

**Siegfried Behrendt**  
**Klaus Fichter**  
**Jens Clausen**  
**Lorenz Erdmann**  
**Ralph Hintemann**  
**Max Marwede**  
**Sophie Caporal**

IZT - Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung,  
gemeinnützige GmbH

Borderstep Institut für Innovation und Nachhaltigkeit,  
gemeinnützige GmbH

## Kooperatives Roadmapping als Instrument innovationsorientierter Ressourcenpolitik

### Zusammenfassung

Zusammenfassung der Ergebnisse des Arbeitspakets 9  
des Projekts „Materialeffizienz und Ressourcenschonung“  
(MaRes)



Wuppertal, November 2010

ISSN 1867-0237

#### Kontakt zu den Autor(inn)en:

Dr. Siegfried Behrendt/ Lorenz Erdmann/ Max Marwede/ Sophie Caporal  
IZT - Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung,  
gemeinnützige GmbH  
14129 Berlin, Schopenhauerstr. 26  
Tel.: +49 (0) 30/80 30 88 10, Fax: -88  
Mail: s.behrendt@izt.de

Prof. Dr. Klaus Fichter/ Dr. Jens Clausen/ Dr. Ralph Hintemann  
Borderstep Institut für Innovation und Nachhaltigkeit,  
gemeinnützige GmbH  
14167 Berlin, Clayallee 323  
Tel.: +49 (0) 30/306 45 10 00  
Mail: fichter@borderstep.de

#### „Materialeffizienz und Ressourcenschonung“ (MaRes) – Projekt im Auftrag des BMU | UBA

**Projektlaufzeit:** 07/2007 – 12/2010

#### **Projektleitung:**

Dr. Kora Kristof / Prof. Dr. Peter Hennicke

Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH  
42103 Wuppertal, Döppersberg 19

Tel.: +49 (0) 202 2492 -183 / -136, Fax: -198 / -145

Mail: kora.kristof@wupperinst.org  
peter.hennicke@wupperinst.org

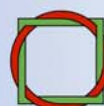
© Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH

Weitere Informationen zum Projekt

„Materialeffizienz und Ressourcenschonung“ (MaRes)  
finden Sie unter [www.ressourcen.wupperinst.org](http://www.ressourcen.wupperinst.org)

Gefördert wird das Vorhaben im Rahmen des UFOPLAN  
durch das BMU und das UBA, Förderkennzeichen: 3707 93 300

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung  
liegt bei den Autor(inn)en.



**Wuppertal Institut**  
für Klima, Umwelt, Energie  
GmbH

#### Wuppertal Institut in Kooperation mit

BASF  
Borderstep  
CSCP  
Daimler  
demea – VDI / VDE-IT  
ECN  
EFA NRW  
FhG IAO  
FhG UMSICHT  
FU Berlin  
GoYa!  
GWS  
Hochschule Pforzheim  
IFEU  
Institut für Verbraucherjournalismus  
IÖW  
IZT  
MediaCompany  
Ökopol  
RWTH Aachen  
SRH Hochschule Calw  
Stiftung Warentest  
ThyssenKrupp  
Trifolium  
TU Berlin  
TU Darmstadt  
TU Dresden  
Universität Kassel  
Universität Lüneburg  
ZEW



Bundesministerium  
für Umwelt, Naturschutz  
und Reaktorsicherheit

**Umwelt  
Bundes  
Amt**   
Für Mensch und Umwelt

## **Kooperatives Roadmapping als Instrument innovationsorientierter Ressourcenpolitik**

### **Früherkennung und Erschließung von Ressourceneffizienzpotenzialen am Beispiel von Roadmapping-Initiativen im Bereich Photovoltaik und Green IT**

#### **Zusammenfassung**

#### **Inhaltsverzeichnis**

<b>1</b>	<b>Anlass und Hintergrund</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Roadmap: Ressourceneffiziente Photovoltaik</b>	<b>4</b>
2.1	Ausgangssituation	4
2.2	Der Dialogprozess	5
2.3	Ergebnisse und Ausblick	6
<b>3</b>	<b>Roadmap Arbeitsplatzbezogene Computerlösungen 2020: Entwicklung eines Leitmarktes für Green Office Computing</b>	<b>13</b>
3.1	Ausgangssituation	13
3.2	Der Dialogprozess	15
3.3	Ergebnisse und Ausblick	16
<b>4</b>	<b>Einsparpotenziale durch Umsetzung der Roadmap: Green IT- Szenario</b>	<b>22</b>
<b>5</b>	<b>Leasson learnt: Was kann ein kooperatives Roadmapping leisten?</b>	<b>24</b>
<b>6</b>	<b>Literatur</b>	<b>26</b>
<b>7</b>	<b>Glossar</b>	<b>27</b>

## Abbildungen

Abb. 2-1: Dialogprozess	5
Abb. 2-2: Relevanz und Zeithorizonte von Maßnahmen bei der Fertigung von c-Si-Modulen	9
Abb. 2-3: Meilensteine für ein herstellerübergreifendes Rücknahme und Logistiksystem	10
Abb. 3-1: Entwicklung des Energieverbrauchs pro Arbeitsplatzcomputer p.a. in kWh in Deutschland (inkl. Herstellung und Terminalservernutzung, ohne Monitor) im BAU-Szenario	17
Abb. 3-2: Entwicklung des Materialeinsatzes pro Arbeitsplatzcomputer in kg in Deutschland (inkl. Terminalserveranteil, ohne Monitor) im BAU-Szenario	17
Abb. 4-1: BAU- und Green IT-Szenario im Vergleich: Energieverbrauch von Arbeitsplatzcomputern in Deutschland (inkl. Herstellung und Terminalservernutzung, ohne Monitor)	22
Abb. 4-2: Materialeinsparung bei Arbeitsplatzcomputern in Deutschland (inkl. Terminalserveranteile, ohne Monitor) durch die Umsetzung der Roadmap (Green IT –Szenario)	22
Abb. 4-3: Einsparung von Stromkosten beim Betrieb von Arbeitsplatzcomputern in Deutschland durch die Umsetzung der Roadmap (Green IT-Szenario)	23

## Tabellen

Tab. 2-1: Mögliche strukturelle Versorgungsengpässe für den Ausbau der Photovoltaik	7
Tab. 3-1: Verschiedene Typen von Arbeitsplatzcomputern im Vergleich	14
Tab. 3-2: Ausgewählte Maßnahmen der Roadmap „Arbeitsplatzbezogene Computerlösungen 2020“	21

## 1 Anlass und Hintergrund

Mit Blick auf Materialeffizienz und Ressourcenschonung kommt der Früherkennung von Innovationschancen und Risiken, neuen Geschäftsfeldern und Märkten eine große Bedeutung für den Innovationserfolg zu. Nachdem BMU und UBA bereits Potenzialabschätzungen vorgenommen haben, die weiter fundiert und präzisiert wurden (vgl. UFOPLAN-Vorhaben „Innovative Umweltpolitik in wichtigen Handlungsfeldern (Zukunftsmärkten)“ (FKZ 206 14 132 / 05), war ein nächster konsequenter Schritt im Rahmen des vom Bundesumweltministerium geförderten Vorhabens „Materialeffizienz und Ressourcenschonung“ (MaRes) die Ableitung konkreter technologischer und marktlicher Herausforderungen sowie die Einspeisung dieser Ergebnisse in staatliche Förderpolitik, Aktivitäten von Verbänden und das Innovationsmanagement von wirtschaftlichen Schlüsselakteuren.

Mit Blick auf diese Aufgabe wurden vom Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung (IZT) und dem Borderstep Institut für Innovation und Nachhaltigkeit Dialogprozesse mit Branchen-, Unternehmens-, Verbraucher- und Wissenschaftsvertretern organisiert. Im Zeitraum von Sommer 2008 bis Sommer 2010 wurden in diesem Rahmen kooperativ sogenannte „Roadmaps“ entwickelt (Vgl. Behrendt 2010). Der Begriff „Roadmap“ wird hier verstanden als die Darstellung eines Entwicklungspfad entlang einer Zeitachse. Auf Basis von Trendanalysen, Befragungen und Dialogworkshops wurden Materialeffizienz- und Ressourcenschonungspotenziale ermittelt und aufbauend darauf Zielsetzungen, Meilensteine und Maßnahmen erarbeitet, mit denen diese Potenziale erfolgreich erschlossen werden können. Dieser systematische Prozess zur Erarbeitung einer Roadmap wird als „Roadmapping“ bezeichnet.

