	1,00E+00	Stück (= 0,162g)
Erdgas	3,05E-02	kWh			
Unverkapselter Chip mit 43mm ² (Silizium) (s. Tabelle 24)	2,37E-05	kg			
Polymer	1,06E-05	kg			
SiO ₂	4,75E-05	kg			
Au	2,00E-07	kg			
Carbon Black	2,00E-07	kg			
Ag	7,00E-07	kg			
Cu	1,00E-07	kg			
Sn	2,63E-05	kg			
BT-Core (Bismaleimide- triazine)+Cu+Au+Ni	5,26E-05	kg			

6.3.5 Datenqualitätsanalyse

Die wesentlichen Informationen und Daten, die für die Auswertung der in dieser Studie untersuchten ICs notwendig waren, lagen vor. Eine gewisse Einschränkung der Datenvollständigkeit besteht hinsichtlich des Materialverlusts im Back-End Prozess sowie hinsichtlich der Abfallmengen entlang der gesamten Wertschöpfungskette der ICs. Es ist davon auszugehen, dass diese Materialverluste vernachlässigbar sind.

Der Energieverbrauchswert zur Herstellung des Silizium-Wafers stammt aus den Daten von Williams et al. (2002). Diese Daten dienen immer noch als Referenz in den aktuellsten Studien aus den Jahren 2009 oder 2010. Das würde aber bedeuten, dass die in dieser Studie vorgelegten Produktionsdaten für Silizium bezogen auf 300 mm Silizium-Wafer von den Daten der Williams et al. (2002) Studie abweichen, da dort möglicherweise 200 mm Silizium-Wafer untersucht wurde.

Der Stromverbrauch bei der IC-Fertigung des Front-End stammt aus der ESIA (2010) und bezieht sich auf das Jahr 2007. Die Technologiegeneration zu diesem Zeitpunkt lieferte Strukturbreiten von 60 nm (Boyd et al. 2010b). Die Wafer-Größe beträgt nach eigener Abschätzung 300 mm im Jahr 2007.

Darüber hinaus repräsentiert der Back-End-Datensatz nur den Packaging-Typ FBGA (Fine Pitch Ball Grid Array).

⁵⁴ Abgasemissionen, Abfälle und Abwasser konnten wegen fehlenden Daten nicht erfasst werden.

⁵⁵ Blei ist in der Material-Deklaration nicht aufgeführt. Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass Blei in geringen Mengen im Rahmen von bestehenden RoHS-Ausnahmen enthalten ist.

Insgesamt können die Datenqualität und die Datensymmetrie der Sachbilanz als gut eingestuft werden. Zu betonen ist, dass bisher keine differenzierten Datensätze für Front-End und Back-End verfügbar waren. Mit dieser Studie können zum ersten Mal frei zugängliche, transparente und ausreichend dokumentierte Datensätze für Front-End- und Back-End-Prozesse in ProBas veröffentlicht werden.

7 Datensatz für wiederaufladbare Lithium-Batterien: Weiteres Vorgehen

Neben Motherboard und Bildschirm tragen wiederaufladbare Lithium-Batterien wesentlich zu den Umweltauswirkungen eines Notebooks bei (siehe Abbildung 4; O'Connell & Stutz 2010). Daher ist es notwendig, die lebenszyklusbezogenen Daten zu wiederaufladbare Lithium-Batterien zu erheben bzw. zu verbessern.

Der Begriff „Batterie“ repräsentiert den Zusammenschluss ein oder mehrerer „Zellen“ (Abbildung 14), wobei die „Zelle“ eine zur Umwandlung von chemischer in elektrische Energie vorhandene Einheit darstellt (Lauwigi et al. 2011). Im allgemeinen Sprachgebrauch werden die wiederaufladbaren Lithium-Batterien als „Lithium-Akkus“ bezeichnet.



Abbildung 14 Wiederaufladbare Lithium-Batterie eines Notebooks (Öko-Institut 2011)

Lithium-Akkus werden überwiegend in den zwei Bereichen Mobiltelefone und Notebooks eingesetzt. Weitere Hauptanwendungsgebiete sind Camcorders und Digitalkameras. Hinzu

kommen Anwendungen in schnurlosen Werkzeugen, Media-Playern und weiteren tragbaren Geräten. Einen sehr kleinen Marktanteil innerhalb der Lithium-Akkus haben zudem Knopfzellen (Lauwigi et al. 2011). Kleinere Lithium-Akkus, wie sie in Mobiltelefonen und Kameras verwendet werden, bestehen meist aus nur einer prismatischen Zelle, wie sie beispielhaft in Abbildung 15 dargestellt ist. Größere Lithium-Akkus zur Verwendung in Notebooks oder schnurlosen Elektro-Werkzeugen bestehen dagegen aus mehreren, in Reihe und/oder parallel geschalteter Zellen. Diese Zellen können sowohl eine wie in Abbildung 15 dargestellte prismatische Bauform oder aber eine zylindrische Bauform besitzen (Abbildung 14) (Lauwigi et al. 2011). Manche Notebooks sind mit einem 6-Zellen-Akku, andere mit einem 8-Zellen-Akku ausgestattet. Mittlerweile gibt es auch Akkus mit 9 Zellen.

