

**Projekt**  
**„Regionale Netze für die Wieder- und Weiterverwendung**  
**elektronischer Geräte“**

**Arbeitspaket 6.7**

**Energie- und CO<sub>2</sub>-Bilanz von PCs**  
**- Relevanz für ReUse-Strategien -**

Durchgeführt von

**Technische Universität Berlin**  
**Forschungsschwerpunkt Technologien der Mikroperipherik**  
**Sekr. TIB 4/2-1**  
Gustav-Meyer-Allee 25  
13355 Berlin  
Tel.: +49/(0)30/46403-156  
karsten.schischke@tu-berlin.de

Bearbeiter:  
Karsten Schischke

Berlin, Februar 2005

## INHALTSVERZEICHNIS

1.	Zusammenfassung der CO <sub>2</sub> -Bilanz.....	3
2.	Ausführlicher Bericht.....	6
2.1.	Vorbemerkung.....	6
2.2.	Zielsetzung.....	6
2.3.	Methodische Festlegungen.....	6
2.3.1.	Stand von Wissenschaft und Forschung.....	6
2.3.2.	Fokus: Primärenergieaufwand.....	6
2.3.3.	Fokus: CO <sub>2</sub> -Emissionen.....	7
2.3.4.	Data Mining.....	7
2.3.5.	(Modell-)Konfiguration der analysierten PCs.....	8
2.3.6.	Szenarien.....	8
2.3.7.	Systemgrenzen und Abschneidekriterien.....	11
2.4.	Ergebnisse.....	12
2.4.1.	Herstellungsphase.....	12
2.4.2.	Verkauf.....	13
2.4.3.	Nutzung.....	14
2.4.4.	Aufarbeitung für das ReUse und Zweitverkauf.....	15
2.4.5.	Reparatur.....	16
2.4.6.	Entsorgung.....	18
2.4.7.	Zusammenfassung der Bilanzdaten für die vordefinierten PC-Lebenszyklen.....	20
2.5.	Bewertung.....	23

# 1. Zusammenfassung der CO<sub>2</sub>-Bilanz

## **ReUse von Computern – ein Beitrag zur Reduzierung von CO<sub>2</sub>-Emissionen**

Das derzeit dringendste Umweltproblem auf globaler Ebene ist der Klimawandel aufgrund der Emission von Treibhausgasen. Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) ist hier der entscheidende Stoff, der insbesondere bei der Energieerzeugung aus fossilen Brennstoffen frei wird.

Mittlerweile ist es Allgemeinwissen, dass z.B. Computer über ihren Stromverbrauch zum Treibhauseffekt beitragen und daher sparsame Geräte – insbesondere auch Bildschirme – zu empfehlen sind. Weitgehend verborgen bleibt der „Rucksack“ an Kohlendioxid, den der Rechner bereits aus der Herstellung mitbringt. Im Rahmen des Projektes „ReUse - Regionale Netze für die Wieder- und Weiterverwendung elektronischer Geräte“ wurde daher die Bilanz über den gesamten Lebenszyklus gezogen. Somit werden die einzelnen Lebenswegphasen unter dem Gesichtspunkt „Treibhauseffekt“ vergleichbar und Strategien zur Wiederverwendung von PCs lassen sich unter Umweltaspekten bewerten.

### *Die Gesamtbilanz*

Grundlage der Studie war eine detaillierte Kalkulation für einen Pentium II Rechner aus dem Jahr 1999 und eine überschlägige Abschätzung für einen PC des Jahres 2003 (Pentium 4). Die extrem komplexe und aufwändige **Herstellung eines PCs**, insbesondere der Elektronik, aber auch des Gehäuses, verursacht ziemlich exakt **100 kg CO<sub>2</sub>-Emissionen** – von der Rohstoffgewinnung bis zur Endmontage (bezogen auf einen Pentium II Rechner ohne Monitor, Tastatur etc.). Zur Veranschaulichung: Da ein Kubikmeter reines Kohlendioxid unter Normalbedingungen etwa 1,85 kg wiegt, entsprechen 100 kg etwa 54 m<sup>3</sup> (ein Würfel von etwa 3,8 m Kantenlänge). Die Hintergrundkonzentration von Kohlendioxid beträgt derzeit – bei steigender Tendenz – etwa 360 ppm (parts per million – Teile je eine Million Teile). Demnach **entsprechen 100 kg Kohlendioxid etwa dem CO<sub>2</sub>-Gehalt von 150.000 m<sup>3</sup> unserer derzeitigen Umgebungsluft**. Ein Würfel mit einem solchen Volumen hat schon eine Kantenlänge von über 50 Metern.

Für **Transporte** der einzelnen Komponenten rund um den Globus und zum Händler kommen zu den Emissionen der Herstellungsprozesse noch einmal knapp über **12 kg** dazu. Der Energieverbrauch des Computergeschäfts und des Transportes des neu erworbenen PCs durch den Käufer sind mit weniger als 3 kg CO<sub>2</sub>-Emissionen fast vernachlässigbar.

Während der Nutzung kommt es auf die individuellen Randbedingungen an: Wie und wie oft wird der Computer genutzt? Wird von Energiesparfunktionen Gebrauch gemacht? Welche Programme laufen auf dem PC? Die CO<sub>2</sub>-Bilanz in dieser Phase ist extrem nutzerabhängig. Für eine **durchschnittliche Nutzung** lassen sich CO<sub>2</sub>-Emissionen von knapp **55 kg je Nutzungsjahr** angeben. Bei neueren Rechnern mit höherer Taktrate liegt dieser Wert in der Regel höher – für Laptops aufgrund des wesentlich besseren Power-Managements deutlich darunter. Die 55 kg CO<sub>2</sub> werden etwa zu gleichen Anteilen verursacht durch den Normalbetrieb, Bereitschaftszeiten (der Computer ist angeschaltet aber nicht in Verwendung), und Stand-by-Verluste. Muss der Computer repariert werden oder wird er für das ReUse aufgearbeitet, entstehen kaum zusätzliche CO<sub>2</sub>-Emissionen – lediglich im Falle der Verwendung neuer Ersatzteile ist deren Herstellung als zusätzliche Umweltbelastung mit zu berücksichtigen. In jedem Fall rechnet sich die Reparatur eines PCs ökologisch nach spätestens 2 Monaten (Annahme: maximal eine Baugruppe ist zu ersetzen) – wenn die Alternative ein mit erheblichen CO<sub>2</sub>-Emissionen neu zu produzierender Computer ist. Werden gebrauchte Komponenten zur Reparatur eingesetzt, macht sich diese Maßnahme ökologisch sogar umgehend bezahlt.

Gegenwärtig fokussiert sich der Umweltschutz bei Elektronikgeräten auf ein ordnungsgemäßes **Recycling** – siehe das kürzlich verabschiedete Elektro- und Elektronikgerätegesetz (ElektroG). Und in der Tat lassen sich durch eine Rückgewinnung der Materialien aus dem Elektronikschrott wertvolle Ressourcen sparen.

Umgerechnet in eingesparte CO<sub>2</sub>-Emissionen ergibt sich eine Entlastung in der Größenordnung von **25 kg**. Immerhin. Jedoch ist das nur ein Viertel dessen, was für die Herstellung aufgewendet werden muss, bzw. knapp die CO<sub>2</sub>-Menge die während sechs Monaten Nutzung verursacht wurden. Kurz gesagt: Recycling macht Sinn, kann aber die Umweltbilanz bei weitem nicht ausgleichen.

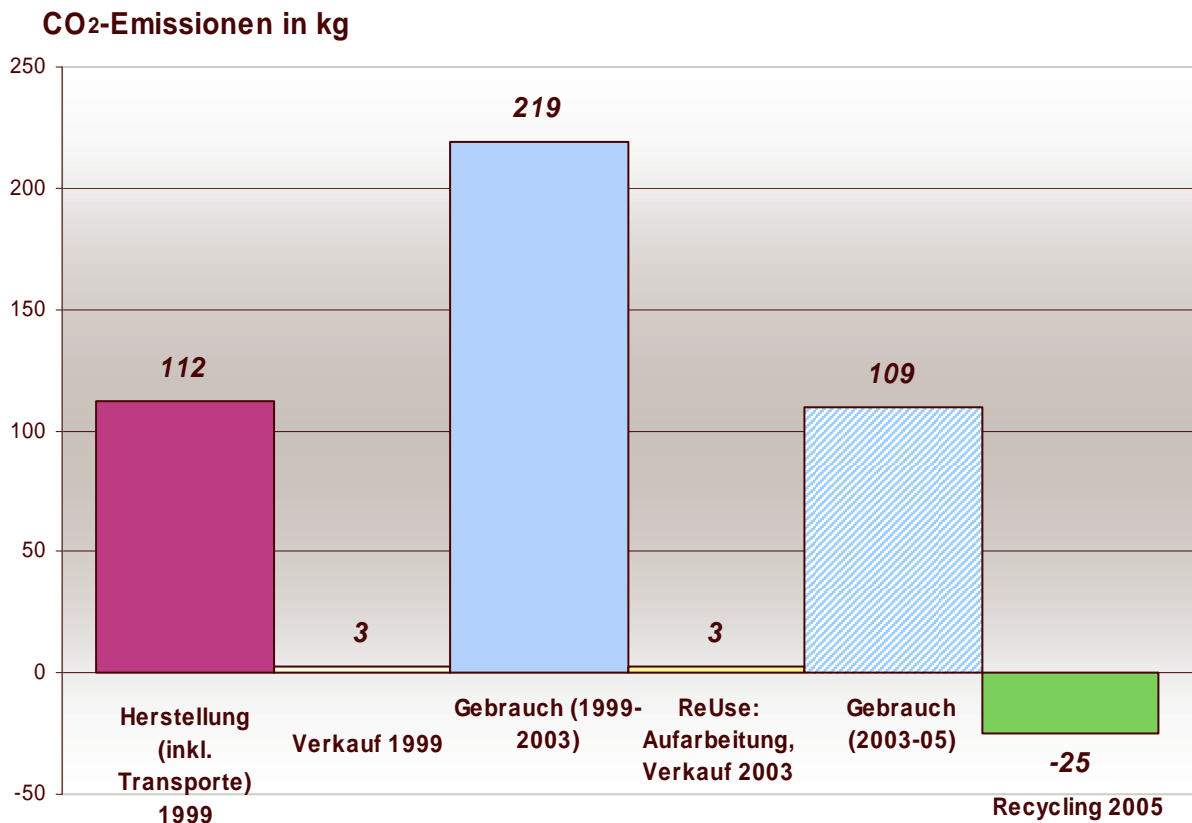


Abbildung 1: CO<sub>2</sub>-Emissionen der einzelnen Lebenswegphasen

### Der ReUse-Effekt

Jeder ReUse-aufgearbeitete Computer, der einen fabrikenneuen ersetzt, spart zunächst einmalig 100 kg CO<sub>2</sub>-Emissionen ein, zuzüglich rund 12 kg für Transporte bis zum Endnutzer und dem – je nach Modell – geringeren Energieverbrauch im Betrieb, der nochmals CO<sub>2</sub>-Einsparungen von rund 20 kg pro Jahr bewirken kann.