Roadmaps wurden hier exemplarisch für zwei bedeutsame ressourcenrelevante Felder erarbeitet: zum einen für die *Photovoltaik* als jungem dynamischen Technologiefeld und zum anderen für die Informations- und Kommunikationstechnik (IKT) als besonders relevanter Querschnittstechnologie. Innerhalb der IKT wurde auf den besonders wichtigen und dynamisch wachsenden Bereich *arbeitsplatzbezogener Computerlösungen* fokussiert. Analysen zeigen, dass die IKT als Querschnittstechnologie erhebliche, bislang nicht erschlossene Ressourceneffizienzpotenziale birgt. Das Roadmapping ermöglicht die Erarbeitung einer „Straßenkarte“, die viele Einzelthemen bündelt, Handlungsoptionen identifiziert und Prioritäten benennt. Die Früherkennung von Ressourceneffizienzpotenzialen und die Erschließung von Zukunftsmärkten und den damit verbundenen Herausforderungen basiert auf der Analyse von Trends und der Identifikation der treibenden Kräfte. Das Suchfeld richtet sich dabei nicht nur auf die Eigendynamik technologischer und marktlicher Entwicklungen, sondern auch auf leistungsfähige Lebenszyklus- und Systembetrachtungen. Das Roadmapping schafft dafür den notwendigen Rahmen, in dem es eine intelligente Vernetzung und Kommunikation zwischen zentralen Innovationsakteuren sowie eine Wissensintegration ermöglicht.

Während die Anwendung der Roadmapping-Methodik auf der Ebene einzelner Unternehmen oder Branchen oder für die Entwicklung von „Masterplänen“ staatlicher Akteu-



re bereits in der Vergangenheit genutzt wurde, bildet die systematische Zusammenarbeit von Akteuren aus Wirtschaft, Politik, Verwaltung und Wissenschaft eine neue Form und Qualität des „kooperativen Roadmapping“ dar, die im Rahmen von AP 9 des MaRes-Vorhabens an den o.g. Technologiefeldern erprobt wurde. Aus methodischer Sicht stand dabei die Frage im Mittelpunkt, wie ein kooperativer Roadmapping-Prozess gestaltet werden muss, damit er eine innovationsorientierte Umweltpolitik zur Erschließung von Ressourceneffizienzpotenzialen wirksam und erfolgreich unterstützen kann.

## **2 Roadmap: Ressourceneffiziente Photovoltaik**

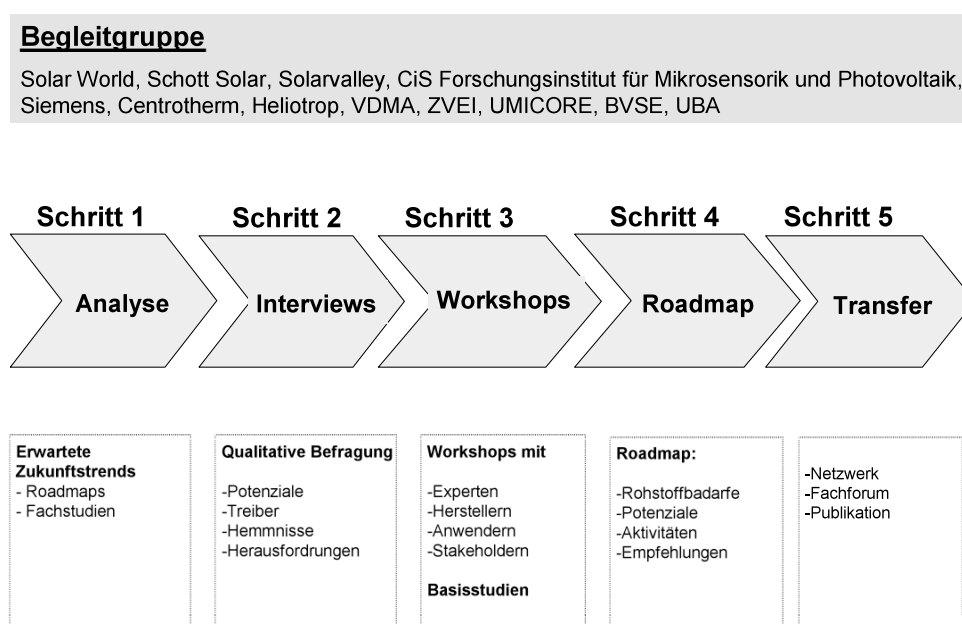
### **2.1 Ausgangssituation**

Die Photovoltaikindustrie ist eine relativ junge Branche. Sie hat sich in den letzten Jahren zu einem profitablen, schnell wachsenden Leitmarkt entwickelt. Dies gilt besonders für den deutschen Photovoltaikmarkt, der vor den USA und Japan der größte und umsatzstärkste ist. In den letzten Jahren wuchs der Photovoltaikmarkt schneller als erwartet, für 2010 wird global mit 8.5 Gigawatt neu installierter Leistung gerechnet. Damit die Photovoltaik zukünftig einen weltweit wichtigen Beitrag zur Energieversorgung übernehmen kann, ist in den nächsten Jahrzehnten ein anhaltend hohes Wachstum notwendig. Dies setzt nicht nur langfristige, verlässliche politische Rahmenbedingungen voraus, sondern erfordert auch eine kontinuierliche Verbesserung der Solartechnologie, der Solarsysteme und der Fertigungstechnik. Eine wesentliche Aufgabe ist dabei die Verbesserung der Materialeffizienz, die Sicherung der Rohstoffverfügbarkeit und die Ressourcenschonung. Materialeffizienz ist ein wichtiges Entwicklungsziel der Photovoltaikbranche und Gegenstand von zahlreichen Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten, um das Preis-Leistungs-Verhältnis der Zellen zu verbessern und damit die Wettbewerbsfähigkeit der Photovoltaikbranche zu sichern und zu stärken. Die Hauptaufgaben liegen in der Erhöhung der Wirkungsgrade der Zellen, der Verbesserung der Produktionsausbeuten und der Optimierung der Lebensdauer und Systemzuverlässigkeit. Trotz Effizienzsteigerungen in den vergangenen Jahren bestehen jedoch noch erhebliche nicht erschlossene Potenziale und stellen sich neue Herausforderungen der Materialeffizienz und der Ressourcenschonung. Damit gewinnen Prozessinnovationen zunehmend an Bedeutung, die an der Material- und Energieersparnis angreifen. Zudem steht die Solarbranche vor der Herausforderung, die in absehbarer Zeit zunehmenden Abfallmengen aus Altmodulen und -produkten einem Recycling zuzuführen, das wirtschaftlich tragfähig und ökologisch effektiv ist. In maßgeblichen Roadmaps der Photovoltaik, die der Solarbranche als strategische Innovationsorientierung dienen sollen, werden bis dato diese Herausforderungen nur gestreift. Deshalb wurde im Rahmen des vom Bundesumweltministerium und Umweltbundesamt geförderten Vorhabens „Materialeffizienz und Ressourcenschonung“ eine Roadmap für eine ressourceneffiziente Photovoltaik erarbeitet. Dies geschah in Kooperation wichtiger Markt- und Verbandsakteure aus unterschiedlichen Bereichen der Solarbranche, des Maschinen- und Anlagenbaus, der Automationstechnik und der Recyclingwirtschaft.

## 2.2 Der Dialogprozess

Die Erstellung der Roadmap stützt sich auf einen breiten Dialog mit bedeutsamen Akteuren der Photovoltaikindustrie und ihres Umfeldes. Gemeinsam mit Unternehmen, Verbänden und Wissenschaftlern wurden Herausforderungen identifiziert, Potenzialabschätzungen vorgenommen und Handlungsmaßnahmen zur Erschließung von Materialeffizienz- und Ressourcenschonungspotenzialen bewertet.

