

iit-kompakt 08 ■ Janine Kleemann, Gregor Schwartz, Antje Zehm

Grüne(re) Elektronik – Wo sind die größten Baustellen und wo die besten Hebel?

Die Digitalisierung bietet enorme Möglichkeiten unsere Welt nachhaltiger zu gestalten, Effizienzpotenziale zu heben und den „Papiertiger“ zu überwinden. Gleichzeitig verursacht die Informations- und Kommunikationselektronik (IKT) getrieben durch die Digitalisierung einen stark wachsenden Energie- und Ressourcenverbrauch. Hier geht es um Herausforderungen und Lösungen auf dem Weg zu mehr Nachhaltigkeit in der Elektronik.

Fakt ist: Elektronik selbst muss grüner werden um die Potenziale der Digitalisierung in möglichst vielen Anwendungen sinnvoll und nachhaltig nutzbar zu machen. Auf den folgenden Seiten werden Schwierigkeiten und Herausforderungen auf dem Weg zu mehr Nachhaltigkeit in der Elektronikentwicklung dargestellt sowie das aktuelle Forschungsgeschehen zur Identifikation von Lösungen übersichtlich zusammengestellt.

Lebenszyklus eines Elektronikproduktes: Wo liegen die ökologischen Potenziale und welche Lösungsansätze sind in Arbeit?

Wie alle Produkte besitzen auch Elektronikprodukte einen Lebenszyklus (Abb. 1), der mit der Rohstoffgewinnung beginnt und über Herstellung und Nutzung derzeit überwiegend als Abfall endet.

Möchte man ökologische Potenziale entlang dieses Lebenszyklus heben, so ist dies prinzipiell in zwei verschiedenen Ebenen denkbar:

- A) zum einen durch ökologisch wertvolles Handeln der Akteure entlang der Wertschöpfungskette bzw. entlang der einzelnen Phasen des Lebenszyklus eines Elektronikprodukts, oder aber
- B) durch den Einsatz innovativer Technologien aus Forschung und Entwicklung an einem konkreten Produkt innerhalb der Technologiefelder der IKT.

In einer ganzheitlichen ökologischen Betrachtung ergänzen sich beide Ansätze.

A) Ökologische Potenziale in der Wertschöpfungskette

In der ersten Phase, der **Rohstoffgewinnung**, sind ökologische Potenziale dadurch hebbar, dass der Produzent einen möglichst hohen Anteil an Sekundärrohstoffen einsetzt. Das setzt voraus, dass Produzenten bereits am Anfang der Wertschöpfungskette Verantwortung übernehmen und ihre Lieferketten möglichst transparent gestalten. Trotz gesetzlicher Vorgaben in Deutschland ist die globale Marktsituation in diesem Punkt aktuell nicht zufriedenstellend.

In der **Herstellungsphase** liegt der ökologische Hebel zumeist in der Nutzung lokal und regenerativ erzeugten Stromes. Gerade für die Herstellung elektronischer Geräte (siehe auch (B)) liegt hier der Großteil der Energieverbrauchs). Aber auch der Verbrauch von Ressourcen wie Wasser spielt eine wichtige Rolle und erlangt zunehmend ökologische Relevanz.

Die **Nutzungsphase** ist für Elektronikprodukte im Rahmen der ökologischen Betrachtung hauptsächlich durch Stromverbrauch gekennzeichnet. Grob gilt: je größer die Geräte und je höher ihr Stromverbrauch, umso bedeutender ist der Anteil der Nutzungsphase in der Lebenszyklusanalyse. Bei kleineren Geräte wie Sensoren oder Smart Watches fällt der Energieverbrauch in der