Der umwelt-effiziente Einsatz von Computern lässt sich über den Vergleich „pro Computer-Nutzungsjahr“ beurteilen: Dabei sind jedem Nutzungsjahr anteilig die Emissionen aus der Herstellung – bzw. die Gutschriften aus dem Materialrecycling - anzurechnen. Bei einer PC-Lebensdauer von 4 Jahren sind jedem Nutzungsjahr rechnerisch rund 78 kg CO<sub>2</sub> anzulasten. Wird der Rechner stattdessen 6 Jahre genutzt, so verbessert sich die Bilanz pro Nutzungsjahr auf 70 kg CO<sub>2</sub>-Emissionen. Mit anderen Worten: Werden PCs sechs statt vier Jahre genutzt – d.h. wird die Anschaffung von Neu-Rechnern um 2 Jahre hinausgezögert – so lässt sich die **CO<sub>2</sub>-Bilanz um rund 10 Prozent verbessern**. Diese Verbesserungen schlagen sich jedoch kaum in der Stromrechnung des Nutzers nieder, da die Effekte vor allem in den vorgelagerten Herstellungsketten auftreten. Wohl aber profitiert der Nutzer gegebenenfalls von den niedrigeren Einstandskosten eines ReUse-PCs.

Gemessen an den Zielvorgaben des Kyoto-Protokolls, die CO<sub>2</sub>-Emissionen von 1990 bis 2008/2012 weltweit um 5% zu reduzieren und angesichts der Bedeutung der Informations- und Kommunikationstechnik für den Stromverbrauch weltweit, sind Maßnahmen zur Lebensdauererlängerung von Computern eine effiziente, und zudem wirtschaftliche Maßnahme, dem Treibhauseffekt entgegenzuwirken.

Die genannten Zahlen und Aussagen dieser Studie beziehen sich jedoch nicht auf den Übergang von Desktop-PCs zu Laptops – durchaus können neue Laptops aufgrund ihres geringeren Stromverbrauchs innerhalb kurzer Zeit ökologisch besser abschneiden als ein wieder verwendeter Desktop-PC. Ebenso sind Monitore in dieser Betrachtung ausdrücklich nicht berücksichtigt.

Zusammenfassend ist festzustellen: Zwei grundlegende Ansätze können die CO<sub>2</sub>-Bilanz von Computern nachhaltig verbessern. Zum einen das Nutzerverhalten (bei Leerlauf ausschalten, Power-Management nutzen), zum anderen eine Verlängerung des Computerlebens, z.B. durch fachkundige, serviceorientierte Aufarbeitung durch das ReUse-Netzwerk.

## 2. Ausführlicher Bericht

### 2.1. Vorbemerkung

Diese Studie baut auf dem Projektbericht „Projektbericht zu den Arbeitspaketen des Forschungsschwerpunktes Technologien der Mikroperipherik an der TU Berlin“, Kapitel 3: „Umweltbewertung des ReUse von PCs“ auf und ergänzt diesen um die Betrachtung der Kohlenstoffdioxid-Emissionen.

### 2.2. Zielsetzung

Die Studie zur Ermittlung der Kohlenstoffdioxid-Emissionen und den Primärenergieverbrauch über den Lebenslauf eines PC verfolgt die Zielsetzungen:

1. Quantitative Umweltbewertung von PCs über den gesamten Lebenszyklus (Herstellung – Nutzung – Entsorgung); darauf aufbauend
2. Quantitative Umweltbewertung des PC-ReUse im Vergleich zu den sich bietenden Alternativen:
  - Kauf keines Rechners statt eines preisgünstigen Gebrauchts-Rechners oder
  - Kauf eines neuen Rechners mit einem Funktionalitätsumfang nach dem „Stand der Technik“ statt eines Gebrauchts-Rechners, der aufgrund des technologischen Fortschritts nur eingeschränkt den aktuellen Anforderungen an PCs gerecht wird.
3. Identifizierung der PC-Komponenten, für die unter Umweltgesichtspunkten ein „zweites Leben“ im Rahmen des Reuse ganz besonders angestrebt werden sollte.
4. Erarbeitung von Entscheidungshilfen: Wann ist eine Reparatur ökologisch sinnvoll?

### 2.3. Methodische Festlegungen

Die Umweltbewertung des Reuse von PCs im Rahmen der vorliegenden Studie lehnt sich an die Methodik der Ökobilanzierung (Life Cycle Assessment) an: Einbezogen werden sämtliche Lebenszyklusabschnitte von der Rohstoffgewinnung über die Fertigung, einschließlich Transporte, den Vertrieb, die Nutzung – unterschieden nach Nutzungsszenarien – und die Entsorgung (Recycling bzw. Beseitigung).

#### 2.3.1. *Stand von Wissenschaft und Forschung*

Für halbwegs aktuelle PC-Generationen – aufwärts 200 MHz Prozessoren - liegen keine Studien zu den lebenszyklusbezogenen Umweltauswirkungen vor. Da der technologische Fortschritt im Bereich der Informations- und Kommunikationstechnologie immens ist, sind fünf bis zehn Jahre alte Daten nicht ohne weiteres auf die heutige Situation übertragbar – auch wenn solche Daten in Ermangelung eines neueren Datengerüsts in aktuellen Studien zitiert werden. Andererseits hat sich die Datenlage hinsichtlich Prozessdaten im Elektronikbereich für einzelne Teilbereiche und -komponenten in den letzten Jahren deutlich verbessert, so dass ein Zusammentragen dieser Daten eine aktuelle Grundlage für die Analyse eines PCs bietet.

Es bleibt jedoch festzuhalten, dass einerseits der technologische Wandel im Elektronikbereich extrem schnell ist und andererseits die Produktionsketten mittlerweile komplex global vernetzt sind: Daher sind Ökobilanzen für Produkte der Informations- und Kommunikationstechnik mit vertretbarem Aufwand kaum leistbar. Eine Umweltbewertung in diesem Bereich hat sich folglich auf Indikatoren zu beschränken, die einerseits die Umweltaspekte adäquat repräsentieren und für die andererseits eine verlässliche Datenbasis gegeben ist. Im Bereich der IKT-Produkte gelten diese Voraussetzungen insbesondere für den Energieverbrauch.

#### 2.3.2. *Fokus: Primärenergieaufwand*

Als Methode für die Umweltbewertung wird die lebenszyklusorientierte Betrachtung des Primärenergieaufwands (gleichzusetzen mit dem Kumulierten Energie-Aufwand - KEA) herangezogen, da die Frage des Energieverbrauchs in der Regel als der entscheidende Umweltaspekt im Elektroniksektor anzusehen ist, sofern Produktion und Entsorgung unter kontrollierten Bedingungen ablaufen [Legarth2003]. Zudem ist die Datenlage für eine weitergehende Ökobilanzierung einschließlich Wirkungsabschätzung nach derzeitigem Stand für den Bereich der Elektronikfertigung nicht gegeben [Schischke2002].

Der KEA ist die Summe aller Primärenergieinputs, inklusive der zur Materialherstellung. Folglich sind auch die Vorketten der Herstellung von Hilfs- und Betriebsstoffen mit einzubeziehen.

Energieinhalte der Produkte werden nicht gesondert mit berücksichtigt, da über die Kalkulation des Entsorgungsszenarios eine Gutschrift für zurückgewonnene Stoffe und Energierückgewinnung erfolgt. Die Umweltbelastungen elektronischer Produkte setzen sich – in Anlehnung an Legarth et al. [Legarth2003] - zusammen aus einem Anteil „fixer Umweltbelastungen“, resultierend aus der Produktherstellung und Entsorgung, sowie einem Anteil „variabler Umweltbelastungen“ aus der Nutzungsphase zusammen. Entscheidend für die Aussagefähigkeit des Gesamtergebnisses ist die Datenqualität der „fixen Umweltbelastungen“ – Hauptproblem: Vollständigkeit der Daten für extrem komplexe Produktions- und Entsorgungsprozesse – und der Szenarien für die Bestimmung der „variablen Umweltbelastungen“ – Hauptproblem: Beschreibung eines realitätsnahen und annähernd repräsentativem Nutzungsverhaltens -.

### **2.3.3. Fokus: CO<sub>2</sub>-Emissionen**

Der Energieverbrauch ist eng gekoppelt an das Problem des Treibhauseffektes – dem derzeit dringendsten Umweltproblem auf globaler Ebene (der Energieverbrauch ist darüber hinaus verknüpft mit zahlreichen weiteren Umweltauswirkungen insbesondere Rohstoffverknappung und Schadstoffemissionen). Hauptursache für den – durch Aktivitäten des Menschen zusätzlich verursachten – Treibhauseffekt sind Emissionen an Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>). Die Berechnung der CO<sub>2</sub>-Bilanz über den Lebenszyklus ermöglicht daher Aussagen über die Relevanz einzelner Lebenswegabschnitte und ReUse-Szenarien für den Treibhauseffekt.

### **2.3.4. Data Mining**

#### **Datenquellen**

Die Erarbeitung des Datengerüsts orientiert sich an zwei konkreten PC-Konfigurationen für 1999 und 2003 – Standardmodelle, wie sie nach dem Stand der Technik jeweils als Massenprodukte auf den Markt gebracht wurden. Die Berechnungen zum Primärenergieverbrauch und zu den CO<sub>2</sub>-Emissionen wurden am Beispiel der 1999er Rechner-Konfiguration durchgeführt. Der Primärenergieverbrauch wurde zusätzlich noch auf die 2003er Rechner-Konfiguration hochgerechnet. Tendenziell verlaufen CO<sub>2</sub>-Emissionen und Primärenergieverbrauch parallel, so dass die Aussagen zum Primärenergieverbrauch für den 2003er Rechner auch auf die CO<sub>2</sub>-Emissionen übertragbar sind.

Die Daten für die lebenszyklusorientierte Energie- und CO<sub>2</sub>-Bilanzierung beruhen auf folgenden Quellen:

- Demontage der Modell-PCs und teilweise Wägungen der Einzelkomponenten und Schnellanalyseverfahren zur Ermittlung der stofflichen Zusammensetzung, um über beispielhafte Daten zum Aufbau von PCs der jeweiligen Generation zu verfügen.
- Die Fachliteratur sowie unternehmensbezogene Umweltberichte werden gesichtet, um Daten für einzelne Herstellungsprozesse bzw. einzelne Recyclingprozesse zusammenzuführen – ausdrücklich beziehen sich diese Daten nicht auf die konkreten PC-Modelle (die Datenlage ist bei weitem nicht ausreichend, um eine Bilanzierung einer bestimmten PC-Konfiguration mit den Baugruppen der jeweiligen Komponentenfertiger vornehmen zu können). Aus der Fachliteratur werden Kennzahlen abgeleitet, die auf die Modell-PCs angewendet werden.
- Basierend auf dem know-how des Berlin Center of Advanced Packaging (BeCAP) im Bereich der Mikroelektronik und der elektronischen Aufbau- und Verbindungstechnik werden Erfahrungswerte („educated guess“) zur Bewertung einzelner technologischer Aspekte eingebracht.
- Die Szenarientwicklung für Nutzung und Entsorgung orientieren sich an den Annahmen anderer Literaturquellen, und werden mit den persönlichen sowie ReUse-Projekt-Erfahrung abgeglichen: Über Nutzung und Entsorgung von PCs liegt kaum gesichertes statistisch belegbares Datenmaterial vor, so dass die im Rahmen dieser Studie aufgestellten Szenarien nur unter den angenommenen Rahmenbedingungen Gültigkeit haben. Gerade für die Nutzungsphase sei darauf hingewiesen, dass die Basisannahmen einen entscheidenden Einfluss auf die Gesamtbilanz haben.
- Für die Bewertung der Nutzungsphase erfolgen Messungen des Energieverbrauchs unterschiedlicher PC-Konfigurationen - ergänzt um Literaturdaten -, um die Energieverbrauchsdaten der Modell-PCs dem langjährigen Trend zum Energieverbrauch von Personal Computern gegenüberzustellen.
- Für die Trendanalyse zur Beschreibung des Technologiewandels werden Erfahrungswerte und Literaturdaten unter Einbeziehung der künftigen Gesetzgebung im Elektronikbereich herangezogen.