Abb. 2-1: Dialogprozess



Insgesamt haben an dem Roadmapping–Prozess über 60 Experten aus der Photovoltaikwirtschaft teilgenommen. Dies geschah in Form von zwei moderierten Workshops:

- Materialeffizienz und Ressourcenschonung in der Fertigung, am 3.11.2009 in Berlin
- End of Life Recycling, am 11.12.2009 in Berlin

Ergänzt wurden die Workshops durch Interviews mit einschlägigen Experten aus der Photovoltaikbranche, Forschungs- und Entwicklungseinrichtungen sowie Wirtschaftsverbänden. Unterstützt wurde die Erarbeitung der Roadmap von einer Begleitgruppe aus Vertretern von Unternehmen aus verschiedenen Stufen der Wertschöpfungskette der Photovoltaik (Solar World, centrotherm photovoltaics technology GmbH, Heliotop GmbH Solarvalley Mitteldeutschland e.V., Schott Solar, Umicore Precious Metals Refining), Forschungseinrichtungen (CiS Forschungsinstitut für Mikrosensorik und Photovoltaik GmbH, Borderstep Institut für Innovation und Nachhaltigkeit), Verbänden (Verband der Deutschen Maschinen- und Anlagenbauer, VDMA, Zentralverband der Elek-

trotechnik- und Elektronikindustrie, ZVEI, Bundesverband Sekundärrohstoffe und Entsorgung e.V., BVSE) und des Umweltbundesamtes.

## 2.3 Ergebnisse und Ausblick

Zentrale Ergebnisse der Roadmap sind:

**Neue und materialsparende Technologien und Prozesse bieten eine Möglichkeit, dem in den kommenden Jahren zunehmenden Kostendruck zu begegnen:** Der Kostenanteil des Materials an den Solarzellen bildet den größten Kostenblock. Fortschritte bei der Ressourceneffizienz und die Verfügbarkeit von kostengünstigen Rohstoffen sind für die weitere Entwicklung der Solarbranche daher besonders wettbewerbsrelevant. Mittelfristig könnten die Kosten durch die Ausschöpfung der in der Roadmap identifizierten Materialeffizienzpotenziale auf die Hälfte gesenkt werden<sup>1</sup>.

**Mit dem Marktwachstum wird die Photovoltaik stoffstromrelevant.** Gegenwärtig liegt die Photovoltaik noch erheblich unter den Mengen anderer Produkte (wie der Elektronik) und stellt derzeit noch kein vergleichbar großer Stoffstrom dar. Mit der Marktdurchdringung der Photovoltaik wird sich dies aber ändern. 2008 lag der weltweite Stoffstrom für Photovoltaik bei rund 593.000 t. Er könnte sich binnen fünf Jahre verdoppeln und sich bis 2020 vervierfachen. Bis 2030 könnte er weltweit um den Faktor 9 auf rund 5,3 Mio. t anwachsen.

**Versorgungsengpässe sind möglich, die sich in Lieferschwierigkeiten und/oder hohen Preisen äußern.** Um Silber konkurrieren zahlreiche Zukunftstechnologien. Das Angebot an Silber lässt sich nicht ohne weiteres kurzfristig ausweiten, da Silber meist als Kuppelprodukt weniger dynamisch nachgefragter Hauptprodukte gewonnen wird. Bei Tellur für CdTe- und Indium für CIGS-Solarzellen ist mit einem Nachfrageschub zu rechnen, der mittelfristig die heutige Produktion übersteigt. Aufgrund der relativ geringen Materialmengen im Produkt bestehen nur bei hohen Preisen für Tellur und Indium Anreize zum materialeffizienten Wirtschaften. Potentiale zur Ausweitung des Angebots liegen in der verstärkten Ausbeutung der Nebenströme der Verhüttung von Kupfer und Zink, sowie der nachträglichen Abraumaufbereitung. Ob hochreiner Quarz für die Herstellung von metallurgischem Silizium absolut knapp ist, kann derzeit nicht seriös beurteilt werden, da die Vorkommen an hochreinem Quarz nicht systematisch erhoben sind. Es kann allerdings immer wieder zu temporären Rohstoffengpässen kommen, wenn das Angebot mit der dynamischen Nachfrageentwicklung nicht Schritt hält. Hierfür ist nicht nur die Photovoltaik-Branche, sondern in erster Linie die Halbleiterbranche ausschlaggebend.

---

<sup>1</sup> eigene Berechnungen auf der Basis von Wim C. Sinke, Wijnand van Hooff, Gianluca Coletti, Boukje Ehlen, Giso Hahn, Stefan Reber, Joachim John, Guy Beaucarne, Emmanuel van Kerschaver, Mariska de Wild-Scholten, and Axel Metz: Wafer-based crystalline Silicon Modules at 1 €/Wp: Final Results from the crystal clear integrates project. 24<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, 21-25 September 2009



Tab. 2-1: Mögliche strukturelle Versorgungsengpässe für den Ausbau der Photovoltaik

Technologielinien	Begrenzende Materialien	Forschungsbedarfe
<b>Silizium-PV (c-Si, Poly-Si)</b>	Silber (n-Elektrode)	Partielle und vollständige Substitution des Silbers Minimierung der Silbermenge im Produkt
	Indium (TCO)	Vermeidung von ITO, z.B. durch ZnO oder ATO
<b>Dünnschicht-PV</b>		
CdTe	Tellur (Zellmaterial)	Minimierung der Schichtdicke, Erhöhung der Ausbeute, Produktionsabfallrecycling
CIGS	Indium (Zellmaterial)	Minimierung der Schichtdicke, Erhöhung der Ausbeute, Produktionsabfallrecycling
Farbstoff	Indium (TCO)	Vermeidung von ITO, z.B. durch ZnO oder ATO
	Zinn, Platin (TCO)	Erhöhung der Materialeffizienz
<b>III-V PV (Heteroübergang)</b>		
MJC III-V	Germanium (Substrat)	Alternative Substrate
	Gallium (GaAs Substrat)	Lift-off, III-V/Si
MJC III-V, lift-off	Indium (Zellmaterial)	In-free Heteroübergangszellen
	Gold (Elektrode)	Alternative Elektroden