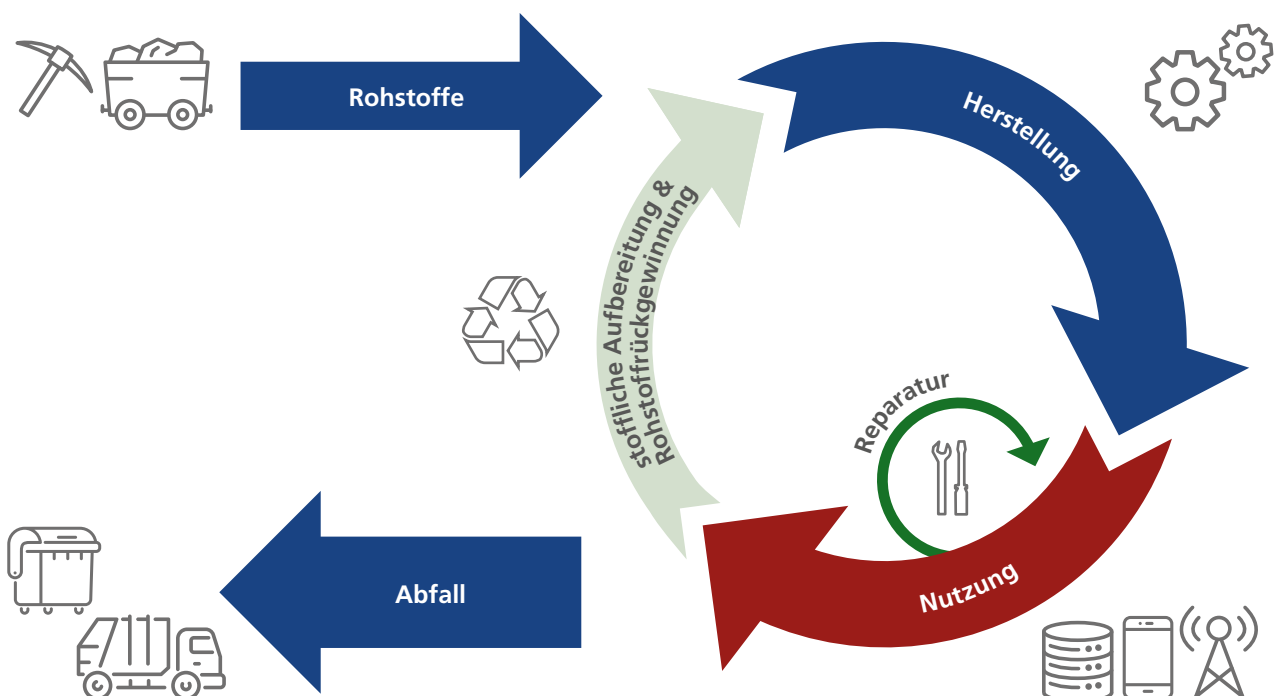


Abbildung 1: Lebenszyklus von Elektronikprodukten (eigene Darstellung)

Nutzungsphase weniger stark ins Gewicht, sodass ökologische Vorteile durch eine lange Nutzungszeit entstehen. Energieeffizienzvorgaben, wie es sie bereits für Haushaltsgeräte gibt, unterstützen stetige Verbesserungen im Energieverbrauch. Im Rahmen der Ökodesign-Richtlinie befinden sich erste Produktgruppen für Elektronikgeräte in Vorbereitung. Eine Fortführung und Ausweitung auf möglichst viele Produktgruppen ist ein entscheidender Schritt hin zu mehr Nachhaltigkeit.

Am Ende der regulären Nutzungszeit setzt die **Reparatur** oder „Überholung“ an. Die Reparatur bietet die Möglichkeit mit geringem stofflichen Aufwand die Nutzungsphase teils erheblich zu verlängern. Dieser Aspekt ist zwar bekannt, widerspricht jedoch teilweise dem wirtschaftlichen Interesse am Verkauf neuer Produkte und spielt daher aktuell eine untergeordnete Rolle. Aus ökologischen Gesichtspunkten muss dieser Pfad verstärkt werden, um eine möglichst lange Nutzung der aufwendig hergestellten Produkte zu gewährleisten. Das gilt speziell in der Elektronik sowie allgemein für alle Produkte. Im Bereich der Elektronik müssen dafür insbesondere die Prinzipien der Modularität und Reparierbarkeit stärker in den Fokus der Produktentwicklung genommen werden. Der Austausch von Einzelkomponenten muss ermöglicht werden, auch durch gesetzliche Vorgaben. Auch eine Weiterverwendung in weniger anspruchsvollen „second life“ Anwendungen bildet einen entscheidenden Hebel für mehr Nachhaltigkeit (nicht nur) in der Elektronik.