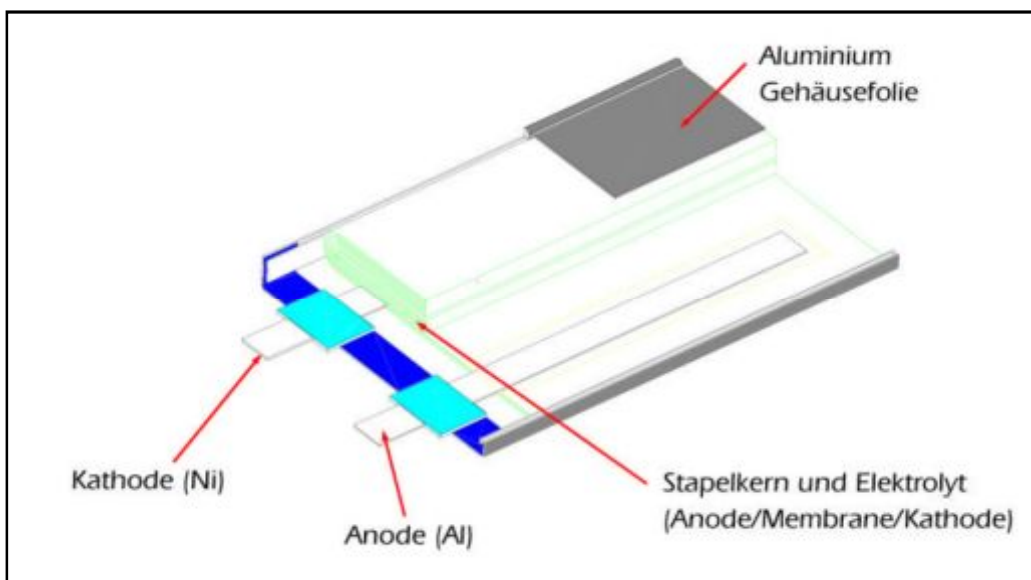


Abbildung 15 Aufbau eines prismatischen Li-Polymer-Akkus

(Quelle: Lauwigi et al. 2011; <http://forum.xufo.net/res/dawidi/lipofaq/Lipo-Hinweise.pdf>)

Tabelle 32 gibt die technischen Parameter ausgewählter Akkus an, die in Notebooks mit einer Bildschirmgröße von 15,4 Zoll eingesetzt werden. Die Spannung (V) der ausgewählten Akkus liegt zwischen 10 W und bis 14.8 W. Es handelt sich um Akkus, die entweder 6 oder 8 Zellen enthalten. Ein Akku-Pack mit 8 Zellen wiegt ca. 450 Gramm.

Tabelle 32 Technische Parameter von Beispiellaptops mit 15,4" Bildschirm

Hersteller	Referenz Laptop Model (alle mit 15,4")	Bildschirm-Auflösung	Zellen	Kapazität (mAh)	Energie (Wh)	Spannung (V)	Gewicht (kg)
Fujitsu	ESPRIMO Mobile D9510 Notebook	1680 x 1050	6	5200	57	10,96	k.A.
Acer	TravelMate 5530/5530G	1280 x 800	6	4400	48,8	11,09	k.A.
HP	Compaq 8510p Notebook	1680 x 1050	8	5100	73	14,4	0,445
Acer	TravelMate 8103WLMi	1680x1050	8	4800	71	14,8	0,439

Es gibt eine Vielzahl von Materialien für die Elektroden und eine Vielzahl von Kombinationsmöglichkeiten. Je nach verwendetem Material haben die Zellen unterschiedliche Gebrauchseigenschaften. Marktbeherrschend ist derzeit bei Lithium-Akkus für portable Geräte die Elektrodenkombination Graphit/LiCoO₂. Zusätzlich zu Kobalt kommen bei einigen Typen auch weitere Metalle (Nickel, Mangan, Aluminium) zum Einsatz. Unterschieden werden weiterhin die Bautypen hinsichtlich ihrer Geometrie und dem Zelldesign. Es gibt Rundzellen, prismatische (rechteckige) Zellen mit einem festen Gehäuse und prismatische Zellen mit einer Aluminium-Verbundfolie anstelle eines festen Gehäuses (Lauwigi et al. 2011).

Die Informationen über die Herstellungsprozesse der Lithium-Batterien unterliegen der Geheimhaltung der Hersteller. Daher sind bisher wenige bis gar keine Datensätze zur Berechnung der Ökobilanzen der Lithium-Batterien vorhanden. In der im Rahmen der Ökodesign-Richtlinie durchgeführten Vorstudie (Lot 3 Computer und Monitore) wurden zur Bilanzierung eines Notebook-Akkus die Datensätze des Kondensatoren und der Spule herangezogen. Die Ökodesign Vorstudie zu Computern und Monitoren (Lot 3) sagt:

*„This indicates that the motherboard including the processor and the battery also are relevant improvement areas. Since the lithium ion battery was approximated to **big caps and coils**, which was the least bad assumption available, this improvement area needs further validation“.*

Es gibt eine aktuelle Ökobilanz der Produktion eines Lithium-Akkus mit einer LiMn₂O₄-Elektrode für die Anwendung in Elektrofahrrädern aus 2009 (Kapazität 2,1 kWh). Diese Daten sind in der Datenbank „Ecoinvent“ verfügbar [EI 2.2]. Für die Hauptanwendungsfelder Mobiltelefone und Laptops kommen jedoch vorrangig Systeme mit Lithium-Kobalt-Elektroden zum Einsatz (Lauwigi et al. 2011).

Auf der anderen Seite gibt es ein paar wenige Studien über die Umweltauswirkungen von Lithium-Ionen-Akkus für Elektroautos (Notter et al. 2010).⁵⁶ Darüber, ob eine Skalierung eines Lithium-Ionen-Akkus für Elektroautos auf ein Notebook-Akku sinnvoll ist, herrscht keine Einigkeit in der Expertengemeinschaft. Auf der einen Seite kann es zur Komplexitätsreduktion führen und aufgrund der noch sehr lückenhaften Informationen über die Herstellungsprozesse; nicht zuletzt weil sich die Anteile der Gehäuse usw. teilweise proportional verhalten, sich als nützliche Informationen erweisen. Auf der anderen Seite warnen die Experten vor solchen Ansätzen, denn die Materialzusammensetzung sowie die zugrunde gelegte Technologie zur Herstellung der Lithium-Batterien für Elektroautos und für mobile Geräte sind doch sehr unterschiedlich. Einigkeit herrscht aber darüber, dass eine direkte und genaue Untersuchung von Notebook-Akkus, wenn möglich, viel zielführender wäre.