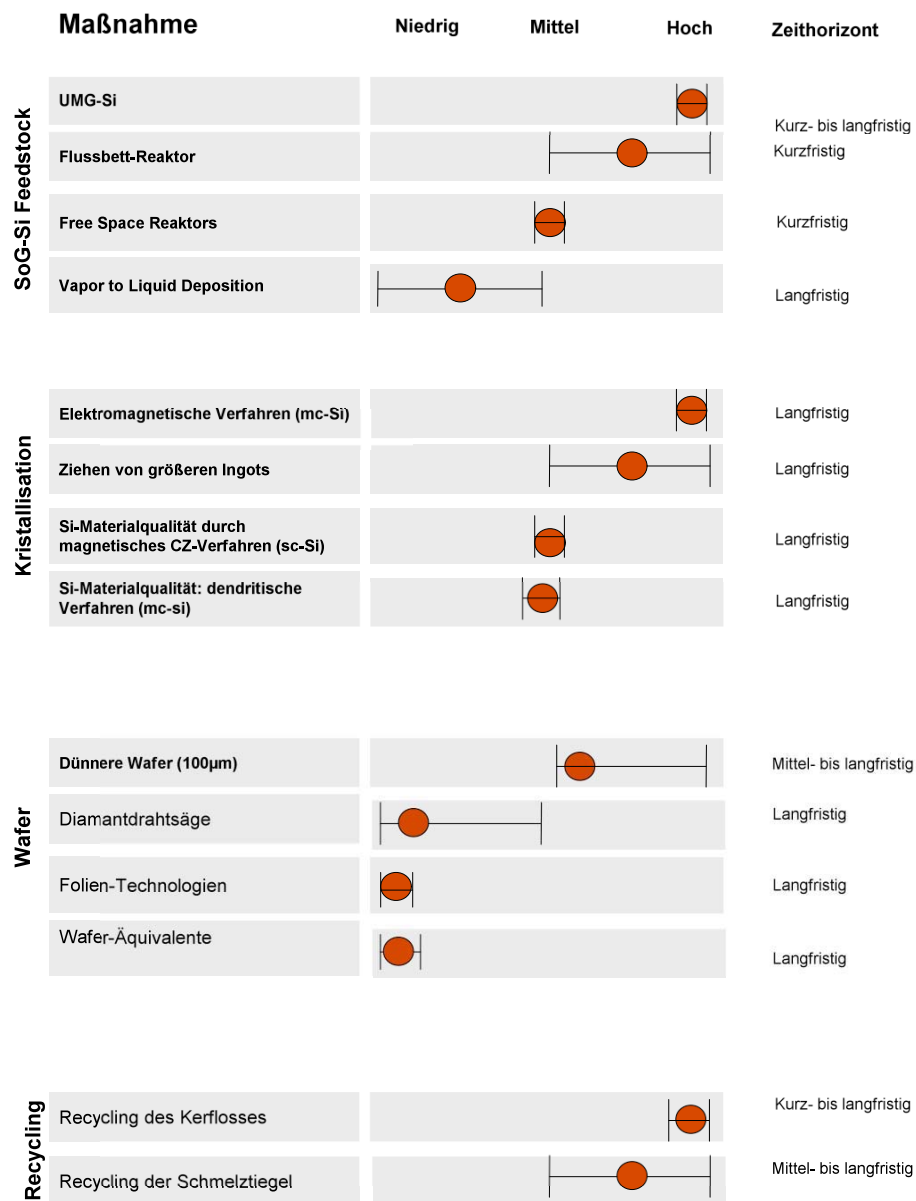
TCO – transparentes leitfähiges Oxid; ITO – Indium-Zinn-Oxid, ATO – Antimon-Zinn-Oxid; MJC – Multi Junction Cells; Zinn und Platin als potenziell begrenzende Faktoren für den Ausbau von Farbstoff-PV sind nur dann limitierend, wenn die Indiumproblematik in TCOs gelindert werden kann.

Quelle: eigene Darstellung des IZT, basierend auf Andersson 2000, DoE 2005, Feltrin, Freundlich 2008 und Feltrin 2009, Hagelüken 2008, ISI / IZT 2009, Ökoinstitut 2009, Ökopol et al. 2007, Wadia et al. 2009, Wäger 2008

**In den letzten Jahren sind im Zuge der dynamischen Marktentwicklung der Photovoltaik deutliche Materialeffizienzfortschritte erzielt worden. Die Low Hanging Fruits in der Fertigung sind faktisch bereits weitgehend erschlossen. Doch die Möglichkeiten, mit weniger Material zu produzieren und die Ressourcen zu schonen sind damit noch längst nicht ausgeschöpft.** Noch bestehende kurzfristige Potenziale befinden sich (bei der kristallinen Siliziumtechnologie) hauptsächlich bei der Herstellung von Solar-Grade-Silizium (SoG-Si) aus metallurgischem Silizium (MG-Si), dem Einsatz des Flussbettreaktors als auch des Free Space Reaktors für die Herstellung von SoG-Si. Kurzfristig umsetzbar sind auch rahmenlose Module, die Reduzierung der Glasdicke ist ebenfalls kurz- bis mittelfristig realisierbar. Langfristig relevant ist vor allem das elektromagnetische Verfahren zur Herstellung von Silizium in ausreichender Qualität und akzeptablen Kosten. Bei der Dünnschichttechnologie ist die Optimierung des PECVD-Prozesses (Plasma Enhanced Chemical Vapour Deposition) bei der Herstellung der a-Si-Absorberschicht (amorphes Silizium) und die Reduzierung der Absorberschicht bei der CIS Technologie (Kupfer-Indium-Diselenid) besonders vielversprechend. Erst in langfristiger Sicht sind neuartige Zell- und Modulkonzepte zu erwarten, die materialeffizient sich mit den Anforderungen der industriellen Produktion verknüpfen lassen.

**Die Analyse der Rohstoffbedarfe hat gezeigt, dass die Minimierung des Materialgehalts im Produkt, Erhöhung der Prozessausbeute und Produktionsabfallrecycling heute die effektivsten Materialeffizienzstrategien sind.** Kurz- und mittelfristig sind vor allem Maßnahmen im Bereich des Produktionsabfallrecyclings und der Materialeffizienz in der Fertigung (Ausbeuteerhöhung, Minimierung der Rohstoffmenge im Produkt) wirksam. Dennoch müssen schon heute die Voraussetzungen für das Altmodulrecycling geschaffen werden, da die Abfallströme mit hoher Latenz anfallen (Design for Recycling). Langfristig ist auch das Altmodulrecycling zur Rohstoffrückgewinnung wirksam (Urban Mining). Mit verstärkter Umsetzung von Materialeffizienz in der Fertigung sinken die absoluten Beiträge des Produktionsabfallrecyclings und des Altmodulrecyclings.

Abb. 2-2: Relevanz und Zeithorizonte von Maßnahmen bei der Fertigung von c-Si-Modulen

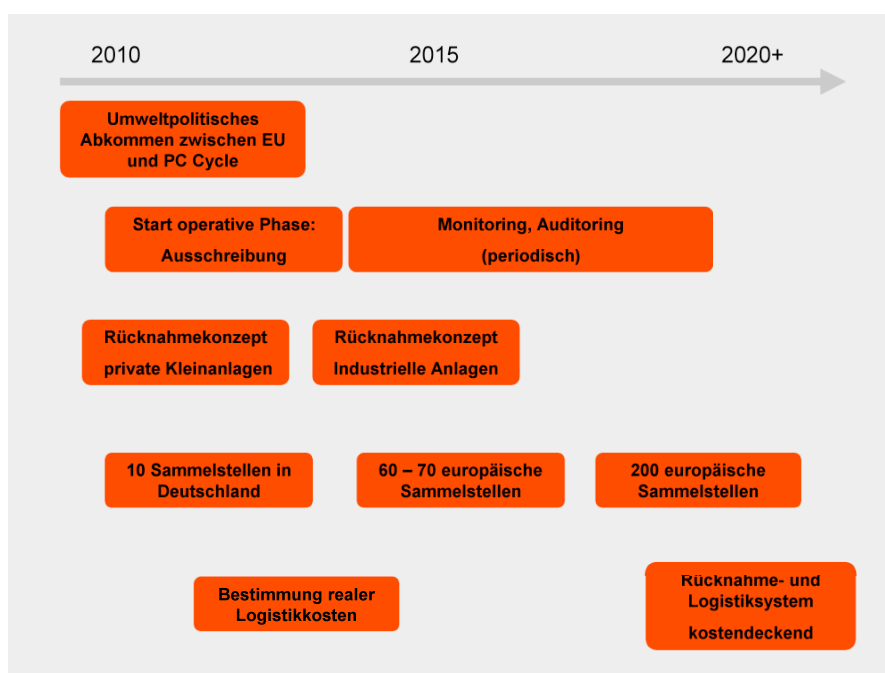


Quelle: Workshop "Materialeffizienz und Ressourcenschonung in der PV-Fertigung", IZT, Berlin 3.11.2009

**Für das EoL-Recycling sind geeignete Strukturen aufzubauen, Massenverfahren für gemeinsames Recycling mit defekten Neomodulen zu entwickeln und nach eingehender Prüfung ggf. auch Schwerpunkte (z.B. auf Glas, Stahl, Aluminium und Kupfer) zu setzen, insbesondere auch vor dem Hintergrund sinkender Rohstoff-**

gehalte im Produkt. Noch zu lösende Aufgaben betreffen auch ein ökologisch sinnvolles Recycling, das nicht nur die Massenwerkstoffe erfasst, sondern auch sicherstellt, dass „seltene“, aber für Zukunftstechnologien essentielle Edel- und Sondermetalle einer Verwertung zugeführt werden. Mengenbasierte Recyclingquoten wie sie in der WEEE-EU-Richtlinie (Waste Electrical and Electronic Equipment) gefordert werden, sind nicht ausreichend, weil sie Funktionsmaterialien, die in geringen Anteilen im Produkt vorliegen, nicht erfassen.