Ist ein Elektronikprodukt kaputt oder erfüllt seine Funktion nicht mehr (ausreichend), wird es in den allermeisten Fällen zu **Abfall**. Im schlimmsten Fall landet es fälschlicherweise im Hausmüll, bestenfalls jedoch auf dem Wertstoffhof im Elektroschrott, von dem beispielsweise in Deutschland weniger als die Hälfte recycelt wird. Insbesondere verklebte und fest verbaute Elektronik wird in den seltensten Fällen von der (Plastik-)Hülle getrennt und separat verwertet. Ein beachtlicher Teil des Elektronikabfalls verbleibt außerdem in der „heimischen Schublade“, welche aus diesem Grund bereits als „urbane Mine“ bezeichnet wird. Im Hinblick auf die begrenzten Ressourcen und die aufwändige Herstellung der vielen Einzelkomponenten liegt hier eine große Herausforderung. Relevante Pfade für Wiederaufbereitung, **stoffliche Verwertung** und ggf. umweltgerechte Lagerung aktuell (noch) nicht sinnvoll trennbarer Komponenten zu schaffen und einzufordern. Gute Ansätze sind insbesondere für Batterien und Solarmodule vorhanden, da sie aus vielen baugleichen Komponenten bestehen. Zudem sind besonders wertvolle Materialien wie spezielle Metalle und seltene Erden oder auch umweltschädliche Stoffe wie etwa Blei in größeren Mengen enthalten. In typischen Elektronikprodukten liegen die Wertstoffe jedoch in so großer Vielfalt (über 60 Elemente auf einer Leiterplatte) und dabei in geringer Konzentration vor, dass eine Wiedergewinnung nur unter großem technologischen Aufwand oder sogar noch

gar nicht möglich ist.

Zusammenfassend lässt sich in dieser Betrachtungsebene sagen, dass „grüne(re)“ Elektronik darauf beruht

- lokal regenerativ erzeugten Strom zu verwenden,
- kritische Materialien in den Fertigungsprozessen zu substituieren bzw. zu reduzieren und
- unbrauchbare Komponenten und Geräte in den Kreislauf der Nutzbarkeit zurückzuführen.

Diesen Anspruch in einer hochautomatisierten Branche mit hohen Investitionskosten, Kostendruck der Massenproduktion, staatlichen Subventionen und starken konjunkturellen Schwankungen zu etablieren, ist eine zentrale Aufgabe aller Akteure entlang der Wertschöpfungskette, wobei die Politik hier maßgeblich den Rahmen setzen muss.

B) Technische Lösungen

Je nachdem wie und wo Elektronik in der IKT eingesetzt wird, sind die Potenziale für mehr ökologische Nachhaltigkeit unterschiedlich groß und entlang des Lebenszyklus gewichtet. Im Folgenden werden daher in den drei IKT-Kategorien **Rechenzentren, Kommunikationsnetze und Endgeräte** die Lebenszyklusphasen mit dem höchsten Impact auf die ökologische Nachhaltigkeit ausgewiesen und aktuell in der Forschung untersuchte Lösungsansätze genannt.

Die in **Rechenzentren** eingesetzte Elektronik, Chips und Datenspeicher werden schon aus wirtschaftlichen Erwägungen der Betreiber in der Regel mehrere Jahre genutzt und hoch ausgelastet, sodass der Hauptanteil des ökologischen Fußabdrucks in der Nutzungsphase entsteht. Entsprechend liegt hier der größte Hebel in der Optimierung der Rechenleistung pro eingesetzter elektrischer Leistung im Gesamtsystem Rechenzentrum. Energieeffizientere Hardware und spezielle Beschleunigerchips, beispielsweise für KI-Algorithmen befinden sich aktuell in der Entwicklung und können ein Teil der Lösung werden. Weiteres Potenzial für Verbrauchsoptimierungen liegt in spezieller Software, welche besser auf die Hardware zugeschnitten ist, sowie im dynamischen Management von Rechenlasten innerhalb des Rechenzentrums.