Eine weitere Herausforderung bei der Erstellung des Datensatzes für Lithium-Akku ist die Definition der funktionellen Einheit, um unterschiedliche Batterietypen miteinander vergleichen zu können. Folgende Parameter könnten dabei eine Rolle spielen, diese müssen aber zunächst genauer geprüft werden:

- Energieeffizienz (Energie-Input vs. Energie-Output),
- Zyklusfestigkeit,
- Kapazität,
- Energiedichte,
- Gewicht.

Welche Herausforderung mit der Definition einer funktionellen Einheit verbunden sein könnte, wird von Lauwigi et al. (2011) am Beispiel der Zyklusfestigkeit gezeigt. Für die Bestimmung der Lebensdauer der wiederaufladbaren Lithium-Batterien ist entscheidend zu messen, nach wie vielen Be- und Entladezyklen die Kapazität signifikant abnimmt. Die DIN EN 61960 [DIN EN 61960:2004] sieht einen Zyklentest vor, der dieses Verhalten abbildet. Die Haltbarkeit wird in dieser Norm sowie im Normentwurf alternativ bei zwei unterschiedlichen Zyklen ermittelt. Einmal wird mit einem Strom von 0,2 C bei 20 C wiederholt entladen, beim beschleunigten Prüfverfahren mit 0,5 C.⁵⁷ Die Batterien (Verbund aus mehreren Zellen) müssen mindestens 300 Zyklen leisten, bis die Kapazität unter 60% der Nennkapazität fällt. Bei Zellen sind mindestens 400 Zyklen gefordert (Lauwigi et al. 2011). Das Laden erfolgt allerdings nach Herstellerspezifikation.

⁵⁶ Contribution of Li-Ion Batteries to the Environmental Impact of Electric Vehicles», D.A. Notter, M. Gauch, R. Widmer, P. Wäger, A. Stamp, R. Zah, H.J. Althaus, Environmental Science & Technology, 9. August 2010, DOI: 10.1021/es903729a

⁵⁷ Die Lade- und Entladeströme werden u.a. als C-Koeffizient angegeben. Wenn der Koeffizient 1C beträgt, kann bei einer Bemessungskapazität von 1000mAh mindestens ein Strom von 1000mA während einer Stunde abgegeben werden. Wenn dieselbe Batterie mit 0,5C entladen wird, soll sie mindestens 500mA während 2 Stunden abgeben. Bei 2C liefert die 1000mAh Batterie mindestens 2000mA während 30 Minuten (Lauwigi et al. 2011).

Bei Notebooks kommen wegen der hohen Anforderungen an die Energiedichte Batterien zum Einsatz, die nach Herstellerangaben bei den in der Praxis üblichen Entladeströmen von 0,2 – 0,4 C 800 – 1.000 Zyklen erreichen (Lauwigi et al. 2011). Die Praxis zeigt allerdings, dass die Kapazität der Notebooks sogar nach 200 bis 300 Zyklen deutlich abnehmen bzw. das Ende der Lebensdauer der Batterien erreicht werden könnte (Lauwigi und Giegrich, 2011).⁵⁸ Bei einer Prüfung mit 1.000 Zyklen bei 0,2 C würde jedoch alleine das Entladen 5.000 h bzw. rund 7 Monate dauern. Daher sind nur die Herstellerangaben die einzige Informationsquelle für die Zyklenfestigkeit.

Theoretisch könnte der Ladestrom für die Messungen auf 1 C erhöht werden. Laut Lauwigi et al. (2011) ist jedoch zu berücksichtigen, dass bei einem erhöhten Ladestrom die Anzahl der erreichten Zyklen deutlich absinkt, weil hohe Ladeströme die Alterung begünstigen. Abschätzungen der Hersteller gehen davon aus, dass eine Zyklenzahl von 400 bei einer Entladung von 1 C bereits eine ambitionierte Zielvorgabe für typische Notebook-Akkus ist (Lauwigi et al. 2011). So fordert die derzeit gültige Fassung des skandinavischen Umweltzeichens Nordic Swan [Nordic Ecolabel 2002] 400 Zyklen bei einer verbleibenden Kapazität von mindestens 80%.

Genauere Bestimmung der Zyklenfestigkeit ist entscheidend, um nicht nur Potenziale zur Lebensdauerverlängerung zu identifizieren, sondern auch Ressourceneinsparpotenziale.

Zusammengefasst gibt es noch keine transparente und veröffentlichte Datengrundlage für die Notebook-Akkus. Überwiegend werden in Ökobilanzen von Notebook-Akkus Datensätze zu Akkus für Elektroautos als Grundlage benutzt und entsprechend auf die benötigte Akkugröße skaliert.

Es ist dringend empfohlen, die Primärdaten zu den Herstellungsprozessen zu Notebook-Akkus zu erheben, um einerseits den Produktionsaufwand sowie technische Parameter besser zu verstehen und andererseits eine zuverlässige Datengrundlage zu bilden. Die im Rahmen dieser Studie entstandenen Kontakte mit den Akkuherstellern sowie mit den Endgeräteherstellern, die Akkus für ihre Produkte benötigen, stellen dafür eine gute Grundlage zur Ermittlung spezifischer Daten für Akkus für den Elektroniksektor dar.