## Bewertung der Datenqualität

Zwei Aspekte mit Auswirkung der Datenqualität sind besonders zu berücksichtigen:

1. Die Fachliteratur ebenso wie Umweltberichte (von üblicherweise im Umweltschutz pro-aktiven Unternehmen) geben den Stand der Technik wider, der jedoch für die Produktion nicht repräsentativ ist: Tendenziell werden die Umweltbelastungen somit unterschätzt, da Daten zu weniger öko-effizienten Fertigungen nicht verfügbar sind.
2. Die Fachliteratur stammt insbesondere aus Europa, USA und Japan, Umweltberichte mit verwertbaren Kennzahlen vor allem aus Deutschland (japanische Umweltberichte sind als Datenquelle wenig geeignet, da die dortigen Großunternehmen Kennzahlen auf Konzernebene aggregieren und daher Rückschlüsse auf einzelne Produkte nicht möglich ist). Die Fertigung für PC-Komponenten erfolgt jedoch zu einem Großteil in Südostasien und insbesondere China. Für die dortigen Fertigungsstandorte sind nur in sehr beschränktem Maße Umweltdaten verfügbar. Daher ist der regionale Bezug der verwendeten Umweltdaten weitgehend nicht identisch mit dem globalen Schwerpunkt der PC-Fertigung.

### 2.3.5. (Modell-)Konfiguration der analysierten PCs

In Tabelle 1 sind die Spezifikationen der beiden Modell-PCs aufgeführt, die exemplarisch der Umweltbewertung zugrunde liegen.

Tabelle 1: Konfiguration der Modell-PC

Komponente	1999er PC	2003er PC
Prozessor	Pentium II, 350 MHz	Pentium 4, 1,8 GHz
Mainboard	Ga BX 2000	Asus P4B
Speicher	SDRAM 64MB elite mt	SDRAM 256 MB PC133
Festplatte	HDD Fujitsu mpe3064 6,4 GB	Maxtor D550X-4K 80 GB
Soundkarte	Creative AWE64 ISA CT4520	(on board)
Grafikkarte	Ati 3D Rage Pro 2xAGP 8 MB	Ati Radeon 7000 64 MB AGP4x
Disketten-Laufwerk	teac FD-235	teac FD-235
CD-ROM-Laufwerk	Liteon LTN-301	Liteon LTN-526
Netzteil	IT LC250ATX	Noname 300W PFC
Gehäuse	midi tower	midi tower

Nicht berücksichtigt werden Peripherie- und Eingabegeräte (Tastatur, Maus, Monitor, Drucker etc.), da ein Reuse dieser Peripheriegeräte weitgehend unabhängig vom Rechner erfolgen kann und in der Praxis auch erfolgt.

### 2.3.6. Szenarien

Für die Bewertung des PC-Reuse sind realitätsnahe Annahmen für die einzelnen Lebenswegphasen zu treffen. Nachfolgend sind die Szenarien für den Gesamtlebensweg, die Nutzungsphase im Besonderen einschließlich Reparaturaufwänden, sowie den End-of-Life-Bereich erläutert.

#### Lebensweg-Szenarien

Für die Schweiz wird eine Lebensdauer von 5,9 Jahren von Computern (aus Haushalten und Gewerbe) angegeben [Morf2002].

Das National Safety Council hat für die USA in den Jahren von 1992 bis 1999 eine kontinuierliche Abnahme der durchschnittlichen Lebensdauer eines PCs bis zum Ende der Nutzung konstatiert und diesen Trend fortgeschrieben. Für das Jahr 2003 wurde eine Lebensdauer von 2 Jahren prognostiziert [NSC1999] (siehe Abbildung 2). Von IBM wird die technologische Lebensdauer mit 2-3 Jahren angegeben – bezogen auf den Bereich der gewerblichen Nutzer - mit der Einschätzung, dass damit ein Minimum erreicht ist, sich dieser Trend nicht fortsetzt und mittlerweile wieder ein Anstieg der technologischen Lebensdauer diskutiert wird. Diese Trendumkehr wird begründet, dass die technologische Entwicklung hardwareseitig mittlerweile derart fortgeschritten ist, dass die softwareseitig gestellten Anforderungen auch über einen längeren Zeitraum erfüllt werden können [Grenchus2002].



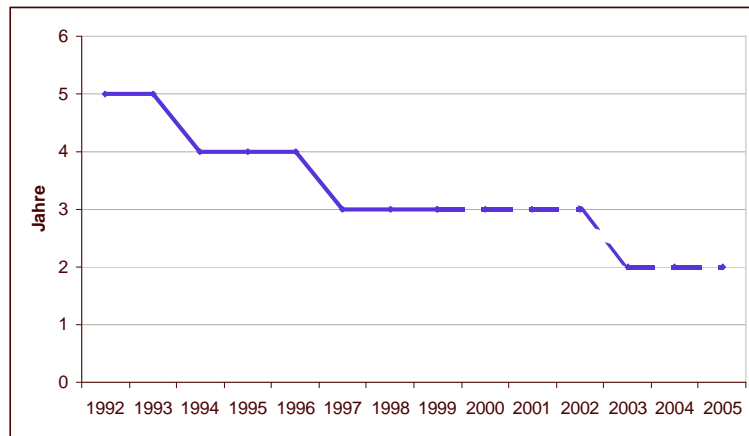


Abbildung 2: Durchschnittliches PC-Alter am Ende der Nutzung [NSC1999]

Auch die Marktkenntnis bzgl. Gebrauch-PCs für den deutschen Markt legt die Vermutung nahe, dass eine Lebensdauer von 2 Jahren deutlich zu gering angesetzt ist. Durchaus vorstellbar erscheint jedoch ein Wechsel und Neukauf des Computersystems nach zwei bis drei Jahren. Dies ist allerdings nicht mit einer Entsorgung gleichzusetzen, da Computer häufig kaskadenartig weitergenutzt werden, ehe sie nach Jahren entsorgt werden. Es wird in der Umweltbewertung daher von einem Szenario mit einer regulären Lebensdauer von 4 Jahren plus weiterer 2 Jahre im Falle einer Verwendung als ReUse-PC ausgegangen.

Die Umweltbewertung des PC-Reuse wird exemplarisch an drei als realistisch anzusehenden Lebenswegszszenarien festgemacht (Abbildung 3):

- **Szenario A:** Kauf eines Neu-PCs Anfang 1999, Nutzung über 4 Jahre, dann Weitergabe über das ReUse-Netzwerk an Zweitnutzer, der den PC vor der Entsorgung weitere 2 Jahre nutzt. Der Erstnutzer schafft sich umgehend einen Neu-PC an.
- **Szenario B:** Kauf eines Neu-PCs Anfang 1999, Nutzung über 4 Jahre, dann wird der Rechner ausgemustert, jedoch noch weitere 2 Jahre in Reserve gehalten, ehe eine Entsorgung durch den Erstnutzer erfolgt. Der Erst-Nutzer schafft sich zu dem Zeitpunkt, zu dem er den Alt-PC ausmustert, einen Neu-PC an. Der potenzielle Zweitnutzer schafft sich zu dem Zeitpunkt, zu dem der Erstnutzer seinen 1999 gekauften PC ausmustert, aber weiter in Reserve hält, in Ermangelung eines ReUse-PCs ebenfalls einen Neu-PC an.
- **Szenario C:** Kauf eines Neu-PCs Anfang 1999, Nutzung über 4 Jahre, dann Entsorgung durch den Erstnutzer, der sich danach einen Neu-PC anschafft. Der potenzielle Zweitnutzer schafft sich zu diesem Zeitpunkt in Ermangelung eines ReUse-PCs überhaupt keinen PC an.

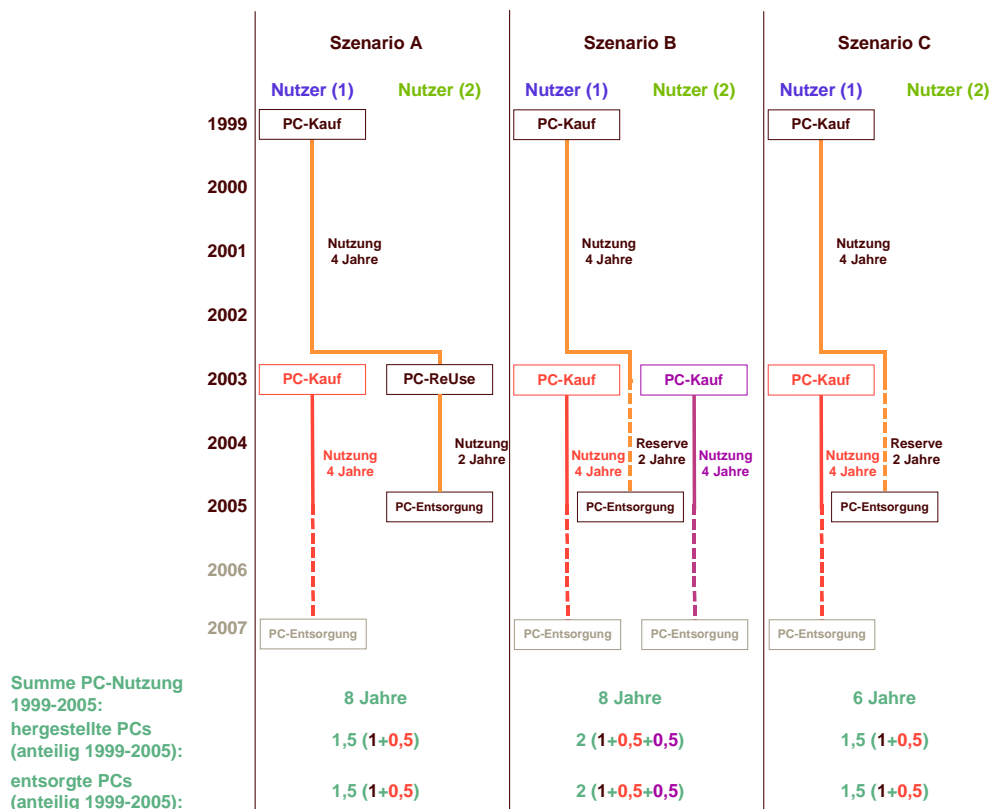


Abbildung 3: Übersicht Lebenswegszenarioszenarien

### Nutzungsszenarien

Bestimmend für den Energieverbrauch während der Nutzungsphase ist die jeweilige Art der Nutzung. Bei einer gewerblichen Nutzung ist bei Arbeitsplatzrechnern davon auszugehen, dass die Computer ganztags während der Geschäfts- bzw. Bürozeit genutzt werden. Server laufen vermutlich ganzjährig durchgehend. Bei der privaten Nutzung ist mittlerweile von einer sehr inhomogenen Nutzungsstruktur auszugehen. Neben sporadischer Nutzern existieren auch viele sogenannter Power-user. In Zusammenhang mit den mittlerweile zahlreich verfügbaren Internet-Flatrate-Angeboten werden Computer durchaus auch durchgehend genutzt, beispielsweise für sog. Peer-to-Peer-Programme. Insgesamt ist daher im Beobachtungszeitraum mit steigenden Nutzungszeiten bezogen auf den einzelnen PC zu rechnen.