In den **Kommunikationsnetzen** werden Elektronik, Chips zur Datenverarbeitung und sogenannte Transceiver (Sender- und Empfängereinheit in einem) an den Schnittstellen und Verteilern im Festnetz und im mobilen Funkzugangnetz eingesetzt. Auch hier geben wirtschaftliche Rahmenbedingungen eine möglichst

hohe Auslastung vor, sodass die Nutzungsphase für den ökologischen Fußabdruck hauptauschlaggebend ist. Teilweise hohe tageszeitliche Fluktuationen der Nutzungsintensität und das aus Sicherheitgründen notwendige Vorhalten von Kapazität führen jedoch dazu, dass die Leistungsfähigkeit der Elektronik häufig überdimensioniert ist. Demnach wird die Elektronik die meiste Zeit außerhalb des optimalen Arbeitspunktes betrieben und verursacht eine hohe Grundlast. Lösungsansätze in der Forschung beschäftigen sich daher beispielsweise mit schneller schaltbaren Komponenten und Prognosen für die Netzauslastung mittels künstlicher Intelligenz, welche in Kombination die Grundlast erheblich senken können. Darüber hinaus liegen große Potenziale in der Reduzierung der Datenübertragungsmenge durch Datenvorverarbeitung und Kompressionsverfahren, welche jedoch durch Rebound-Effekte und den ungebrochenen Trend zu immer größerem Datenaufkommen in der Digitalwirtschaft größtenteils wieder verschwindet.

Endgeräte wie Mobiltelefone und Laptops schließlich sind in der Regel gekennzeichnet durch hohe Energieeffizienz, jedoch eine relativ geringe Nutzungsdauer aufgrund mangelnder Reparierbarkeit, Obsoleszenz und schneller Innovationszyklen. Damit liegt der überwiegende Anteil des ökologischen Fußabdrucks in der Herstellungsphase der Elektronik. Effizientere Prozesse mit weniger Ausschuss, die Wiederaufbereitung verwendeter Prozesschemikalien, aber auch die Suche nach Alternativen für besonders umweltschädliche Chemikalien wie Per- und polyfluorierte Alkylverbindungen (PFAS) sind Lösungsansätze mit potenziell großer Wirkung in der hochautomatisierten Serienfertigung von Elektronik. Andererseits liegt bei Endgeräten auch ein großes Potenzial für mehr Nachhaltigkeit in der Änderung des Konsumentenverhaltens. Je länger ein Mobiltelefon genutzt wird, desto kleiner wird der ökologische Fußabdruck pro Jahr. Dies setzt jedoch voraus, dass Konsumenten auch nach dem Kauf über viele Jahre die Möglichkeit haben, ein Gerät reparieren zu lassen und die Software auf dem aktuellen Sicherheitsstand zu halten.

Die genannten Ansätze zeigen konkrete technische Möglichkeiten zur Erhöhung der Nachhaltigkeit in den einzelnen Lebenszyklusphasen auf. Selten werden jedoch quantifizierbare Aussagen getroffen, in welchem Verhältnis die in Erforschung befindlichen Lösungsansätze und der ökologische Fußabdruck stehen. Für eine Aussage über die tatsächliche Höhe des ökologischen Potenzials, eine nachvollziehbare und belegbare Beschreibung des Hebels sind Lebenszyklusanalysen unentbehrlich.

Lebenszyklusanalyse erlaubt quantifizierbare Aussagen zum Einsparpotenzial

Für eine konkrete Aussage über die tatsächliche Höhe der ökologischen Potenziale einer technischen Innovation muss eine

Produktökobilanz (ISO/DIN14040) erstellt werden. Diese erfasst den kompletten Lebenszyklus eines Produktes in einer **Sachbilanz**, welche alle Stoff- und Energieströme berücksichtigt. Formal unterscheidet sich die Sachbilanz eines Elektronikproduktes nicht wesentlich von der eines T-Shirts oder Apfels. Für die Herstellung von Elektronikprodukten wird neben vielen verschiedenen Rohstoffen (auch sozial oder umwelttechnisch kritischen) vor allem Energie in Form von Strom benötigt, um Reinraumtechnik sowie die hochkomplexe Prozesstechnik zu betreiben.