⁵⁸ Lauwigi, C.; Giegrich, J. (2011): Erstellung eines Datensatzes zum Li-Ion- Akku, Vortrag auf der Expertenrunde „Schaffung einer Datenbasis zur Ermittlung ökologischer Wirkungen der Produkte der IKT“ im Rahmen des Ufoplanvorhabens 2009 Ressourcenschonung im Aktionsfeld Informations- und Kommunikationstechnik (IKT), 06. Mai 2011, Berlin

8 Schlussforderung und weiterer Forschungsbedarf

Im Rahmen dieser Studie wurden Datensätze für Bildschirm-Module und Speicherchips (Memory ICs) aufbereitet und dokumentiert. Bei der Datenerhebung und -aufbereitung wurden wichtige Erkenntnisse gewonnen, die im Rahmen dieser Studie nicht verfolgt werden konnten, jedoch einen weiteren, interessanten Forschungsbedarf darstellen:

Bildschirm-Modul

- CCFL- und TN-Technologien werden in den kommenden Jahren durch die technologischen Weiterentwicklungen, sprich LED-Hintergrundbeleuchtung und IPS Panels, ersetzt. Eine Studie des Marktforschungsinstituts Display Search bestätigt, dass der Marktanteil von Notebooks mit LED-Hintergrundbeleuchtung von 36% im ersten Quartal 2009 auf 82% im ersten Quartal 2010 zugenommen hat. Es wird prognostiziert, dass Notebooks mit LED-Hintergrundbeleuchtung ab 2011 einen Marktanteil von nahezu 100% haben werden. Im nächsten Schritt sollte daher ein Datensatz für Bildschirm-Modul mit LED-Hintergrundbeleuchtung erstellt werden. Denn LEDs repräsentieren den Bereich der Zukunftstechnologien, die auf den Einsatz der seltenen Erden angewiesen sind, deren Abbau mit erheblichen Umweltrisiken verbunden ist (Schüler et al. 2011).
- Die Fab-Generation und damit u.a. die Größe des Mutterglases sind für die Produktivitätseffizienz ausschlaggebend und somit direkt verantwortlich für den Energieverbrauch und die materiellen Inputflüsse. Zur Verbesserung der Lebenszyklusdaten bzw. zur Formulierung von Product Category Rules (PCR) für Bildschirm-Module ist es unabdingbar, diesen technologischen Hintergrund zu erfassen.
- Parametrisierung bzw. auch Skalierbarkeit der Lebenszyklusdaten, entweder auf der Ebene der Sachbilanzdaten und/oder auf der Ebene der Wirkungskategorien, ist ein Schritt von sehr hoher Bedeutung mit Blick auf die Reduzierung des Kosten- und Zeitaufwandes bei der Aufbereitung der Lebenszyklusdaten zu IKT-Produkten. Im Fall von Bildschirmen kann die Frage, ob und wie die Sachbilanzdaten bei Bildschirmen je nach der Größe umgerechnet werden können, immer noch nicht beantwortet werden. Der Datensatz in der vorliegenden Studie beschreibt eine Bildschirmgröße mit 15,4 Zoll. Es gibt noch keine Hinweise, ob es zulässig ist, über Gewicht und/oder Größe des Bildschirms Sachbilanzdaten zu Bildschirmen anderer Größe bzw. Gewicht umzurechnen. Chen (2010) wies darauf hin, dass die Produktion des LCD-Moduls sowohl die Herstellung einer LCD-Zelle als auch das so genannte Assembly eines LCD-Moduls umfasst. Innerhalb einer gleichen Fab-Generation liegt der Produktionsaufwand der LCD-Zelle mit der Flächengröße noch in einem proportionalen Verhältnis, allerdings ist auch hier der Zusammenhang nicht 100% linear. Hinweise über die unterschiedlichen Produktionsaufwendungen und deren Verhältnis zueinander innerhalb von zwei oder

mehr Generationen liegen nicht vor. In Bezug auf das Bildschirm-Modul (vor der Montage) kommen noch die Hintergrundbeleuchtung und Gehäuse-/Rahmenmaterialien sowie integrierte Elektronik hinzu, die allesamt nicht über die Größe des Bildschirms skaliert werden können, selbst wenn das Panel aus der gleichen Fab-Generation stammt. Geeignete Skalierungsgrößen für das komplette LCD-Modul sind derzeit nicht öffentlich verfügbar und bedürfen noch einer eingehenden Analyse.

- King County Solid Waste Division (2008) berichtet, dass Indium-Zinn-Oxid (ITO) inhalativ mäßig toxisch und reizend sein könnte. Allerdings sind die vorhandenen Daten nicht ausreichend. Weitere Forschung hinsichtlich der Toxizitätsbewertung (Human- und Ökotoxizität) wird daher empfohlen.
- Daten über den Rohstoffinput sind derzeit nicht abgesichert, insbesondere auch zu den Abbauprozessen, aber auch zu den energieintensiven Verarbeitungsprozessen. Bei neuen Technologien, wie z.B. Produkte mit berührungsempfindlichen oder 3-D Bildschirmen (Smartphones, Tablet PCs usw.), kommen die kritischen Rohstoffe zunehmend zum Einsatz. Es gilt daher, die Energie- und Materialdaten dieser Prozesse genauer zu untersuchen.
- Daten über die Fluorierte-Gase sind nicht abgesichert. Die Faktoren, wie Prozessführung, Abgasreinigung, Art des Prozesses und des eingesetzten Gases, sind relevant und sollen näher untersucht werden. Außerdem sollen Forschungsaktivitäten bezüglich alternativer, weniger umweltschädlichen Chemikalien, Möglichkeiten der Prozessoptimierungen sowie Recycling und Abluftreinigung ausgebaut werden.