Die seit ca. 1995 implementierten Stromsparfunktionen werden aus verschiedenen Gründen oftmals nicht konsequent genutzt. Das in professionellen Bereichen noch immer weit verbreitete Windows NT verfügt nur in seltensten Fällen über solcherart Funktionen (ACPI-Treiber vom Hersteller des Mainboards muss vorhanden sein), zudem können die immer weiter verbreiteten USB-Geräte nach einem Stand-by teilweise ihre Funktion bis zum Neustart verlieren. Bei fertig konfigurierten Systemen sind die Stromsparfunktionen zudem oftmals nicht werksseitig aktiviert, so dass sich der Rechner erst nach einer Umkonfiguration in den Schlafmodus, den Stand-by- oder den Suspend-Modus begeben könnte.

Die Annahmen für die Nutzungsphase der PCs sind mit erheblichen Unsicherheiten behaftet, da zuverlässige statistische Angaben zum Nutzungsverhalten nicht verfügbar sind. Zudem ist von einer erheblichen Spannweite des Nutzerverhaltens auszugehen, so dass die Ergebnisse zur Nutzungsphase nur unter den hier gemachten Annahmen gültig sind. Als Grundlage dienen Daten einer aktuellen Studie des Fraunhofer ISI: Für Deutschland wird basierend auf Quellen um 2000 ein Bestand an Desktop-Computern für 2003 prognostiziert von ca. 20 Mio in Privathaushalten (65,8%) und von 10,4 Mio im Bürobereich (34,2%) [Schlomann2003]. Ausgehend von Daten für 2001 schätzen Schlomann et al. die künftige Nutzungsdauer von PCs bis 2010 ab. Für 2003 lassen sich die Zahlen extrapolieren; die Nutzungszeiten sind in Tabelle 2 aufgeführt.

Tabelle 2: Nutzungszeiten für PCs (überarbeitet nach [Schloman2003])

	Nutzungszeit je PC in h/a		
	Privathaushalte	Büros	gewichtet (65,8% Privathaushalte, 34,2% Bürobereich)
Normalbetrieb	398	1.705	845
Bereitschaft	1.333	495	1.046
Schein-Aus	4.920	5.248	5.032

Als Grundlage der ReUse-Studie wird ein gewichteter Wert für Büro- bzw. Privatnutzung angesetzt.

### **Entsorgungsszenario**

Das Mengengerüst für die Entsorgung von Alt-PCs für Berlin ist unbekannt. Ein Großteil wird durch händische Demontage in Fraktionen zerlegt mit unterschiedlicher Demontagetiefe. Shreddern wird zur Zerlegung von Elektronikschrott ebenfalls angewendet, und wird im Rahmen des kalkulierten Entsorgungsszenarios für kompakte Subassemblies (Laufwerke ohne Gehäuse) angesetzt. Die Hausmüllentsorgung erfolgt derzeit noch zur Hausmülldeponie und zur Müllverbrennung. Ab 2005 ist nur noch die Verbrennung als Beseitigungsverfahren für Hausmüll zulässig. Für die Kalkulation wird daher als Entsorgungsweg für Hausmüll die Verbrennung angesetzt.

Es wird von folgendem Recyclingszenario ausgegangen:

- sämtliche Leiterplatten zur Kupferhütte
- Kabelschrott zum Kabelshredder, Kupfer zur Kupferhütte, PVC zur Verbrennung?
- Fe-Metalle (Gehäuse etc.) zum Stahlrecycling
- größere Aluminiumteile zum Aluminiumrecycling
- Kunststoffe und Restfraktion zur Verbrennung
- Disketten-Laufwerke und Festplatte jeweils ohne Leiterplatten sowie Kühlkörper zum Shreddern

Entsprechend der WEEE-Richtlinie sind künftig alle Leiterplatten mit einer Fläche von mindestens 10 cm<sup>2</sup> Fläche aus Elektronikgeräten zu entnehmen. Diese Regelung wird im Entsorgungsszenario bereits berücksichtigt.

Es ist anzunehmen, dass vorrangig einzelne demontierte Komponenten in den Hausmüll gegeben werden und nur im Ausnahmefall komplette Rechner. Einzelne Metallgehäuse werden ggf. durch Magnetscheider aus dem Hausmüll separiert und dem Fe-Metall-Recycling zugeführt. Dementsprechend wird für Metallgehäuse zu 100% das Stahlrecycling als weiterer Entsorgungsweg angenommen.

### **2.3.7. Systemgrenzen und Abschneidekriterien**

Die Umweltbewertung beschränkt sich ausschließlich auf PCs ohne Peripheriegeräte (Monitor, Tastatur, Maus etc.), sprich das PC-Gehäuse sowie alle darin enthaltenen Komponenten und deren Verbindung untereinander. Diese Abgrenzung wird getroffen, da die Lebensdauerszenarien für Peripheriegeräte in der Regel andere sein werden als für die zentrale Rechneinheit: Wegen eines defekten Monitors wird normalerweise nicht der gesamte PC verschrottet werden, sondern nur der Monitor ausgetauscht.

Der Lebenszyklus umfasst die Prozesse der Rohstoffgewinnung, der Fertigung, des Vertriebs, der Nutzung sowie der Entsorgung (Recycling bzw. Beseitigung). Eingeschlossen ist die Herstellung von Betriebs- und Hilfsstoffen, ebenso von Trinkwasser, da es sich bei der Halbleiterfertigung um sehr wasserintensive Prozesse handelt. Die Entsorgung von Fertigungsabfällen wird nicht betrachtet – diese Prozesse dürften jedoch im Rahmen der Gesamtbilanz nicht ins Gewicht fallen. Die Errichtung der Fertigungsstätten und der Bau der Anlagentechnik wird nicht mitbilanziert. Die Verwendung von Umweltberichten führt dazu, dass im Einzelfall Unternehmensgrenzen die Systemgrenzen darstellen – dementsprechend sind im Einzelfall auch Verwaltungsbereiche oder der jeweilige Forschungs- und Entwicklungsbereich mit einbezogen. Diese Vorgehensweise führt aufgrund der gegebenen Datenlage zu einer nicht für alle Prozessketten einheitlich angewendeten Systemgrenze. Dieses ist in der Gesamtbilanz zu berücksichtigen, jedoch für den Vergleich der Reuse-Varianten unerheblich, da den beiden PC-Generationen jeweils gleiche Teilprozess-Systemgrenzen zugrunde liegen.

Um Abschneidekriterien festlegen zu können, ist zunächst eine Bestimmung des jeweiligen Beitrags zur Gesamtumweltbelastung erforderlich. Zielsetzung der Studie ist eine möglichst vollständige Bilanzierung der Primärenergieverbräuche und CO<sub>2</sub>-Emissionen in den einzelnen Lebenswegphasen. Daher werden alle

Prozessketten, für die mit vertretbarem Aufwand ein Datengerüst ermittelbar ist, einbezogen; lediglich Prozessketten, die im Nachkommabereich zum Gesamtergebnis beitragen, werden nach überschlägiger Einschätzung nicht weiter verfolgt, sofern nicht ein besonderes Erkenntnisinteresse besteht (Auswirkungen technologischer Weiterentwicklungen, Auswirkungen umweltrechtlicher Vorgaben, Beitrag bestimmter als besonders umweltkritisch angesehener Stoffe).

## 2.4. Ergebnisse

### 2.4.1. Herstellungsphase

Die Primärenergieverbräuche und CO<sub>2</sub>-Emissionen der Computerherstellung sind für den 1999er PC in Tabelle 3 aufgeführt, einschließlich der Transporte von zumeist Fernost nach Deutschland. Es ist davon auszugehen, dass zumindest die Komponenten mit besonders kurzen Innovationszyklen per Luftfracht nach Deutschland transportiert werden. Dadurch ergibt sich der vergleichsweise hohe Aufwand für Transporte von über 50 kWh je Rechner.

Tabelle 3: Energiebilanz und CO<sub>2</sub>-Emissionen der Herstellung des Pentium II PCs

Komponente		KEASumme	CO <sub>2</sub> -Emissionen
Prozessor	Pentium II	32,8 kWh	6,2 kg
Kühlkörper / Lüfter		5,9 kWh	2,3 kg
Mainboard	Ga BX 2000	82,4 kWh	14,0 kg
Speicher	SD-RAM 64MB elite mt	99,0 kWh	18,3 kg
Festplatte	HDD Fujitsu mpe3064 6,4 GB	50,4 kWh	12,2 kg
Soundkarte	Creative AWE64 ISA CT4520	22,4 kWh	4,3 kg
Grafikkarte	Ati 3D Rage Pro 2xAGP 8 MB	36,9 kWh	6,9 kg
Disketten-Laufwerk	teac fd-235hf	11,9 kWh	3,2 kg
CD-ROM-Laufwerk	Liteon ltn-301	46,6 kWh	9,8 kg
Netzteil	IT LC250ATX	29,7 kWh	6,1 kg
Gehäuse	Midi-Tower	50,5 kWh	13,1 kg
Kabel		3,7 kWh	1,1 kg
Endmontage		12,5 kWh	2,5 kg
Transporte		51,1 kWh	12,4 kg
<b>Summe</b>		<b>535,8 kWh</b>	<b>112,4 kg</b>

Die wesentlichen energierelevanten PC-Komponenten sind das Speichermodul (wegen der großen Chipfläche), das Mainboard (Größe und Komplexität), desweiteren das Gehäuse (Materialmenge) und die Festplatte (aufwändige Fertigung, teilweise unter Reinraumbedingungen).

Die **CO<sub>2</sub>-Emissionen der Herstellungsphase** belaufen sich auf **100 kg je PC**.

Abbildung 4 vergleicht den Energieaufwand für den Modell-Rechner des Jahres 1999 mit dem Modell-Rechner 2003. Die Daten für den 2003er Rechner sind eine Abschätzung unter Berücksichtigung der bekannten Technologietrends. Aus Kostengründen wurde auf eine detailliertere Analyse (Zerstörung, Wiegung, Messungen der einzelnen Komponenten) verzichtet – daher sind an den einzelnen Balken für den 2003er PC auch keine exakten Werte angegeben. Die grundlegende Tendenz geht in Richtung effizienterer Fertigungstechnologie, bedingt insbesondere durch Effizienzgewinne beim Prozessieren der Chips (zum Beispiel durch den Übergang zu immer größeren Siliziumscheiben, auf denen das Prozessieren stattfindet). Des Weiteren wirkt sich die Systemintegration (Funktionalitäten der Soundkarte vom Mainboard übernommen) positiv aus.

In Summe ergibt sich ein Primärenergieverbrauch für die Herstellung der Komponenten des PCs von 485 kWh, einschließlich der Endmontage. Der Modell-Rechner des Jahres 2003 verbraucht in der Fertigung demgegenüber etwa 425 kWh an Primärenergie.