Abb. 2-3: Meilensteine für ein herstellerübergreifendes Rücknahme und Logistiksystem



Quelle: Workshop End of Life Recycling, 11.12.2009, Berlin.

**Die Erschließung der Ressourceneffizienzpotenziale erfordert die Überwindung einer Reihe von Hemmnissen.** Die Umstellung von Anlagen erfordert erhöhte Investitionskosten, die technologische Komplexität mancher Prozesse und Qualitätsprobleme (Reinheitsgrad des Siliziums) sind noch zu lösen. Relativ unsicher ist die Einschätzung bezüglich des Recyclings von Produktionsabfällen, gleichwohl es ein beachtenswertes Potenzial gibt, die Unsicherheit bei der Umsetzung entsprechender Konzepte ist hier am größten. Auf absehbare Zeit gibt es keinen „Königsweg“ für eine ressourceneffiziente Photovoltaik, vielmehr sind Einzelfallprüfungen notwendig, um Zielkonflikte zwischen verschiedenen Anforderungen auszubalancieren. Dabei geht es insbesondere um systemische Innovationen durch interdisziplinäre FuE mit Produktentwicklern, Maschinen- und Anlagenbau und Prozesstechnikern. Im einzelnen wurden für die verschiedenen Solartechnologien mehrere Bereiche, in denen vordringlich weitere Verbesserungen durch geeignete F+E-Aktivitäten erreicht werden sollten, in der Roadmap identifiziert. Dazu gehören beispielsweise: standardisierte analytische Methoden zur Messung der Verunreinigungen und zur Quantifizierung von Materialkennzahlen; Entwicklung von flexiblen Wafern, um das Handling der sehr fragilen Wa-

fer zu verbessern; hydrometallurgische und chemische Prozesse zum Recycling der Produktionsabfälle (bei Dünnschichttechnologien) und die Entwicklung von Alternativen zu Silber als Kontaktierungsmaterial.

**Benchmarking: Um die Erschließung von Ressourceneffizienzpotenzialen zu unterstützen, ist eine breite Informationsbasis notwendig, wie sie ein Kennzahlensystem für Material- und Energieeffizienz liefern kann.** Solche Kennzahlen verdichten umfangreiche Daten auf eine überschaubare Anzahl aussagekräftiger Schlüsselinformationen. Eine besondere Stärke der Kennzahlen liegt darin, dass sie wichtige Schwachstellen und Optimierungspotenziale aufzeigen. Durch Vergleich können Effizienzmöglichkeiten aufgedeckt werden. Im Rahmen ihres Umweltmanagements ermitteln verschiedene Firmen der PV-Branche bereits Umweltkennzahlen, so werden beispielsweise periodisch Abfallmengen, Wasserverbrauch und Energieverbrauch auf Unternehmensebene erfasst. Sie werden bisher aber noch selten systematisch auf Prozessebene heruntergebrochen und für das Aufdecken von Optimierungspotenzialen genutzt.

**Leuchtturmprojekte für ein „Smart Integrated Manufacturing“ initiieren: Ressourceneffizienz würde erheblich erleichtert, wenn deutliche Fortschritte in der Integration, zu größeren Fertigungseinheiten und in der Automatisierung erzielt würden.** Um den Durchsatz spürbar weiter zu erhöhen und die Qualität zu verbessern, gewinnen automatisierte und neue Fertigungskonzepte an Bedeutung. Waren vor einigen Jahren alle Fabriken noch „maßgeschneiderte“ Unikate mit zum Teil erheblichen Anteilen von Handarbeit, so gibt es heute bereits für die Ingot-, Zell- und Modulfertigung weitgehend automatisierte Fertigungsstrassen schlüsselfertig zu kaufen. Vertikal integrierte und vollautomatisierte Produktionsanlagen sind Stand der Technik, aber kaum realisiert. Ausbeute, Kostenreduzierung, hohe Produktionsqualität und Standardisierung der Produktion sind durch die Automation positiv beeinflussbar. Die hohe Nachfrage erfordert effiziente und durchgängig automatisierte Herstellungs- und Prüfprozesse für Solarzellen. Durch intelligente Prozesskontrolle kann die Ausschussrate in den Prozessen verringert werden, die Prozessqualität gesteigert und Fehlerursachen eliminiert oder zumindest kompensiert werden. Automatisierte Prozesse, bei denen die Einflussmöglichkeiten transparent sind, stellen ein Schlüssel zur ressourceneffizienten und damit auch zur kostengünstigen Massenproduktion von Solarzellen dar. Hier kann an Konzepte zur „Gigawattfabrik“ oder „Grid-Parity-Fabrik“ angeknüpft werden. Die centrotherm photovoltaics AG stellte unter dem Stichwort „Grid-Parity-Fab“ Einsparpotentiale durch die Integration von Ingot-, Zell- und Modulfertigung vor. Diese Konzepte setzen auf die Integration der Fertigung unter einem Dach. Das spart zum einen Transport, Verpackung und die Margen der Zwischenstufen. Durch die direkte Weiterverarbeitung werden Verschleiß, Alterung und Bruch des Materials verringert. Außerdem werden durch eine Optimierung des Produktionsprozesses und des Recyclings der Wasserverbrauch, die benötigten Prozesschemikalien und die erforderliche Energie erheblich gesenkt. So wird das Wasserrecycling durch die Größe der Anlage einfacher und teilweise erst wirtschaftlich. Die Reduzierung des Wasserverbrauchs könnte bis zu 60% betragen. Zudem rechnet die Firma M+W-Zander damit, dass die Größen-



vorteile, die eine Gigawattfabrik einem waferbasierten Hersteller bietet, einen um 25% niedrigeren Kapitaleinsatz erforderlich macht. Für Dünnschichthersteller könnte der Kapitaleinsatz sogar noch weiter reduziert werden. Allerdings ist die industrielle Beherrschbarkeit von Solarfabriken dieser Größenordnung noch nicht gesichert. Insgesamt waren Konzepte des scaling und der vertikalen Integration bei vergleichbaren Industrien wie der Halbleiter- oder der Flachdisplay-Industrie sehr erfolgreich und haben erheblich zur Kostenreduktion beigetragen. Zur Übertragbarkeit auf die PV bedarf es entsprechender Leuchtturmprojekte für eine „Smart Integrated Solar Factory“, die mit hoher Signalkraft und Multiplikatorfunktion einen solchen Innovationsschub im PV-Sektor ermöglichen und beschleunigen können.

Mit Blick auf die Erschließung von Potenzialen für Materialeffizienz und Ressourcenschonung im Bereich der Photovoltaik kommt Wirtschaftsverbänden ein besonderer Stellenwert zu. Sie spielen eine zentrale Rolle, indem sie eine Plattform für einen moderierten und strukturierten Suchprozess sowie einen Erfahrungs- und Ergebnisaustausch (Best-Practices, Benchmarks etc.) schaffen. Neben den bereits bestehenden Initiativen und Aktivitäten (z.B. Glottertaler Gespräche, EPIA, BSW) der Solarindustrie bietet der Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau (VDMA) eine eigenständige Verbandsplattform „Produktionsmittel für die Fotovoltaik“, die die Ergebnisse der Roadmap aufgreift und zur Erarbeitung von Strategien für weitergehende Herausforderungen der Ressourceneffizienz nutzt. Für die Automationstechnik konnte der Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie sensibilisiert werden. Daraus ergeben sich Chancen für effektivere Austauschbeziehungen, die weit über unternehmensorientierte Marktsignale und Technologieprognosen hinausgehen und Chancen und Risiken identifizieren helfen können.