ICs

- Es ist von hoher Relevanz, eine angemessene und einheitliche Bezugsgröße für die Chip-Herstellung zu identifizieren. Wie in diesem Bericht bereits dargestellt wurde, gibt es zurzeit verschiedene Bezugsgrößen, wie pro „die“, pro „good die“, pro cm² Wafer Input, pro cm² Wafer Output, usw. Das erschwert den Vergleich sowie die Anwendung der Datensätze. Eine Vereinheitlichung der Bezugsgröße ist eine Herausforderung, nicht zuletzt, weil die dafür notwendigen Informationen betriebsintern gehalten und selten nach außen kommuniziert werden. Die in der vorliegenden Studie gewonnenen Erkenntnisse weisen darauf hin, dass im ersten Schritt eine Untersuchung über das mögliche Verhältnis zwischen Produktionsaufwand und technologischen Parametern wie Masken- und Metallisierungsschritte, Ausbeute und Strukturbreite erfolgen soll, um einer einheitlichen Bezugsgröße für die Chip-Herstellung näherzukommen.
- Back-End Prozesse in der Chip-Herstellung müssen intensiver bezüglich unterschiedlicher Packaging-Typen erforscht werden.
- Die Datenlage zu Verbrauchsmengen von Wasser und Chemikalien, insbesondere bei Back-End Prozessen, sollte noch verbessert werden, denn die Hilfs-/Betriebsstoffe konnten in der vorliegenden Studie nicht erfasst werden.

- Bezüglich des höheren Produktionsaufwandes für die Herstellung der hochreinen Chemikalien im Vergleich zur Herstellung von Standardchemikalien wurden in der vorliegenden Studie Faktoren nach Higgs et al. (2010) angegeben. Diese stellen bisher die alleinige Informationsquelle zum Produktionsaufwand von hochreinen Chemikalien dar. Allerdings beschreiben Higgs et al. (2010) nicht die Produktionsverfahren der Standardchemikalien. Das bedeutet, dass die Ausgangsbasis zur Ermittlung des Produktionsaufwandes der hochreinen Chemikalien noch unklar ist. Ebenfalls sind die Stoffverluste aufgrund mehrstufiger Reinigungsprozesse nicht bekannt.
- Die Unterschiede in den ICs bezogen auf Produktions- und Materialaufwand sowie Ausbeutequote sind auf ihre verschiedenen Funktionen und die damit verbundene Komplexität zurückzuführen. Das betrifft vor allem die Herstellung komplexer Prozessor-, Logik-, Grafik-, Speicher- und Netzwerk-Chips. Daher sind weiterführende Untersuchungen zu unterschiedlichen Halbleiterbauelementen und damit verbundenen Umweltauswirkungen für eine vollständige Bewertung von IKT- und Elektronikprodukten essentiell.
- Fabs mit und ohne Nachreinigung der PFC-Emissionen weisen unterschiedliche Sachbilanzergebnisse auf. In der vorliegenden Studie ist ein durchschnittlicher Wert aus ESIA (2010) entnommen. Allerdings ist es empfehlenswert, Fabs mit und ohne Nachreinigung zu unterscheiden, um ggf. die Verbesserungsmaßnahmen bezüglich einer Reduzierung der Umweltauswirkungen abzuleiten.
- Die Produktionsdaten zur Herstellung des Silizium-Wafers müssen aktualisiert werden. Die bisherigen Daten basieren auf der Studie William et al. (2002) und William (2000). Der in diesen Studien zugrunde liegende technische Hintergrund bildet nicht mehr den heutigen Stand der Technik ab, wie z.B. beim Durchmesser des Wafers.
- Daten über den Rohstoffinput sind derzeit nicht abgesichert, insbesondere auch zu den Abbauprozessen, aber auch zu den energieintensiven Verarbeitungsprozessen. Bei neuen Technologien, wie z.B. Gallium basierenden Halbleiterwerkstoffe Galliumarsenid (GaAs) und Galliumnitrid (GaN), kommen die kritischen Rohstoffe zunehmend zum Einsatz. Es gilt daher, die Energie- und Materialdaten dieser Prozesse genauer zu untersuchen.
- Daten über die Fluorierte-Gase sind nicht abgesichert. Die Faktoren, wie Prozessführung, Abgasreinigung, Art des Prozesses und des eingesetzten Gases, sind relevant und sollen näher untersucht werden. Außerdem sollen Forschungsaktivitäten bezüglich alternativer, weniger umweltschädlichen Chemikalien, Möglichkeiten der Prozessoptimierungen sowie Recycling und Abluftreinigung ausgebaut werden. Sinnvoll erscheint eine Untersuchung der Plausibilität der selbstverpflichtenden Maßnahmen der Halbleiterindustrie bezüglich der Emissionsminderung der F-Gase.

Das Ziel der Studie war es, belastbare Sachbilanzdatensätze für Bildschirm-Modul und Integrierte Schaltungen (ICs), also für zwei Hauptkomponenten, die einen entscheidenden

Anteil an den Gesamtumweltauswirkungen eines Notebooks haben, zu erstellen. Mit der Studie sollte ein Beitrag für die Verbesserung der Datenlage zu den oben genannten Komponenten geleistet werden, damit in der Zukunft Ressourcenschonungspotenziale im Aktionsfeld IKT zuverlässig ermittelt werden können. Außerdem sollen diese Ergebnisse als Referenzpunkt für die weiteren ökobilanziellen Berechnungen zu IKT-Produkten dienen und helfen, eine gewisse Vergleichbarkeit und Transparenz in den Ökobilanzergebnissen zu IKT-Produkten zu gewährleisten.

Im Rahmen dieser Studie wurden insgesamt fünf Datensätze aufbereitet. Diese umfassen zwischen 21% (Prakash et al. 2011) und 43% (O'Connell und Stutz 2010) der Treibhausgasemissionen eines Notebooks. Es gibt noch weitere Komponenten bzw. Baugruppen, z.B. die komplett bestückte Hauptplatine (Motherboard) und das Batteriesystem (Akku), die einen erheblichen Anteil an den Gesamtumweltauswirkungen eines Notebooks haben. Für eine umfassende Analyse der Umweltauswirkungen der Notebooks sollte die Lebenszyklusdatenerhebung auch für das Motherboard und den Akku durchgeführt werden. Dabei wäre es wichtig, die Datenerhebung auf diejenigen Input- und Outputprozesse zu beschränken, die auch aus Umwelt- und Rohstoffsicht eine hohe Bedeutung haben. Neben den Herstellungsprozessen spielt daher die angemessene Berücksichtigung der Recycling- / Entsorgungsphase eine wichtige Rolle.