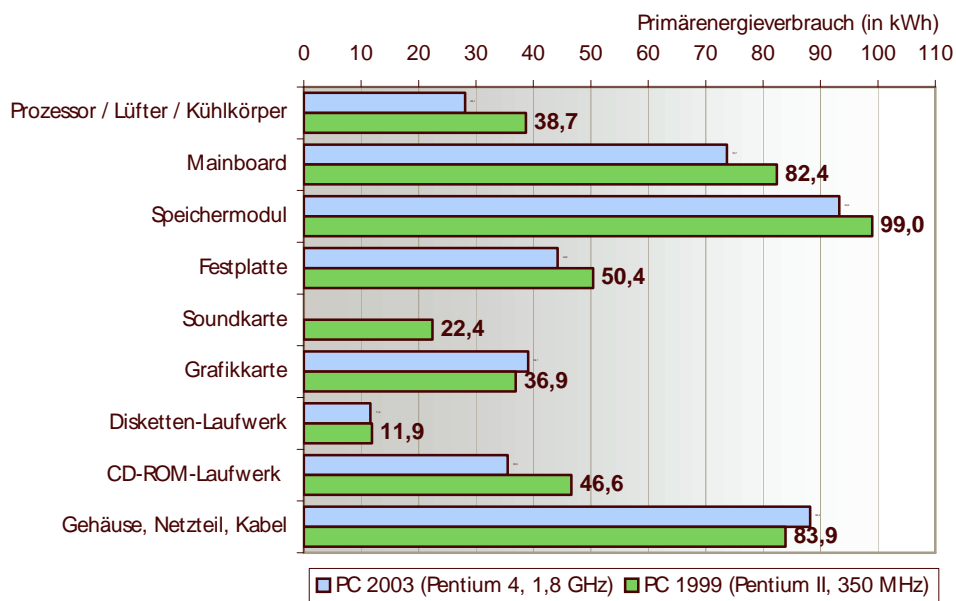


Abbildung 4: Primärenergieverbrauch für die Herstellung der einzelnen Komponenten

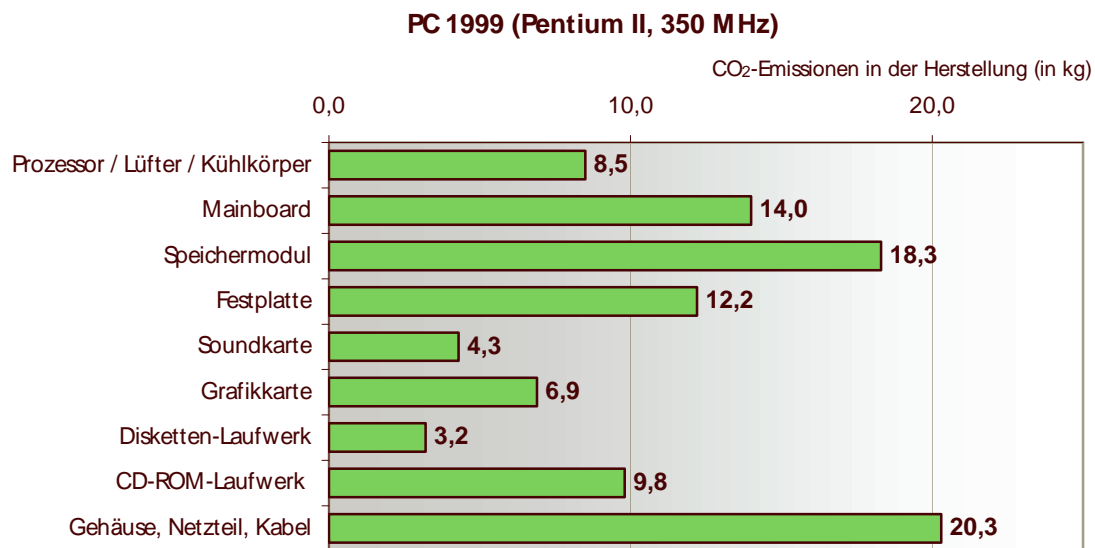


Abbildung 5: CO<sub>2</sub>-Emissionen für die Herstellung der einzelnen Komponenten

Abbildung 5 zeigt das Verhältnis der einzelnen Komponenten zueinander hinsichtlich der CO<sub>2</sub>-Emissionen in der Herstellung auf. Insbesondere aufgrund der Materialintensität – insbesondere Stahlblech des Gehäuses - tragen Gehäuse, Netzteil und Kabel mit knapp über 20 kg CO<sub>2</sub>-Emissionen in Summe am meisten zum Kohlendioxid ausstoß bei. Den nächst größeren Beitrag zu den CO<sub>2</sub>-Emissionen verursacht die Herstellung der Speichermodule aufgrund der großen Chipfläche (aufwändige Reinraumprozesse).

#### 2.4.2. Verkauf

Die oben aufgeführten Primärenergieverbräuche stellen den „energetischen Rucksack“ des PCs zum Zeitpunkt des Verkaufs im Ladengeschäft dar. Ausgehend von einem Energieverbrauch von Kaufhäusern/Ladengeschäften von rund 250 kWh/m<sup>2</sup>a [Actionenergy2002] insbesondere für Heizung/Klimatisierung und Beleuchtung und der

Abschätzung, dass ein PC einen Quadratmeter Fläche benötigt (anteilig Lagerfläche, Wegefläche, Kassen- / Servicebereich) ergibt sich bei einer durchschnittlichen Verweilzeit des PC im Laden von 2 Wochen ein Primärenergieverbrauch von **9,6 kWh/PC**. Die damit verbundenen CO<sub>2</sub>-Emissionen belaufen sich auf etwa **2 kg/PC**.

Für den Transport des PCs durch den Käufer wird eine Fahrt mit dem PKW von 5 km innerhalb Berlins angenommen (zweifache Strecke). Diese Annahme geht davon aus, dass die Fahrt ausschließlich zum Zweck des PC-Kaufs erfolgt – die Verbindung der PKW-Fahrt mit weiteren Einkäufen, Erledigungen oder Fahrten zur oder von der Arbeit bleibt unberücksichtigt. Demnach ergibt sich ein Primärenergieverbrauch durch den Transport des PC durch den Käufer von **6,1 kWh**. Diese PKW-Fahrt verursacht eine CO<sub>2</sub>-Emission von **0,8 kg/PC**.

### 2.4.3. Nutzung

Der Energieverbrauch des Pentium II wie des Pentium 4 Rechners werden in den unterschiedlichen Modi im alltäglichen Betrieb gemessen. Die jeweilige Energieaufnahme ist in Tabelle 4 und Tabelle 6 angegeben und über die Daten des Nutzungsszenarios für jeweils ein Jahr hochgerechnet.

Tabelle 4: Elektroenergieverbrauch in der Nutzungsphase, PC, Baujahr 1999

	Nutzungszeit je PC in h/a	Energieaufnahme in W	Stromverbrauch in kWh/a
Normalbetrieb	845	57	48,165
Bereitschaft	1.046	45	47,07
Schein-Aus	5.032	9	45,288
Summe			140,523
Umrechnung in Primärenergie (Strommix EU) in kWh			<b>393,5</b>

Umgerechnet auf CO<sub>2</sub>-Emissionen verursacht ein durchschnittliches PC-Nutzungsjahr etwa 55 kg Kohlendioxid-Ausstoß über die Kraftwerke. In etwa zu gleichen Anteilen sind diese Emissionen dem Normalbetrieb, Zeiten der Bereitschaft und Stand-by-Verlusten zuzurechnen (siehe Tabelle 6).

Tabelle 5: CO<sub>2</sub>-Emissionen in der Nutzungsphase, PC, Baujahr 1999

	Stromverbrauch in kWh/a	CO <sub>2</sub> -Emissionen in kg
Normalbetrieb	48,165	18,7
Bereitschaft	47,07	18,3
Schein-Aus	45,288	17,7
Summe pro Nutzungsjahr		54,7

Der Energieverbrauch im Betrieb liegt für den PC des Baujahrs 2003 deutlich über dem des Rechners von 1999.

Tabelle 6: Elektroenergieverbrauch in der Nutzungsphase, PC, Baujahr 2003

	Nutzungszeit je PC in h/a	Energieaufnahme in W	Stromverbrauch in kWh/a
Normalbetrieb	845	79	66,755
Bereitschaft	1.046	60	62,760
Schein-Aus	5.032	13	65,416
Summe			194,931
Umrechnung in Primärenergie (Strommix EU) in kWh			<b>545,8</b>

Diese Energieverbrauchsdaten sind mit Unsicherheiten behaftet, da die Leistungsaufnahme je nach Konfiguration des PCs erheblich schwanken kann. Abbildung 6 zeigt die Verbrauchswerte mehrerer PCs, sowohl eigener

Messungen als auch auf der Grundlage von Literaturdaten. Die für die Berechnungen zugrundegelegten Modell-PCs sind mit Pfeilen markiert.

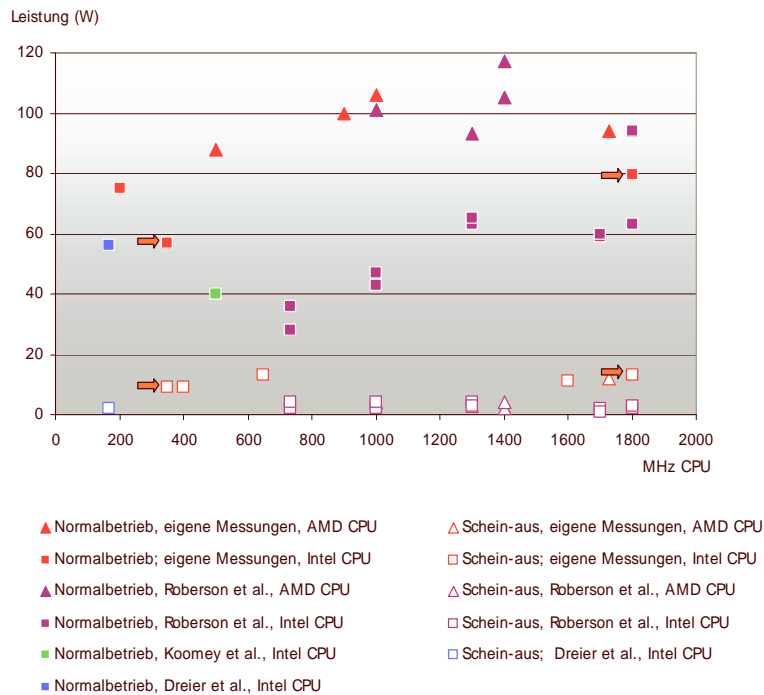


Abbildung 6: Energieverbrauch verschiedener PC-Konfigurationen

Es zeigen sich erhebliche Schwankungsbereiche, jedoch ist eindeutig ein Trend zu steigendem Energieverbrauch ableitbar, insbesondere wenn die Messungen der TU, sowie von Roberson et al. jeweils nach Intel- und AMD-Prozessor unterschieden separat betrachtet werden. Dieser Trend spiegelt sich auch in der Leistungsaufnahme der Prozessoren alleine wieder: während 286er, 386er und 486er Prozessoren der 80er Jahre noch unter 10 W Leistungsaufnahme auswiesen, geht der kürzlich angekündigte Intel Pentium 4 Extreme auf einen Verbrauchswert von 100 W zu.

Im Rahmen der Streubreite geben die für 1999 und 2003 ausgewählten PC-Konfigurationen ein realistisches Bild dieses Trends wieder – im Einzelfall ist es jedoch durchaus möglich, dass ein aktueller PC im Verbrauch sparsamer ist als ein ReUse-Rechner.