In der Praxis ist die Erfassung der Stoffströme aufgrund der Vielzahl der Prozesse, Prozessschritte und der großen Anzahl an Arbeitsschritten in vielschichtigen Lieferketten äußerst anspruchsvoll. Daher ist die Ökobilanzierung selbst ein Forschungsthema der Elektronik und die Erstellung von Ökobilanzen basiert derzeit noch oft auf Abschätzungen. Dennoch ermöglichen diese Bilanzen einen Überblick auf die aus ökologischer Sicht wichtigsten Phasen bzw. Prozesse im Lebenszyklus und geben Anstoß, die Hebel für Optimierungen zu identifizieren.

Das Wissen über das Aufstellen einer solchen Ökobilanz ist also essentiell, um Elektronik wirklich „grün(er)“ zu gestalten. Aufgrund der Vielschichtigkeit der Lieferketten und der technischen Komplexität ist dies ein Forschungsthema, welches zum Beispiel im vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten „Kompetenzzentrum für eine ressourcenbewusste Informations- und Kommunikationstechnologie“ (Green-ICT@FMD) bearbeitet wird. In dem Vorhaben der Forschungsfabrik Mikroelektronik Deutschland (FMD) werden in drei Hubs die Fokusthemen „Sensor-Edge-Cloud-Systeme“, „Kommunikationstechnik“ und „Grüne Produktion in der Halbleiterfertigung“ adressiert, Grundlagen zur Ökobilanzierung vermittelt und das Bilden von Netzwerken unterstützt. Für interessierte Unternehmen besteht zudem die Möglichkeit, sich in User Groups und Validierungsprojekten einzubringen, sich als Förderprojekt von der Begleitforschung zur Ökobilanzierung beraten zu lassen oder ein eigenes Projekt im Start-Up-Modul bei der FMD umzusetzen. Die Aus- und Weiterbildung von Fachkräften wird in verschiedenen Aspekten adressiert: eine Green-ICT-Webseite stellt wichtige Erkenntnisse zusammen, es wird ein Kursangebot entwickelt (online/offline), ein Studierendencamp umgesetzt, ein Studienpreis vergeben und eine Spiele-App entwickelt.

Doch nicht nur das Kompetenzzentrum steht Wissenschafts- und Wirtschaftsakteuren unterstützend und beratend zur Seite. Verschiedene Programme im BMBF, im Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) und im Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) ermöglichen Forschungsvorhaben zur Verbindung von ökologischen Fragestellungen mit technischen Lösun-