An dieser Stelle muss angemerkt werden, dass auch eine Erhebung der Lebenszyklusdaten nur für die aus Umwelt- und Rohstoffsicht wichtigeren Prozesse mit einem hohen Kosten- und Zeitaufwand verbunden sein wird. Es kann davon ausgegangen werden, dass dies für die oben genannten Komponenten Motherboard und Akku der Fall sein wird. Zudem müssen die Lebenszyklusdaten aufgrund extrem kurzer Produktlebenszyklen, raschem Technologiewechsel und hoher Innovationsgeschwindigkeit der IKT-Branche kontinuierlich aktualisiert und geprüft werden. Mittel- bis langfristig wäre es deshalb sinnvoller, eine allgemein akzeptierte und transparente standardisierte Ökobilanzmethodik für verschiedene IKT-Komponenten zu entwickeln. Dabei sollen die Auswahl der Systemgrenzen und die Dokumentation der Ergebnisse nachvollziehbar und transparent sein. Solche methodischen Ansätze haben den Vorteil, dass sie zu einer besseren Vergleichbarkeit von Ökobilanzergebnissen beitragen und somit eine fundierte Entscheidungsgrundlage im Hinblick auf die Realisierung der Umweltentlastungs- und Ressourcenschonungspotenziale bieten können. Mittel- bis langfristig können diese Standardisierungsansätze zu den Product Category Rules (PCR) für die jeweiligen Komponenten beitragen.

Ein weiterer Vorteil der methodischen Harmonisierung der Ökobilanzmethodik zu IKT-Komponenten wäre die erhöhte Sicherheit bei Fragen im Hinblick auf den Ersatz von IKT-Geräten. Momentan ist es ungewiss, wann es aus ökologischen Gesichtspunkten Sinn macht, ein altes IKT-Gerät durch ein neues zu ersetzen. Innovationsgeschwindigkeit und sinkende Preise für IKT führen zurzeit dazu, dass die IKT-Geräte eine immer kürzere nützliche Lebensdauer haben. Beispielsweise zeigt die Konsumforschung, dass Notebooks im

Durchschnitt bereits alle drei Jahre durch neue ersetzt werden. Oft wird der zeitoptimierte Ersatz der IKT-Geräte mit dem Argument gefördert, dass die neue Generation in der Nutzungsphase im Vergleich zu der vorherigen deutlich effizienter ist und sich der Kauf in wenigen Jahren amortisiert. Dabei bleiben aber die Umweltauswirkungen der Herstellungsphase bei der Kaufentscheidung leider unberücksichtigt. Gerade bei IKT-Geräten wie Notebooks, wo die Geräte schon jetzt auf hohe Energieeffizienz ausgelegt sind, werden keineswegs solche Effizienzsprünge innerhalb von zwei Generationen erwartet, die den Tausch des alten Gerätes nach drei Jahren rechtfertigen. Bei Notebooks beispielsweise lohnt sich eher die Frage, wie effizient das neue Gerät sein muss, damit sich der Ersatz des alten nach drei Jahren aus ökologischen Gesichtspunkten rechtfertigt. Solche Fragen sind zurzeit aufgrund unterschiedlicher Datengrundlagen und nicht ausreichend dokumentierten Prozessen in der Herstellungsphase schwer zu beantworten. Mit Hilfe einer standardisierten Ökobilanzmethodik und einer ausreichenden Berücksichtigung der Herstellungsphase könnte man mit höherer Genauigkeit und Richtungssicherheit ermitteln, wann und unter welchen Bedingungen es aus ökologischen Gesichtspunkten sinnvoll ist, alte IKT-Geräte durch neue zu ersetzen.

9 Literatur

- Apple 2010 Apple Environmental Report 2010, Online unter <http://www.apple.com/de/environment/reports/>, Zugriff am 05.08.2010
- Andrae und Anderson 2010 Andrae, A.S.G.; Anderson, O.; Life Cycle Assessment of Consumer Electronics; International Journal of Life Cycle Assessment, Vol. 15, No. 8, 827–836, 2010,
- Becker und Vollmer 2010 Becker, W.; Vollmer, G.; „Product Carbon Footprint, Liquid Crystal Mixtures“, Presentation am UBA Expert-Runde, 21.09.2010
- Behrendt et al. 2008 Behrendt, S.; Scharp, M.; Kahlenborn, W.; Feil, M; Dereje, C.; Bleischwitz, R.; Delzeit, R.; Seltene Metalle, Maßnahmen und Konzepte zur Lösung des Problems konfliktverschärfender Rohstoffausbeutung am Beispiel Coltan, Umweltbundesamt, UBA Texte 08/07
- Boyd et al. 2009a Boyd, S.; Horvath, A.; Dornfeld, D.; Life Cycle Energy Demand and Global Warming Potential of Computational Logic, Environmental Science & Technology, 2009, 43, 7303-7309
- Boyd et al. 2009b Boyd, S.; Horvath, A.; Dornfeld, D.; Supporting Information for “Life Cycle Energy Demand and Global Warming Potential of Computational Logic”
- Boyd et al. 2010a Boyd, S.; Horvath, A.; Dornfeld, D.; life-cycle assessment of computational logic produced from 1995 through 2010, Environ. Res. Lett. 5 (January-March 2010) 014011, doi: 10.1088/1748-9326/5/1/014011
- Boyd et al. 2010b Boyd, S.; Horvath, A.; Dornfeld, D.; Supplementary data for “Life-cycle assessment of computational logic produced from 1995 through 2010”
- BITKOM 2010 Online-Nachricht, Online unter http://www.bitkom.org/de/markt_statistik/64086_62618.aspx, Zugriff am 03.10.2011
- BITKOM 2009 Bundesverband Informationswirtschaft, Telekommunikation und neue Medien e.V. – Bitkom; Presseinformation v. 13. Oktober 2009: PC-Verkäufe legen trotz der Krise kräftig zu; Berlin 2009
- Chen 2010 Hank Chen, Chimei Innolux Corporation, Ecology and Component Management Dept. persönliche Mitteilung durch Email am 29.06.2010
- Chimei-innolux Website 2011 Online unter http://www.chimei-innolux.com/opencms/cmo/technology/TFT-LCDx_What_is_itx/?_locale=en, Zugriff am 08.04.2011
- Climate Group 2008 SMART 2020: Enabling the low carbon economy in the information age. A report by the Climate Group on behalf of the Global eSustainability Initiative (GeSI)