#### 2.4.4. Aufarbeitung für das ReUse und Zweitverkauf

##### Reparatur, Qualitätskontrolle, Verkauf

Für die Fläche des Reparatur-/Ladengeschäfts werden wie beim Kaufhaus 250 kWh/m<sup>2</sup>,a Primärenergieverbrauch angesetzt. Der Platzbedarf insbesondere für die Reparatur und das entsprechende PC-Handling ist vergleichsweise höher anzusetzen und wird hier mit einem Quadratmeter angesetzt. Auch die Durchlaufzeiten für Reparatur/Test und Verkauf sind höher anzusetzen als in einem Elektronikkaufhaus: Abgeschätzt werden drei Wochen – ein kontinuierlicher Zulauf an ReUse-PCs, gesteigerten Bekanntheitsgrad des ReUse-Netzwerks und akzeptable Preise vorausgesetzt. Daraus ergibt sich ein Primärenergieaufwand von **14,4 kWh** und CO<sub>2</sub>-Emissionen von knapp **3 kg**. Für Tests und Kundenvorführung wird 1 Stunde Betriebszeit für den PC angesetzt, entsprechend ca. **0,3 kWh** Primärenergieaufwand und **0,1 kg** CO<sub>2</sub>-Emissionen.

##### Transporte für den Zweitverkauf (ReUse-PC)

Folgende Transporte sind für das ReUse der PCs erforderlich: Der ReUse-Händler holt bei Unternehmen, die Alt-PCs ausrangieren, die PCs mit einem Lieferwagen ab. Geschätzt wird eine Transportentfernung im Berliner Raum von 10 km. Es ergibt sich ein Primärenergieverbrauch für die Abholung der Rechner von **0,2 kWh** je Rechner, entsprechend weniger als **0,1 kg** CO<sub>2</sub>.

Der Zweitnutzer transportiert den aufgearbeiteten ReUse-PC mit dem PKW nach Hause. Unter Annahme eines künftig ähnlich dichten ReUse-Händler-Netzwerks in Berlin wie es für Recyclinghöfe gegeben ist (Vorteil der ReUse-Händler gegenüber Recyclinghöfen ist die in der Regel bessere Erreichbarkeit/Lage), wird eine PKW-Fahrt von 5 km angenommen (zzgl. „Leerfahrt“). Daraus ergibt sich ein Transportaufwand von **6,1 kWh** Primärenergieverbrauch und 0,8 kg CO<sub>2</sub>-Ausstoß (vergleiche Kapitel 0

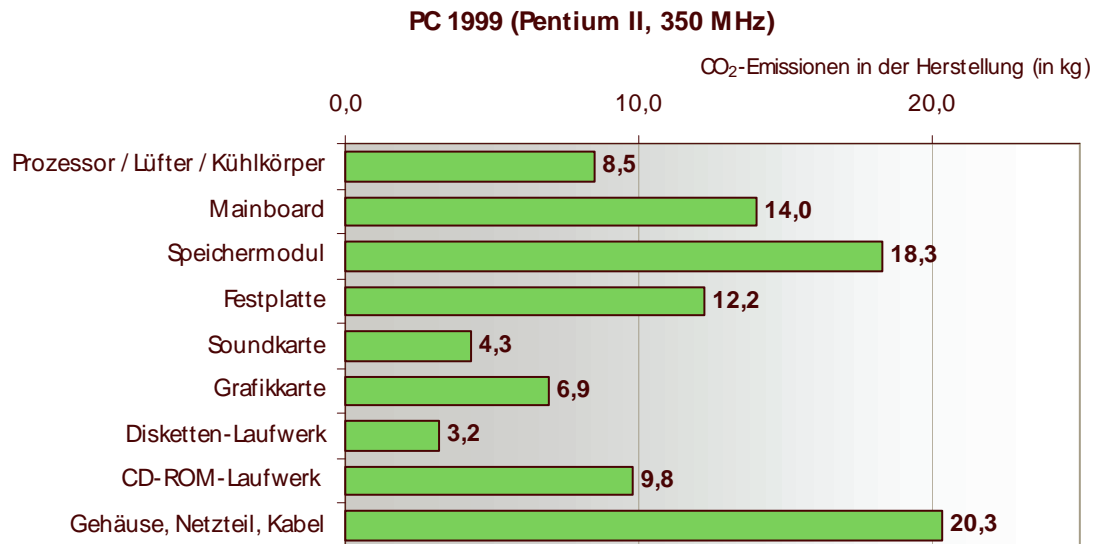


Abbildung 5: CO<sub>2</sub>-Emissionen für die Herstellung der einzelnen Komponenten

Abbildung 5 zeigt das Verhältnis der einzelnen Komponenten zueinander hinsichtlich der CO<sub>2</sub>-Emissionen in der Herstellung auf. Insbesondere aufgrund der Materialintensität – insbesondere Stahlblech des Gehäuses - tragen Gehäuse, Netzteil und Kabel mit knapp über 20 kg CO<sub>2</sub>-Emissionen in Summe am meisten zum Kohlendioxid ausstoß bei. Den nächst größeren Beitrag zu den CO<sub>2</sub>-Emissionen verursacht die Herstellung der Speichermodule aufgrund der großen Chipfläche (aufwändige Reinraumprozesse). Verkauf).

#### 2.4.5. Reparatur

Ein wesentlicher Aspekt des ReUse-Konzepts ist der Austausch defekter Komponenten bei der Vermarktung von Gebrauch-Rechnern. Aus Umweltsicht stellt sich die Frage, wann eine Reparatur ökologisch Sinn macht, bzw. wann ggf. eine Entsorgung des Komplett-Rechners (bzw. Entnahme noch funktionstüchtiger Komponenten als Ersatzteile) sinnvoller ist.

Je nachdem welche Komponente defekt ist, müssen Ersatzteile für PCs häufig auch gebrauchte Komponenten sein, da Komponenten nach dem neuesten Stand der Technik häufig nicht mit 4 Jahre alten Rechnern kompatibel sind. Werden Gebrauchskomponenten zur Reparatur genutzt, so ist die Reparatur ökologisch immer sinnvoll, da keine neuen Komponenten hergestellt werden müssen und der Stromverbrauch des reparierten ReUse-Rechners im Regelfall geringer ist als eines neuen PCs.

Neue Komponenten, die gewöhnlich kompatibel sind mit 4 Jahre alten PCs sind, mit Ausnahmen,

- Diskettenlaufwerk
- CD-ROM-Laufwerk
- Festplatte (sofern der Hersteller des Mainboards ein aktuelles BIOS bereitstellt)
- Soundkarte
- Netzteil

Die Einsatzmöglichkeiten neuer Grafikkarten und Speichermodule in alten Rechnern sind sehr begrenzt.



Werden neue Komponenten zur Reparatur benötigt, so muss deren Produktion aufgewogen werden durch den geringen PC-Stromverbrauch im Betrieb und durch das Hinauszögern eines Neu-Rechner-Kaufs – dann macht die Reparatur ökologisch Sinn (grafisch dargestellt in Abbildung 7). Mit anderen Worten: Der reparierte PC muss noch bis zu einem bestimmten Zeitpunkt (Break-even-point) weitergenutzt werden.

Da Primärenergieverbrauch und CO<sub>2</sub>-Emissionen in etwa parallel verlaufen, ist für die Berechnung des Break-even-pointes nicht entscheidend, ob Primärenergieverbrauch oder CO<sub>2</sub>-Emissionen zugrunde gelegt werden – im Ergebnis laufen beide Betrachtungen mit vernachlässigbaren Unterschieden auf das gleiche hinaus.

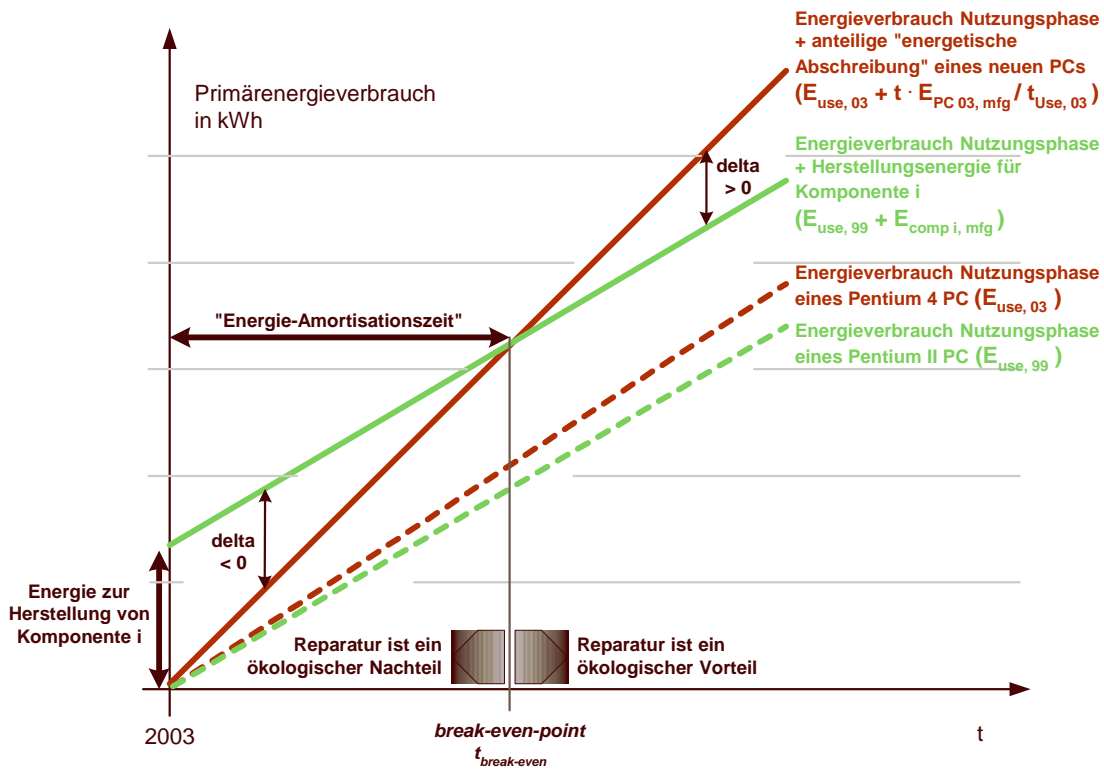


Abbildung 7: Vergleich Reparatur und Neukauf

Der Break-even-point wird folgendermaßen berechnet:

$$t_{break-even} = \frac{E_{comp\ i, mfg}}{\frac{E_{use, 03} - E_{use, 99}}{t_{ref}} + \frac{E_{PC\ 03, mfg}}{t_{use, 03}}}$$

mit:

$t_{break-even}$  : Break-even-point (bezogen auf die Primärenergiebilanz)

$E_{comp\ i, mfg}$  : Primärenergie für die Herstellung einer neuen Komponente i in 2003 (Transporte sind näherungsweise zu vernachlässigen, da keine Luftfracht anzunehmen ist für diese Komponenten)

$E_{PC\ 03, mfg}$  : Primärenergie für die Herstellung eines neuen PC in 2003 (einschließlich Transport der Komponenten)

$E_{use, 03}$  : Primärenergieverbrauch in der Nutzung für einen PC, Baujahr 2003

$E_{use, 99}$  : Primärenergieverbrauch in der Nutzung für einen PC, Baujahr 1999

$t_{ref}$  : Bezugszeitraum für  $E_{use}$ , hier: "pro Jahr"

$t_{use, 03}$  : angenommene Lebensdauer für durchschnittliche PCs, hier: 4 Jahre

Die Break-even-points der Komponenten, die sinnvoller Weise durch Neukomponenten ersetzt werden können, sind in Tabelle 7 aufgelistet.