### **3 Roadmap Ressourceneffiziente Arbeitsplatz-Computerlösungen 2020: Entwicklung eines Leitmarktes für Green Office Computing**

#### **3.1 Ausgangssituation**

Für die heutige Informations- und Wissensgesellschaft bildet die Informations- und Kommunikationstechnik (IKT) die technische Basis und trägt als dynamisches Innovationsfeld maßgeblich zur wirtschaftlichen Entwicklung bei. Dabei kann die IKT in vielen wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Bereichen einen wichtigen Beitrag zur Einsparung von natürlichen Ressourcen leisten, z.B. durch die intelligente Steuerung von Stromnetzen und Gebäuden oder durch Telefon- und Videokonferenzen. Neben den Umweltentlastungspotenzialen der IKT sind die Herstellung von IKT-Geräten (PCs, Notebooks, Fernseher etc.) und Infrastrukturen (Rechenzentren, Mobilfunknetze usw.) sowie deren Nutzung mit großem Energie- und Ressourcenverbrauch verbunden, die in der Vergangenheit kontinuierlich angestiegen sind. So ist beispielsweise der IKT-bedingte Stromverbrauch in Deutschland von ca. 38 TWh in 2001 (Cremer et al. 2003) auf ca. 55 TWh in 2007 gestiegen. Dies entspricht ca. 10,5% des deutschen Stromverbrauchs. Das stärkste Wachstum ist dabei bei den IKT-Infrastrukturen, d.h. bei den Servern und Rechenzentren sowie den Festnetzen und dem Mobilfunk, zu verzeichnen. Den relativ größten Anteil am IKT-bedingten Stromverbrauch haben aber nach wie vor die Endgeräte. Einen wesentlichen Anteil hieran haben Arbeitsplatzcomputer.

Die rund 26,5 Mio. Arbeitsplatzcomputer, die in Unternehmen, Behörden und Bildungseinrichtungen (Schulen und Hochschulen) in Deutschland derzeit im Einsatz sind, verbrauchen pro Jahr rund 6,5 TWh an Strom (Fichter/Clausen/Hintemann 2010, S. 10). Das ist mehr Strom als zwei mittelgroße Kohlekraftwerke im Jahr produzieren können. Der derzeitige Bestand setzt sich zusammen aus 50% PCs, 41% Notebooks, 8% Thin Clients und 1% Mini-PCs bzw. Kompakt-PCs, die als neue Gerätegeneration erst seit gut zwei Jahren am Markt verfügbar sind (Ebd., S. 17). In punkto Energie- und Materialverbrauch schneiden Notebooks, Thin Client & Server Based Computing sowie Mini-PCs deutlich besser ab als PCs. Während ein PC bei einer durchschnittlichen Büronutzung 698 kWh an Primärenergie pro Jahr verbraucht (ohne Monitor), liegen Notebooks, Mini-PC und Thin Clients (inkl. Serveranteil) gerade einmal bei der Hälfte. Gemittelt über alle Geräteklassen liegt der durchschnittliche Primärenergieverbrauch eines Arbeitsplatzcomputers derzeit bei rund 500 kWh (Vgl. Tab. 5). Wie die folgende Tabelle zeigt, ergibt sich auch bzgl. des Materialeinsatzes ein ähnliches Bild.

Aufgrund der wachsenden Bedeutung des Dienstleistungssektors, der zunehmenden Computerisierung von Branchen mit bisher geringer Computerausstattung (Handel, Handwerk etc.) und der politischen Zielsetzung, Schulen und Hochschulen zukünftig besser mit Computern auszustatten, gehen aktuelle Prognosen davon aus, dass der Bestand an Arbeitsplatzcomputern bis 2020 auf rund 37 Mio. Geräte anwachsen wird (Fichter, Clausen, Hintemann 2010, S. 18). Trotz der kontinuierlichen Steigerung bei

der Energieeffizienz der Geräte würde ein weiterhin hoher Einsatz von PCs dazu führen, dass der Energieverbrauch durch Arbeitsplatzcomputer in Deutschland in den nächsten Jahren weiter anwächst. Ein verstärkter Einsatz energiesparender Geräteklassen wie Notebooks, Thin Clients und Mini-PCs, die für den ganz überwiegenden Teil aller Office-Anwendungen leistungsmäßig völlig ausreichend sind, könnte zu einer erheblichen Energie- und Materialeinsparung beitragen. Ziel sollte daher ein nachhaltiger Strukturwandel bei arbeitsplatzbezogenen Computerlösungen in Deutschland bis 2020 sowie die Entwicklung eines Leitmarktes für „Green Office Computing“ sein.

Tab. 3-1: Verschiedene Typen von Arbeitsplatzcomputern im Vergleich

	Arbeitsplatzcomputer in Deutschland 2010				
	PC	Mini-PC	Notebook	Thin Client	Gesamt
<b>Bestand an Computerendgeräten</b>					
Anzahl Geräte in Stück	13.000.000	300.000	11.000.000	2.200.000	26.500.000
Ausstattungsstruktur in Prozent	49,1	1,1	41,5	8,3	100,0
<b>Energieverbrauch</b>					
Jahresstromverbrauch pro Computerendgerät p.a. in kWh (ohne Monitor etc.) in der Nutzungsphase	201	74	65	43	
Jahresenergieaufwand Nutzung Endgeräte (KEA) in kWh	549	202	177	117	
Herstellungenergie (KEA) für Endgerät in kWh	584	285 <sup>2</sup>	340	141	
Nutzungsdauer in Jahren	5	5	4	8	
Herstellungs- und Nutzungsenergie pro Gerät p.a. in kWh (KEA)	666	259	262	135	
Kumulierter Energieaufwand gesamt durch Nutzung von zentralen IT-Ressourcen pro Computerarbeitsplatz p.a. in kWh (KEA)	32	32	32	249	
Herstellungs- und Nutzungsenergie pro Computerarbeitsplatz p.a. in kWh (KEA)	698	291	294	384	499
<b>Materialeinsatz</b>					
Produktgewicht gesamt in kg	8	2	2,4	1,5	
Anteiliges Gewicht Terminalserver (25 kg) pro Arbeitsplatz in kg <sup>3</sup>	0,07	0,07	0,07	0,55	
Gewicht Endgerät und Terminalserveranteil pro Arbeitsplatz in kg <sup>4</sup>	8,07	2,07	2,47	2,05	5,18
<b>Klimawirkung</b>					
Treibhausgaspotenzial durch Stromverbrauch in CO <sub>2</sub> äq. p.a. pro Computerarbeitsplatz in kg	122,9	49,4	44,1	75,4	85,4

Quelle: Berechnung und Zusammenstellung der Daten durch Borderstep Institut 2010.

<sup>2</sup> Bei der Berechnung des kumulierten Energieaufwandes (KEA) für Mini-PC wurden die Daten eines Notebooks ohne Monitor verwendet, da hier in der Regel Notebookteile verwendet werden.

<sup>3</sup> Da ein Terminalserver mehrere Arbeitsplätze „bedient“, wird das Gewicht nur anteilig zugeordnet.

<sup>4</sup> Damit ist gemeint, welches Gewicht die Computergeräte haben, die für einen einzelnen Arbeitsplatz benötigt werden. Dazu zählt nicht nur das Gewicht des Endgerätes, sondern anteilig auch das Gewicht des Terminalservers, der durch diesen Arbeitsplatz in Anspruch genommen wird.