CMO EPD 2010	Erste Version auf Englisch unter http://www.environdec.com/reg/epde174.pdf , Zugriff am 24.06.2010. Zweite revidierte Version auf Chinesisch bekam durch persönlichen Kontakt mit ITRI und CMO. E-Mail vom 21.10.2010
c't 07/2010	Kernschau: Performance und Eigenschaften aktueller Prozessoren; Seiten 136-145, c't 07/2010
EECA ESIA 2006	EECA ESIA; Intermediate Status Report of the progress towards the Reduction of Perfluorocompound (PFC) Emissions from European Semiconductor Manufacturing, EECA ESIA 2006, online unter http://www.eeca.eu/data/File/ESIA%20Publications/ESIA%20PFC%20brochure.pdf , Zugriff am 10.10.2010
EcolInvent 2.1/2.2	EcolInvent Data v2.1 and v2.2; Swiss centre for life cycle inventories, St. Gallen, 2006 and 2010
EPIC-ICT 2006	EPIC-ICT; development of environmental performance indicators for ICT products on the example of personal computers, deliverable 6: technical report samples and case studies demonstration of applicability of the EPIC-ICT method, http://www.epic-ict.org , (Accessed 26.06.2010)
ESIA 2010	ESIA; Fragebogen am 11.12.2010
EuP Lot 3 2005	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)
gfu, BVT, GfK R&T 2010	Gesellschaft für Unterhaltungs- und Kommunikationselektronik – gfu; Bundesverband Technik des Einzelhandels e.V. – BVT; GfK Retail and Technology GmbH – GfK R&T (Hrsg.); Consumer Electronics Marktindex Deutschland (CEMIX) Januar 2010 – März 2010
Graedel 2008	Graedel, T.E.; Defining critical materials, Centre for Industrial Ecology, Yale School of Forestry & Environmental Studies, Vortrag bei Wuppertal Colloquium Sustainable Growth, Sept. 17-19, 2008
Hagelüken und Buchert 2008	Hagelüken, C.; Buchert, M.; The mine above ground – Opportunities and challenges to recover scarce and valuable metals from EOL electronic devices; Präsentation bei der IERC Salzburg, 17. Januar 2008
Herrmann 2008	Herrmann, C.; PE International, ECOC Brussel; 23.09.2008, http://www.ecoc2008.org/documents/ECOCsymposiumPresentationCHerrmann.pdf , Zugriff am 28.06.2010).
Hermanns 2010	Hermanns, S.; Experiences from Piloting a Carbon Footprint Method for Semiconductor Manufacturing; Präsentation auf der ersten Sitzung der Expertenrunde im Rahmen des UBA-Vorhabens "Informationsgewinnung über die Wertschöpfungskette von Produkten der Informations- und Kommunikationstechnik (IKT)", 21.09.2010, Berlin

Higgs et al. 2010 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, pp.1-6, 17-19 May 2010; doi: 10.1109/ISSST.2010.5507691

IFEU 2011 Rohstoffdatenblätter, Institut für Energie- und Umweltforschung (IFEU); Heidelberg 2011

IPCC Guidelines 2006 2006 IPCC Guidelines 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>

ISO 14025:2006 ISO 14025:2006: Environmental labels and declarations – Type III environmental declarations – Principles and procedures, Edition 1

ISO 14040:2006 ISO 14040:2006: Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework, Edition 2

ISO 14044:2006 ISO 14044:2006: Environmental management – Life cycle assessment – Requirements and guidelines, Edition 1

iSuppli 2010 Online unter <http://www.eetimes.com/electronics-news/4210669/Samsung-DRAM-ISuppli-Q3>, Zugriff am 15.01.2011

ITRS 2005 Advantages and Challenges Associated with the Introduction of 450mm Wafers: A position paper report submitted by the ITRS Starting Materials Sub-TWG, June 2005

ITRS 2009a International Technology Roadmap for Semiconductors, 2009 Edition, yield enhancement

ITRS 2009b International Technology Roadmap for Semiconductors, 2009 Edition, environment, safety, and health

Jibiki Hideo Jibiki, Status of type III environmental label, Eco-Leaf, Center of Ecoleaf type III environmental labelling program, Japan environmental management association for industry (JEMAI), http://www.city.sendai.jp/kankyoku/kanri/icgps/pdf/special_2-3.pdf, Zugriff am 28.06.2010

King County Solid Waste Division 2008 Literature Review Flat Panel Displays: End of Life Management Report, prepared by King County Solid Waste Division

Krishnan et al. 2008 Krishnan, N.; Boyd, S.; Somani, A.; Raoux, S.; Clark, D.; Dornfeld, D.; A Hybrid Life Cycle Inventory Model for Nanoscale Manufacturing," Environmental Science & Technology, 2008, 42, 3069-3075

Lauwigi et al. 2011 Lauwigi, C.; Schüler, D.; Vogt, R.; Quack, D.; PROSA Kurzstudie Wiederaufladbare Lithium-Batterien für den Einsatz in tragbaren Geräten – Entwicklung der Vergabekriterien für ein klimaschutzbezogenes Umweltzeichen. Studie im Rahmen des Projektes „Top 100 – Umweltzeichen für klimarelevante Produkte“, Öko-Institut e.V. in Koop. mit Institut für Energie- und Umweltforschung GmbH; 2011