Tabelle 7: Break-even-points für die Reparatur

Ersatzteil-Komponente	Break-even-point (bezogen auf Primärenergie und CO <sub>2</sub> -Emissionen) in Monaten
Diskettenlaufwerk	0.5
CD-ROM Laufwerk	1.5
Festplatte	2
Soundkarte	1
Netzteil	1.5

Angenommen, weitere Neu-Komponenten, wie Speichermodule, Mainboard oder Grafikkarte wären kompatibel mit 4 Jahre alten Computern, so wären deren Break-even-points erreicht nach 4, 3,5 und etwas über 1,5 Monaten.

Müssen gar nur einzelne Bauelemente, z.B. defekte Elektrolytkondensatoren, statt kompletter Baugruppen ausgetauscht werden, so ist die Herstellung dieser Bauelemente gänzlich zu vernachlässigen.

Grundsätzlich ist festzuhalten: Die Reparatur von Computern hat eine sehr kurze ökologische Amortisationszeit von maximal wenigen Monaten.

#### 2.4.6. Entsorgung

Die Anwendung des Entsorgungsszenarios auf die Zusammensetzung des PC, Baujahr 1999, ist in Abbildung 8 dargestellt.

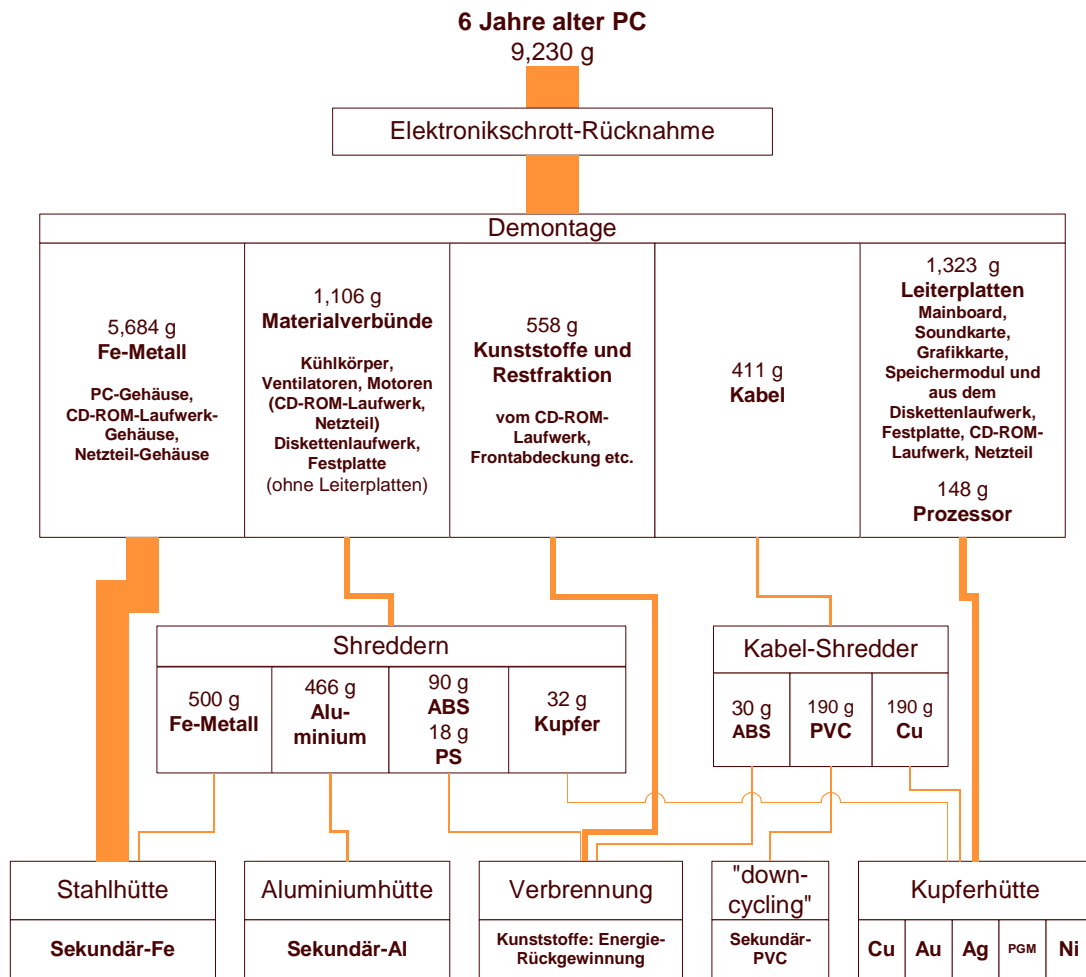


Abbildung 8: Entsorgungsszenario

### Material- und energetisches Recycling

In den Stoffkreislauf durch Recycling zurückgeführte Stoffe werden dem Rechner gutgeschrieben (in Form von Primärenergie bzw. CO<sub>2</sub>-Emissionen, die sonst für die anderweitige Gewinnung der Rohstoffe aufzubringen wäre). Demgegenüber steht der Aufwand für Transporte, Handling und Aufbereitungsprozesse des Elektronikschrotts. Die Gesamtbilanz ist Tabelle 8 zu entnehmen.

Tabelle 8: Energiebilanz des PC-Recycling - Gesamtbilanz

Teilprozess	KEA <sub>Summe</sub> in kWh	CO <sub>2</sub> -Emissionen in kg
Erfassung Recyclinghöfe	vernachlässigbar	vernachlässigbar
Demontage	vernachlässigbar	vernachlässigbar
Transporte (Summe)	3,7	1
Shreddern Kabel und Verbundfraktion	0,1	< 0,1
Nutzung Sekundärrohstoffe	-76,0	- 26,1
<b>Summe</b>	<b>-72,2</b>	<b>- 25</b>

In Summe lassen sich etwas mehr als 70 kWh an Primärenergie, bzw. 25 kg CO<sub>2</sub>-Emissionen durch Material- und energetisches Recycling je Rechner einsparen.

### Hausmüllverbrennung

Die Kalkulation des Szenarios Hausmüllverbrennung erfolgt ausschließlich für den Primärenergieverbrauch, da Zielsetzung dieser Berechnung lediglich ein abschätzender Vergleich zwischen regulärem Recycling und Hausmüllverbrennung ist.

Für die Bilanzierung der Mitverbrennung von PC-Schrott in Hausmüllverbrennungsanlagen (HMV) werden die Durchschnittsdaten aller deutschen MVA zugrundegelegt [Dehoust1999]. Der Gesamtnutzungsgrad von 39% teilt sich auf in

- Stromauskopplung: 7,7%
- Fernwärmeauskopplung: 15%
- Prozessdampfauskopplung: 16,3%

In Tabelle 9 sind die Heizwerte der relevanten Kunststoffe und deren Gewichtsanteil in den jeweiligen Modell-Rechnern aufgeführt.

Tabelle 9: Energiegewinnung aus der Hausmüllverbrennung der Modell-PCs

	Heizwert kWh/g	PC Baujahr 1999	
		Gewichtsanteil g	Heizwert kWh
ABS	0,0097	432 g	4,1904
PA	0,0079	42 g	0,3318
PS	0,0111	453 g	5,0283
PVC	0,0050	190 g	0,9500
Epoxidharz	0,0093	380 g	3,5340
<b>Summe</b>			<b>14,0345</b>
Stromauskopplung (je PC)			1,0807
Fernwärmeauskopplung (je PC)			2,1052
Prozessdampfauskopplung (je PC)			2,2876
<b>resultierende Gutschriften Primärenergie</b>			
Stromauskopplung (je PC)			3,0260
Fernwärmeauskopplung (je PC)			-0,8631
Prozessdampfauskopplung (je PC)			2,9968
<b>Summe</b>			<b>5,2</b>

Aus der energetischen Nutzung der Kunststoffe ergibt sich für die Hausmüllverbrennung eine Gutschrift an Primärenergie von **5,2 kWh**.

Der Transport zur Müllverbrennungsanlage erfolgt mit den Sammelfahrzeugen der Hausmüllsammmlung. Innerhalb Berlins ist eine Entfernung von ca. 25 km für den Transport zur Müllverbrennungsanlage Ruhleben anzusetzen. Bezogen auf einen Komplett-PC von 9,23 kg ergibt sich für die Sammlung und den Transport ein zusätzlicher Primärenergieverbrauch von **0,2 kWh**.

Eisenwerkstoffe aus der Müllverbrennung gelangen zu etwa 99% in die Schlackefraktion [Belevi2000], davon wiederum können bei einem optimierten Aufbereitungsverfahren der Schlacke rund 97% als Fe-Schrotte für die Verwertung separiert werden [Pretz o.J.]. Insgesamt kann somit etwa von einer Ausbringung von 96% ausgegangen werden. 5.735 g Fe-Schrott aus dem PC, Baujahr 1999, gelangen somit zur Verhüttung.

Der Transport von der Müllverbrennungsanlage Ruhleben z.B. zur Verhüttung nach Eisenhüttenstadt per LKW erfordert einen Primärenergieaufwand von rund **0,3 kWh**. Das Einschmelzen erfordert **4,8 kWh** Primärenergie – dem steht eine Gutschrift in Höhe von **31,8 kWh** für Sekundärstahl gegenüber.

In Summe ergibt sich für die – nicht fachgerechte – Entsorgung des PCs über den Hausmüll, dessen Verbrennung und der Verwertung des Fe-Schrotts aus der Schlacke eine Gutschrift an Primärenergie von **31,7 kWh**.

#### 2.4.7. Zusammenfassung der Bilanzdaten für die vordefinierten PC-Lebenszyklen

In Tabelle 10 ist die Gesamt-CO<sub>2</sub>-Bilanz für einen PC zusammengefasst, aufgeteilt nach Lebenszyklusphasen. Je nach Ansatz für die Nutzungsdauer lässt sich auf dieser Grundlage der gesamte CO<sub>2</sub>-Ausstoß berechnen.

Tabelle 10: CO<sub>2</sub>-Bilanz des Lebenswegs eines PC-Modells des Jahrgangs 1999 - Überblick

Lebenswegphase	CO <sub>2</sub> -Emissionen
----------------	-----------------------------

<b>Herstellung</b>		
Prozessor	Pentium II	6,2 kg
Kühlkörper / Lüfter		2,3 kg
Mainboard	Ga BX 2000	14,0 kg
Speicher	SD-RAM 64MB elite mt	18,3 kg
Festplatte	HDD Fujitsu mpe3064 6,4 GB	12,2 kg
Soundkarte	Creative AWE64 ISA CT4520	4,3 kg
Grafikkarte	Ati 3D Rage Pro 2xAGP 8 MB	6,9 kg
Disketten-Laufwerk	teac fd-235hf	3,2 kg
CD-ROM-Laufwerk	Liteon ltn-301	9,8 kg
Netzteil	IT LC250ATX	6,1 kg
Gehäuse	Midi-Tower	13,1 kg
Kabel		1,1 kg
Endmontage		2,5 kg
	<b>Summe</b>	<b>100 kg</b>
<b>Transporte (Herstellungsphase)</b>		<b>12,4 kg</b>
<b>Erstverkauf</b>		<b>2,8 kg</b>
<b>Durchschnittliche Nutzung, je Nutzungsjahr</b>		<b>70 kg</b>
<b>(Aufarbeitung für das ReUse, Zweitverkauf)</b>		<b>(3,0 kg)</b>
<b>Recycling</b>		<b>- 25 kg</b>

Die Ergebnisse der drei Vergleichsszenarien sind in Tabelle 11 bzw. Abbildung 9 aufgeführt. Das ReUse-Szenario A weist im Vergleich zu Szenario B (kein ReUse) einen um 11% geringeren Primärenergieverbrauch aus. Bezogen auf „ein Jahr PC-Nutzung“ ergibt sich aus diesem Szenario eine Einsparung von 65 kWh Primärenergie.