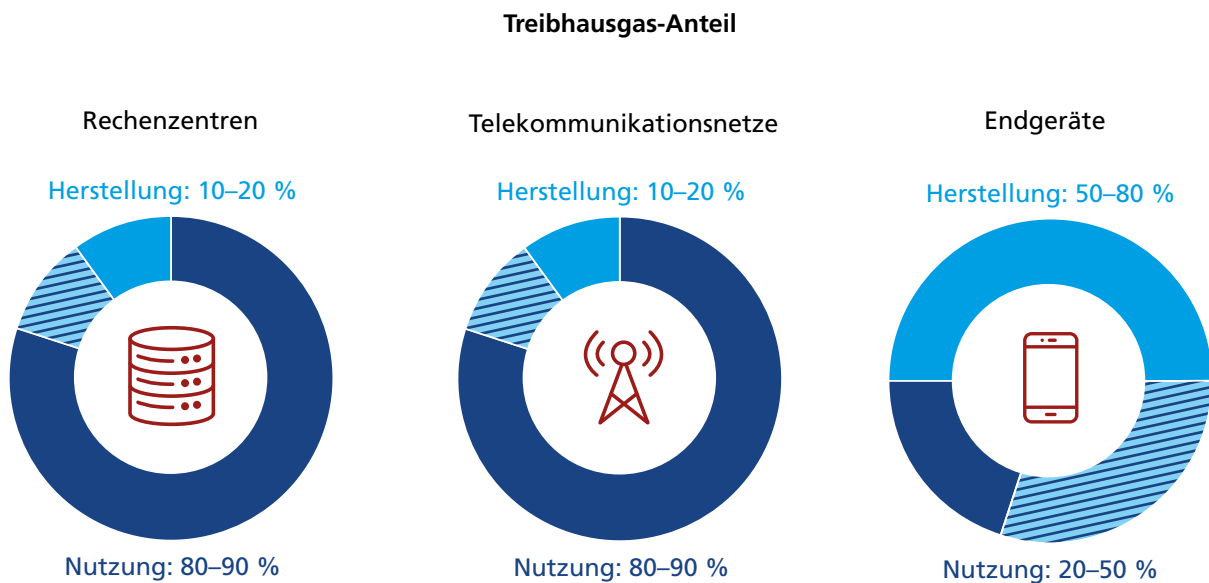


Abbildung 2: Verteilung des Treibhausgas-Anteils auf Herstellung und Nutzung; eigene Darstellung nach: Klimaschutz durch digitale Technologien (bitkom.org)

gen. Zum Beispiel werden im Rahmenprogramm der Bundesregierung für Forschung und Innovation 2021–2024 „Mikroelektronik. Vertrauenswürdig und nachhaltig. Für Deutschland und Europa“¹ innovative Lösungen von technologischer Seite gefördert, für die teilweise ein Bezug zur Ökobilanzierung gefordert ist.

Trotz bestehender Fördermöglichkeiten und aussichtsreicher Projektansätze besteht weiterhin eine große Umsetzungslücke für das interdisziplinäre Themenfeld nachweislich „grüner“ Elektronik. Wichtige Aufgabe für die politische Gestaltung wird es daher sein, interdisziplinäre Netzwerke und Weiterbildungsmöglichkeiten zu fördern, in denen dieser Austausch stattfinden kann. Auch rechtliche Vorgaben können erheblich dazu beitragen, vorhandene Ansätze in der Breite umzusetzen.

Sytemischer Ansatz für ökologische Forschungsfragen in der IKT

Anhand verschiedener Beispiele wurden die unterschiedlichen Einflussfaktoren für eine nachhaltige Nutzung von Elektronik erläutert. Zu betonen ist, dass ökologische Potenziale in der Elektronik nicht allein in der Verbesserung der Technik liegen, sondern auch soziale Aspekte wie das Nutzungsverhalten einen großen Einfluss haben. Das Teilen elektronischer Gegenstände, das bewusster Abwägen des tatsächlichen Nutzens eines Elek-

tronikproduktes vor der Kaufentscheidung, oder auch die Befähigung zur Reparatur sind weitere Aspekte mit großem Nachhaltigkeitspotenzial. Gleichzeitig bedarf es auch Lösungen aus anderen technischen Disziplinen: Beispielsweise kann eine Kreislaufführung erst mit besseren Verfahren zur Rückgewinnung wertvoller Metalle aus Elektronikschrott wirtschaftlich und ökologisch nachhaltig sein.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass „grüne“ und nachhaltige Elektronik nur durch interdisziplinäre und auch intersektorale Zusammenarbeit entstehen kann. Ein stärkerer Austausch von Know-how über wissenschaftliche Bereiche von der Ökologie zur Technologie bis hin zur Soziologie und die gegenseitige Inspiration durch andere Sichtweisen können die entscheidenden Impulse für echte nachhaltige Innovationen in der Elektronik geben.

¹ <https://www.elektronikforschung.de/elektronikforschung/rahmenprogramm>



Herausgeber

Prof. Dr. Volker Wittpahl
Institut für Innovation und Technik (iit)
in der
VDI/VDE Innovation + Technik GmbH
Steinplatz 1, 10623 Berlin

Zitation

Kleemann, Janine; Schwartz, Gregor;
Zehm, Antje (2023): Grüne(re) Elektronik –
Wo sind die größten Baustellen und wo
die besten Hebel? iit-kompakt Nr. 08.
Hrsg. vom Institut für Innovation und
Technik (iit), Berlin.

iit-kompakt Nr. 08

Juli 2023
Layout: VDI/VDE-IT
Bildnachweis: Pcess609/AdobeStock
(Titelseite); Mykola/Matsabe/AdobeStock
(S. 2); VDI/VDE-IT (S. 2, 5)

Autoren

Janine Kleemann
E-Mail: janine.kleemann@vdivde-it.de

Gregor Schwartz
E-Mail: gregor.schwartz@vdivde-it.de

Antje Zehm
E-Mail: antje.zehm@vdivde-it.de