MakeITFair 2007 Capacitating Electronics. The corrosive effects of platinum and palladium mining on labour rights and communities; SOMO-Centre for Research on Multinational Corporations, Niederlande; November 2007

MEEuP Report 2005 MEEUP Methodology Report. Final Report. Methodology Study Eco-design of Energy-using Products; 28.11.2005; VHK für die Europäische Kommission; online unter http://ec.europa.eu/energy/efficiency/studies/doc/ecodesign/2005_11_28_methodoly_report.pdf

Nissen 2001 Nissen, N. F.; Dissertation: Entwicklung eines ökologischen Bewertungsmodells zur Beurteilung elektronischer Systeme; 2001

O'Connell und Stutz 2010 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

PCR TFT-LCD Display 2008 Product-Category Rules for preparing an environmental product declaration for TFT-LCD Displays, PCR 2008:1,1

Plepys 2004 Plepys, A.; Dissertation: Environmental Implications of Product Servicing; 2004

Prakash et al. 2011 Prakash, S.; Gensch, C.-O.; Liu, R.; Zeitlich optimierter Ersatz eines Notebooks unter ökologischen Gesichtspunkten – ökobilanzielle Berechnungen am Beispiel der Datengrundlage der EuP-Vorstudie, ProBas und Eco-invent, in Zusammenarbeit mit Schischke, K. und Stobbe, L.; Öko-Institut e.V. in Kooperation mit Fraunhofer IZM, Umweltbundesamt (UBA), Dessau

Prakash et al. 2010 Prakash, S.; Brommer, E.; Gröger, J.; Top 100: PROSA Tragbare Computer – Entwicklung der Vergabekriterien für ein Klimaschutzbezogenes Umweltzeichen. Studie im Rahmen des Projektes "Top 100 – Umweltzeichen für klimarelevante Produkte"; Öko-Institut e.V. 2010

Prakash & Manhart 2010 Prakash, S., Manhart, A. Socio-economic assessment and feasibility study on sustainable e-waste management in Ghana. Ministry of Housing, Spatial Planning and the Environment, VROM-Inspectorate, Den Haag

ISMI 2011 ISMI Analysis of the Impact of Final Mandatory Reporting Rule Subpart I on U.S. Semiconductor Facilities, Technology Transfer #11015139A-TR, International SEMATECH Manufacturing Initiative, January 31, 2011, Zugriff am 06.06.2011
<http://ismi.sematech.org/docubase/document/5139aeng.pdf>

Samsung 2011a Online unter http://www.samsung.com/global/business/semiconductor/productList.do?fmly_id=691&xFmly_id=690, Zugriff am 15.01.2011

Samsung 2011b Online unter http://www.samsung.com/global/business/semiconductor/aboutus/ESH/EcoProduct_EcoSearch.html, Zugriff am 15.01.2011

- Schischke und Kohlmeyer 2003 Schischke, K.; Kohlmeyer, R.; ReUse Projekt, „Regionale Netze für die Wieder- und Weiterverwendung elektronischer Geräte“, Arbeitspaket 6.7 Umweltbewertung des ReUse von PCs, 2003
- Schüler et al. 2011 Schüler, D.; Buchert, M.; Liu, R.; Dittrich, S.; Merz, C.; Study on Rare Earths and Their Recycling Final Report for The Greens/EFA Group in the European Parliament
- Socolof et al. 2001 Socolof, M.L.; Overly, J.G.; Kincaid, L.E.; Geibig, J.R.; Desktop Computer Displays: a life-cycle assessment, EPA-744-R-01-004a, 2001
- Techinsights 2009 Techinsights 2009, online unter <http://www.ubmtechinsights.com/reports-and-subscriptions/device-library/Device-Profile/?SINumber=21694>, Zugriff am 15.01.2011
- UBA 2009 Green IT: Zukünftige Herausforderung und Chancen, Hintergrundpapier für die BMU/UBA/BITKOM-Jahreskonferenz 2009, Umweltbundesamt 2009
- Walle und Jennings 2001 Walle, M.; Jennings, N.; Safety and health in small-scale surface mines, A handbook; International Labour Office, Geneva 2001
- Watanabe und Kramer 2006 Watanabe, M.; Kramer, S.; 450 mm Silicon: An Opportunity and Wafer Scaling, the Electrochemical Society Interface; Winter 2006, online unter http://www.electrochem.org/dl/interface/wtr/wtr06/wtr06_p28-31.pdf, Zugriff am 07.01.2011
- Williams 2000 Eric Williams, Global Production Chains and Sustainability: The case of high-purity silicon and its applications in IT and renewable energy, 2000
- Williams et al. 2002 Williams, E.D.; Ayres, R.U.; Heller, M.; The 1.7 Kilogram Microchip: Energy and Material Use in the Production of Semiconductor Devices, Environmental Science and Technology, 2002, 36(24), p. 5504–5510
- Yao et al. 2004 Yao, M.A.; Wilson, A.R.; McManus, T.J.; Shadman, F.; Comparative Analysis of the Manufacturing and Consumer Use Phases of Two Generations of Semiconductors, 0-7803-8250-1/04 © 2004 IEEE

Anhang

Mitglieder der Expertenrunde

Die Expertenrunde bestand aus folgenden Unternehmen und Organisationen:

- Hewlett Packard GmbH
- Fujitsu Technology Solutions GmbH
- GLOBALFOUNDRIES Dresden Module One Limited Liability Company & Co. KG
- Merck KGaA
- Samsung Semiconductor Europe GmbH
- TOSHIBA Europe GmbH
- Apple
- Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (EMPA)
- GreenDelta TC