### 3.2 Der Dialogprozess

Auf Basis der vom Borderstep Institut in 2008 vorgenommenen wissenschaftlichen Ausgangsanalyse und der dort ermittelten Ressourceneinsparpotenziale im Bereich der IKT und insbesondere im Bereich von Arbeitsplatzcomputern, wurde in Abstimmung mit den Fördermittelgebern Bundesumweltministerium und Umweltbundesamt der Bereich des „Thin Client & Server Based Computing“ für stationäre Arbeitsplätze als Betrachtungsfeld für das Roadmapping ausgewählt. Um die unterschiedlichen Sichtweisen und Interessen rund um die Wertschöpfungskette für arbeitsplatzbezogene Computerlösungen kontinuierlich in das Roadmapping-Vorhaben zu integrieren und wichtige Umsetzungsakteure für die spätere Umsetzung der Roadmap frühzeitig einzubinden, wurde ein Steuerungskreis eingerichtet, der sich im Zeitraum von Sept. 2008 bis Sept. 2010 alle zwei Monate getroffen hat. Der Steuerungskreis hat die Analysearbeiten, die durch das Borderstep Institut vorgenommen wurden, fachlich begleitet und unterstützt. Außerdem hat der Steuerungskreis die Roadmap erarbeitet und verabschiedet. Mitglieder des Roadmapping-Steuerungskreises waren:

- IT-Hersteller und Softwareanbieter: Fujitsu Technology Solutions GmbH, Igel Technology GmbH, Sun Microsystems GmbH, Citrix Systems GmbH
- Systemhäuser u. IT-Berater: Accentrix IT Consulting, Computacenter AG & Co oHG
- IT-Anwender: Finanz Informatik, IT-Dienstleister der Sparkassen Finanzgruppe, Umweltbundesamt
- Verbände: Bundesverband Informationstechnik, Telekommunikation und Neue Medien e.V. (BITKOM)
- Wissenschaft: Borderstep Institut, Fraunhofer UMSICHT
- Fachbegleitung: Umweltbundesamt

Der zweijährige Roadmapping-Prozess bestand aus folgenden Arbeitsschritten:

- Ökologische Bewertung verschiedener Optionen für arbeitsplatzbezogene Computerlösungen.
- Analyse und Auswahl relevanter Branchen und Sektoren zur Erschließung von Ressourceneffizienzpotenzialen bei Arbeitsplatzcomputern
- Analyse der ausgewählten Schwerpunktsektoren (Kleine Dienstleistungsunternehmen, Bundesbehörden, Schulen, Home Office)
- Fallstudien und Ermittlung von Best Practice-Anwendungen ressourceneffizienter arbeitsplatzbezogener Computerlösungen (TC&SBC etc.)
- Befragungen von Anwendern (u.a. Befragung aller Bundesbehörden) und Systemhäuser/Händlern zu Barrieren der Nutzung von TC&SBC
- Analyse technologischer, marktlicher und gesellschaftlicher Trends

- Durchführung von vier Delphi-Befragungen zur Abschätzung von Zukunftstrends
- Entwicklung eines Business as usual-Szenarios „Arbeitsplatzbezogene Computerlösungen 2020“
- Erarbeitung einer Roadmap „Ressourceneffiziente Arbeitsplatz-Computerlösungen 2020“, Verabschiedung der Roadmap durch den Steuerungskreis im Juli 2010
- Ableitung eines Green IT-Szenarios auf Basis der Roadmap und Ermittlung der Ressourceneinsparpotenziale durch die Umsetzung der Roadmap.
- Aufbereitung der Ergebnisse (Roadmap, Best Practice etc.) für die Veröffentlichung und Durchführung von Transferworkshops.

### **3.3 Ergebnisse und Ausblick**

Auf Basis der im Roadmapping-Prozess durchgeführten Analysen (Trends, bestehende Hemmnisse für die Umsetzung energie- und materialeffizienter Computerlösungen wie Thin Client & Server Based Computing, Fallstudien zu Best Practice-Anwendungen etc.) und Delphi-Befragungen wurde als Grundlage für die Ausarbeitung einer Roadmap „Arbeitsplatzbezogene Computerlösungen 2020“ zunächst ein „Business-as-usual“-Szenario (Basisszenario) erarbeitet, welches bisherige Trends fortschreibt (z.B. kontinuierliche Energieeffizienzsteigerung bei Endgeräten, mehr mobile Endgeräte etc.) und somit die Auswirkungen eines ungestörten „weiter so“ aufzeigt. Das Business as usual-Szenario (BAU-Szenario) zeigt damit auch auf, wo zukünftige Handlungsbedarfe bestehen, um Materialeffizienz- und Ressourceneinsparpotenziale bei arbeitsplatzbezogenen Computerlösungen zu erschließen. Es bildete die Grundlage zur Formulierung von Zielsetzungen für die Roadmap „Arbeitsplatzbezogene Computerlösungen 2020“ und zur Ausarbeitung von Maßnahmen, um die Ressourcenpotenziale zu erschließen. Das im Anschluss ausgearbeitete „Green IT“-Szenario greift die Maßnahmen der Roadmap auf und bildet ab, was passiert, wenn die Roadmap vollständig umgesetzt wird. Der Unterschied zwischen BAU-Szenario und Green IT-Szenario ist also die Umsetzung der Roadmap.

In beiden Szenarien wird die Entwicklung der Anzahl von Computerarbeitsplätzen gleichgesetzt. Der Unterschied zwischen beiden Szenarien ergibt sich durch die zusätzlichen Energie- und Materialeffizienzmaßnahmen der Roadmap, die sich in einer anderen Struktur der Computerausstattung (Mehr Kompakt-PCs, mehr TC&SBC etc.), einer schnelleren Verbesserung der Energie- und Materialeffizienz sowie einer anderen Nutzungsdauer der Geräte ausdrückt.

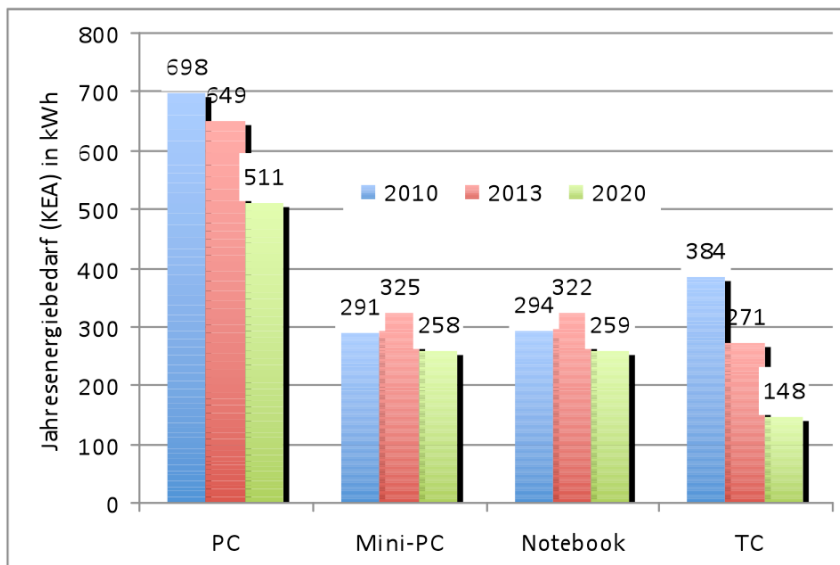
#### **Ausgewählte Daten des Business as usual-Szenarios**

Wie die beiden folgenden Abbildungen zeigen, werden trotz erheblicher Effizienzsteigerungen beim Desktop-PC auch in Zukunft Mini-PC, Notebook und Thin Client & Server Based Computing eindeutige Vorteile beim Energieverbrauch und Materialeinsatz arbeitsplatzbezogener Computerlösungen bieten. Die Abbildungen zeigen auch, dass heute Mini-PCs, Notebooks und Thin Clients (inkl. Terminalserveranteil) vergleichbar



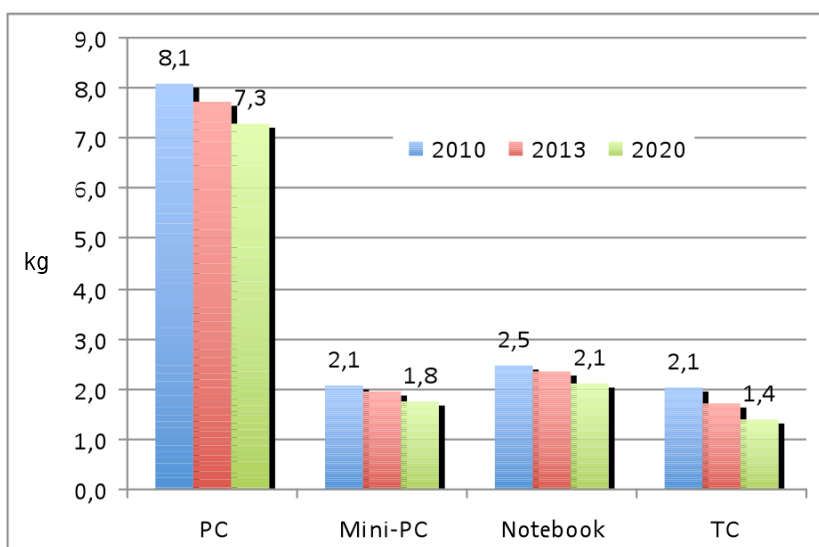
ressourceneffiziente Gerätetypen darstellen. Das Thin Client & Server Based Computing (TC&SBC) wird aber spätestens ab 2013 unter ökologischen Gesichtspunkten eine eindeutige Spitzenposition übernehmen. Das liegt daran, dass die Anwendungssoftware bei der Nutzung von Thin Clients zu 100% auf Terminalservern läuft und die Effizienz bei Servern und Rechenzentren sowie der dafür erforderlichen Software in Zukunft wesentlich schneller steigt als bei den Endgeräten.