Szenario C (keinen PC für den potenziellen ReUse-Kunden) resultiert – verständlicher Weise – in einem geringeren absoluten Energieverbrauch, als wenn der ReUse-Kunde tatsächlich den Gebraucht-PC übernimmt und in der weiteren Nutzung Strom verbraucht (Szenario A). Dieser Vergleich ist jedoch nicht „fair“, da der Nutzen für den potenziellen ReUse-Kunden nicht der gleiche ist. Vergleicht man die Szenarien A und C über die funktionelle Einheit „1 Jahr PC Nutzung“, so ergibt sich ein um 40 kWh höherer Energieverbrauch pro Nutzungsjahr, wenn der Gebraucht-PC nicht weiter genutzt wird – folglich eine höhere Effizienz der PC-Nutzung durch ReUse.

Andererseits zeigt der höhere Absolutbetrag für die Nutzung des ReUse-PCs gegenüber gar keinem PC auch einen Nachteil auf: Durch ReUse ist es möglich, weiteren Nutzern Informationstechnik zugänglich zu machen – die höhere Effizienz geht einher mit einer absolut höheren Inanspruchnahme von Ressourcen. Um diesen Rebound-Effekt zu mindern, ist Wert zu legen auf energieminierte Rechner und weitere Optimierungen in der Herstellungsphase.

Tabelle 11: Energiebilanz der Nutzungsszenarien

Szenario	KEA <sub>Summe</sub> in kWh					
	A		B		C	
PC-Baujahr	1999	2003	1999	2003	1999	2003
Anzahl PCs	1	1	1	2	1	1
Nutzungsjahre 1999-2003	8		8		6	
Herstellung 1999	535,8		535,8		535,8	
Erstverkauf 1999	15,7		15,7		15,7	
Nutzung 1999-2003	1.574,0		1.574,0		1.574,0	
Aufarbeitung für das ReUse, Zweitverkauf 2003	21,0		21,0		21,0	
Herstellung 2003 (anteilig für 2 von 4 Nutzungsjahren)		238,7		477,3		238,7
Erstverkauf 2003		15,7		31,4		15,7
Nutzung 2003-2005	787	1.091,6		2.183,2		1.091,6
Recycling 2005	-72,2		-72,2		-72,2	

Recycling 2009 (anteilig für 2 von 4 Nutzungsjahren)		-36,1		-72,2		-36,1
Summe	<b>4.170</b>		<b>4.670</b>		<b>3.360</b>	
Primärenergieverbrauch je Nutzungsjahr	<b>520</b>		<b>585</b>		<b>560</b>	

In Tabelle 11 sind die CO<sub>2</sub>-Emissionen der verschiedenen Szenarien angegeben. Für die 2003er PC Konfiguration lässt sich die Herstellung mit überschlägig 88 kg CO<sub>2</sub>-Ausstoß abschätzen plus 12,4 kg für die Transporte (identisch mit dem 1999er Modell).

Tabelle 12: CO<sub>2</sub>-Bilanz der Nutzungsszenarien

Szenario	CO <sub>2</sub> -Emissionen in kg					
	A		B		C	
PC-Baujahr	1999	2003	1999	2003	1999	2003
Anzahl PCs	1	1	1	2	1	1
Nutzungsjahre 1999-2003	8		8		6	
Herstellung 1999	112,4		112,4		112,4	
Erstverkauf 1999	2,8		2,8		2,8	
Nutzung 1999-2003	218,8		218,8		218,8	
Aufarbeitung für das ReUse, Zweitverkauf 2003	3,0		3,0		3,0	
Herstellung 2003 (anteilig für 2 von 4 Nutzungsjahren)		50,2		100,4		50,2
Erstverkauf 2003		2,8		5,6		2,8
Nutzung 2003-2005	109,4	151,8		303,6		151,8
Recycling 2005	-25,0		-25,0		-25,0	
Recycling 2009 (anteilig für 2 von 4 Nutzungsjahren)		-12,5		-25,0		-12,5
<b>Summe</b>	<b>421,4</b>	<b>192,3</b>	<b>312,0</b>	<b>394,6</b>	<b>312,0</b>	<b>192,3</b>
<b>Summe</b>	<b>613,7</b>		<b>706,6</b>		<b>504,3</b>	
CO <sub>2</sub> -Emissionen anteilig je Nutzungsjahr	<b>76,7</b>		<b>88,3</b>		<b>84,1</b>	

Für einen 4 Jahre alten PC – bezogen auf den Pentium II-Rechner – macht bei durchschnittlicher Nutzung die Gebrauchsphase 77% der Lebenszyklusenergie bzw. 71% der CO<sub>2</sub>-Emissionen aus. Legt man die private Nutzung wie vom Fraunhofer ISI angegeben zugrunde, ergeben sich für den Energieverbrauch 75%, beim Szenario der Büronutzung 80%. Für einen 6 Jahre alten PC schließlich mit durchschnittlicher Nutzung erhöht sich der Anteil der Gebrauchsphase auf 83% (Primärenergie) bzw. 78% (CO<sub>2</sub>-Emissionen).

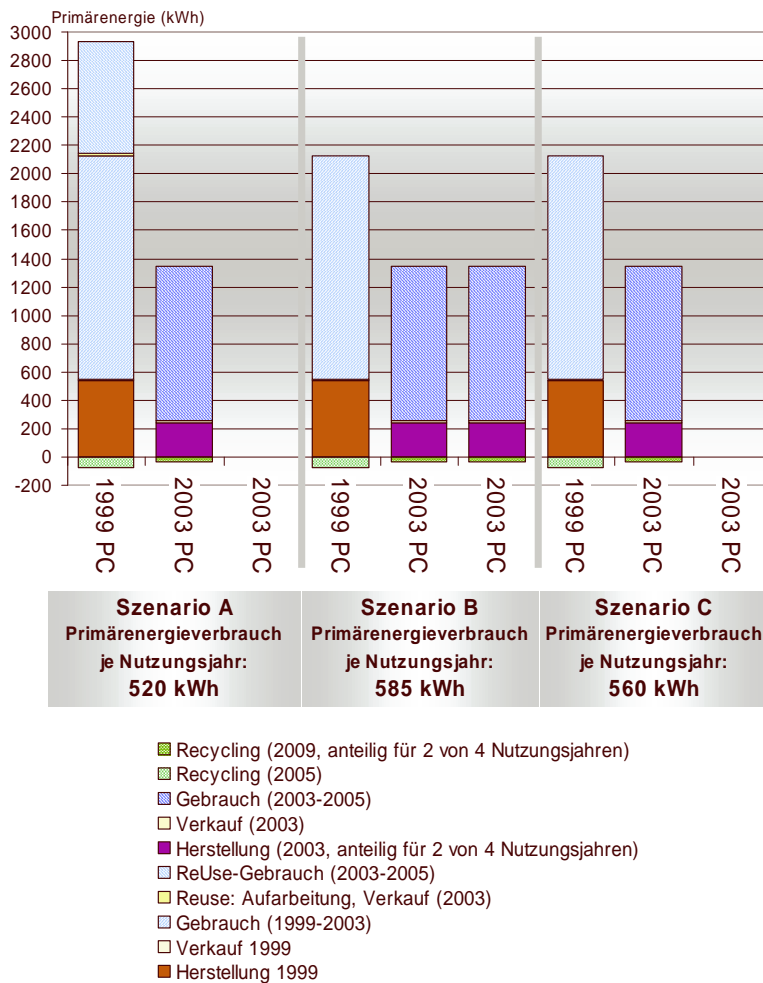


Abbildung 9: Vergleich der ReUse-Szenarien (Primärenergieverbrauch)

## 2.5. Bewertung

Die Ergebnisse der Umweltbewertung lassen sich mit folgende Kernaussagen zusammenfassen:

- Die Herstellung von PCs ist über die Jahre umweltfreundlicher geworden. Bedingt ist dieser Trend vor allem durch immer effizientere, ausgereifere Fertigungsprozesse, weniger durch Miniaturisierungseffekte.
- Andererseits steigt die Anzahl verkaufter PCs schneller an als Effizienzverbesserungen erreicht werden, so dass global betrachtet die PC-Herstellung immer mehr Energie verbraucht.
- Der Energieverbrauch für die Herstellung eines PCs entspricht in etwa dem Spritverbrauch einer Autofahrt von Berlin nach München. Die Herstellung von PCs weltweit ist vergleichbar mit dem Energieverbrauch einer mitteleuropäischen Millionenstadt von der Größe Münchens – einschließlich des dortigen Verkehrs und der Industriebetriebe.
- Bei einer Nutzungsdauer von 4 Jahren eines PCs bei einem durchschnittlichen Nutzer macht die Herstellung etwa 23% des Gesamtenergieverbrauchs des PCs über seine gesamte Lebensdauer aus bzw. 29% des gesamten CO<sub>2</sub>-Ausstoßes.
- Für die durchschnittliche 4-jährige PC-Nutzung verbraucht man Energie entsprechend dem Spritverbrauch einer Autofahrt von München nach Valencia in Spanien (über 1.700 km).
- Die Weiterverwendung eines 4 Jahre alten PCs für weitere 2 Jahre anstelle des Kaufs eines neuen PCs verringert den auf's Nutzungsjahr bezogenen Energieverbrauch um rund 11%.
- Trotz Energiesparfeatures neuerer PCs ist der Energieverbrauch dieser Rechner im Arbeitsalltag höher – bedingt durch das Nutzerverhalten: Mit der Einstellung der Energiesparmodi ist der Durchschnittsanwender nicht vertraut.
- Das Recycling von PCs unter Rückgewinnung der metallischen Bestandteile – soweit technisch machbar – und der thermischen Nutzung der Kunststoffanteile ermöglicht quasi eine Rückgewinnung von rund 13% der

für die Herstellung aufgewendeten Energie, indem Rohstoffe im Wirtschaftskreislauf gehalten werden. Die restlichen 87% des „energetischen Rucksacks“ gehen unwiederbringlich verloren, sobald der PC entsorgt wird – selbst bei Demontage und Materialrecycling. Das spricht eindeutig für Reuse, denn damit lassen sich 100% der Herstellungsenergie für ein längeres PC-Leben retten.

- Die Reparatur lohnt sich ökologisch fast immer, wenn dadurch die Lebensdauer verlängert wird und ein neuer PC ersetzt werden kann
- Die Transporte für das ReUse spielen in der Gesamtbilanz bei regionalen Einzugsbereichen (sowohl hinsichtlich Abholung der Rechner als auch dem Transport von ReUse-Rechnern zum Zweitnutzer) fast keine Rolle – bei bundesweiten Transporten in kleinen Einheiten wäre der Transportaufwand dagegen nicht ganz zu vernachlässigen.