Abb. 3-1: Kumulierter Energieaufwand (KEA) pro Arbeitsplatzcomputer p.a. in kWh in Deutschland (inkl. Herstellung und Rechenzentrumsnutzung, ohne Monitor) im Business-as-usual-Szenario



Quelle: Eigene Berechnungen, Fichter/Clausen/Hintemann (2010)

Abb. 3-2: Materialeinsatz pro Arbeitsplatzcomputer in Deutschland in kg (inkl. Serveranteil, ohne Monitor) im Business-as-usual-Szenario



Quelle: Eigene Berechnungen, Fichter/Clausen/Hintemann (2010)

## **Vorteile des Thin Client & Server Based Computing**

Wie das BAU-Szenario zeigt, muss eine Ressourceneinsparstrategie bei Arbeitsplatzcomputern bei zwei Punkten ansetzen: Zum einen müssen die jeweiligen Gerätetypen und Systeme deutlich energie- und materialeffizienter werden, zum anderen ist aber auch ein „Strukturwandel“ bei den Gerätetypen notwendig. Der Desktop-PC wird als „Computer-Allround-Talent“ auch zukünftig bei einzelnen Anwendungen eine sinnvolle Lösung darstellen, für den ganz überwiegenden Teil von Büro- und Arbeitsplatzanwendungen stellen Mini-PCs, Notebooks und insbesondere das Thin Client & Server Based Computing (TC&SBC) unter ökologischen Gesichtspunkten aber eindeutig die besseren Alternativen dar.<sup>5</sup> Für das TC&SBC sprechen aber auch andere Vorteile wie ein geringerer Administrationsaufwand, höhere Sicherheit und geringere Total Cost of Ownership.

## **Hemmnisse des Thin Client & Server Based Computing**

Vor diesem Hintergrund stellt sich Frage, warum sich das TC&SBC bislang so langsam verbreitet. Das liegt in erster Linie daran, dass der Übergang vom Desktop-PC zum serverbasierten Computing einen grundlegenden Systemwechsel in der IT mit wesentlichen Auswirkungen auf Arbeitsplätze und Arbeitsablauf darstellt. Nicht zuletzt aus der Bedeutung des Systemwechsels folgt also, dass er mit vielfältigen Hemmnissen verbunden ist. Zudem sind eine Reihe von Vorurteilen über Server Based Computing verbreitet, die meist aus Erfahrungen mit den ersten Thin-Client-Gerätegenerationen entstanden sind, aber auch heute noch die Meinungsbildung beeinflussen. Wie die Fallanalysen und Hemmnisanalysen im Roadmapping-Projekt gezeigt haben, spielen u.a. folgende Hemmnisse des Einsatz von TC&SBC eine wesentliche Rolle:

Vielfach sind die Entscheider in Unternehmen, Verwaltung und sonstigen Organisationen nicht korrekt informiert. Dabei spielen nicht nur suboptimale Informationen durch die Hersteller und Anbieter von Thin Client & Server Based Computing (TC&SBC) eine Rolle, auch das bisherige Marketing für klassische PC-Lösungen fördert oftmals Vorur-

---

<sup>5</sup> Eindeutige ökologische Vorteile zeigen sich beim Energieverbrauch über den gesamten Produktlebenszyklus, bei der Vermeidung von Schadstoffen sowie dem Materialeinsatz (Gewicht) im Endprodukt. Wie umfangreiche Recherchen im Rahmen des Roadmapping-Projektes gezeigt haben, liegen Daten bezüglich des (kumulierten) Rohstoffaufwandes entlang des Produktlebensweges von Computergenerationen und Servern bis dato nur sehr lückenhaft vor. Insbesondere fehlen detaillierte und wissenschaftlich fundierte Zahlen bei Elektronikbauteilen sowie Daten über den Rohstoffverbrauch im Herstellungsprozess. Auch fehlen Daten für jüngere Gerätegenerationen wie z.B. Mini-PCs komplett. Eine Ressourcenbewertung der untersuchten Computertypen anhand des Indikators „Kumulierter Rohstoffaufwand“ (KRA) wäre wünschenswert gewesen, weil dieser Indikator mit Blick auf die ökologische Richtungssicherheit zweifelsfrei aussagekräftiger ist als die Materialgewichte und Materialzusammensetzung der Endprodukte. Aufgrund mangelnder Daten konnte eine wissenschaftlich seriöse Berechnung von KRA-Werten aber nicht vorgenommen werden. In Abstimmung mit der Fachbegleitung im Umweltbundesamt wurde daher auf eine Berechnung von KRA-Werten und vergleichbarer Indikatoren verzichtet und die Betrachtung der Materialeffizienz auf die Ermittlung der Materialgewichte der Endgeräte (Gesamtgewicht in kg) sowie auf deren Zusammensetzung (Gewichtsanteil von Elektronikbauteilen, Metallen, Kunststoffen und Netzteilen in kg) konzentriert. Bezüglich des (kumulierten) Rohstoffverbrauchs offenbarte das Roadmapping-Projekt erheblichen Forschungsbedarf für die Zukunft.

teile gegen TC&SBC. Besonders ausschlaggebend ist dabei oft die fehlende Klarheit der Entscheider bezüglich der Kostensenkungseffekte.

Die hohe wahrgenommene Komplexität eines TC&SBC-Vorhabens führt zu Unsicherheit bei den verantwortlichen Entscheidern. Auch besteht in vielen größeren Organisationen wie z.B. Behörden eine Trennung von Zuständigkeiten im IT-Management zwischen zentraler IT (Rechenzentren, Bereitstellung zentraler Dienste etc.) und dezentralen IT-Aufgaben wie z.B. die Zuständigkeit für Endgeräte oder abteilungsspezifische Anwendungen. Dies erschwert ebenfalls die Umsetzung integrierter TC&SBC-Lösungen, da hier z.T. Ängste bestehen, Zuständigkeiten und Entscheidungsbefugnisse zu verlieren.

TC&SBC ist auch mit Änderungen an vielen Arbeitsplätzen verbunden. Weder Vorteile noch wirkliche Nachteile sind aber den Mitarbeitern ex ante bekannt. Vielfach gibt es daher auch seitens der Beschäftigten Widerstände gegen die TC&SBC-Einführung.

Das wohl am meisten verbreitete Vorurteil gegenüber TC&SBC besteht in der schlechten Beurteilung der Grafik- und Medialeistung. Die Ursache hierfür besteht darin, dass in der Tat die ersten Generationen der TCs teilweise nicht über eine Soundkarte verfügten und z.B. im Anwendungsfeld Schulen nicht im Sprachunterricht eingesetzt werden konnte, obwohl es gerade hierfür verbreitete und gute Softwareangebote gab.

Besonders für Spezialsoftware mit geringern Verkaufszahlen mangelt es noch an einer Reihe von terminalserverfähigen Applikationen. In vielen Unternehmen und auch z.B. im Bereich wissenschaftlicher Anwendungen ist daher eine durchgängige Umstellung auf Server Based Computing noch nicht machbar. Durch Desktopvirtualisierung können solche Hemmnisse zukünftig aber in der Regel überwunden werden.

Das erforderliche Zusammenspiel von Endgeräten, Terminalserver und Netzinfrastruktur beim TC&SBC (über-)fordert nicht nur viele Anwender, sondern auch viele Systemhäuser sind damit noch nicht vertraut und haben wenig Kenntnisse und Erfahrungen. Auch fehlt es ihnen oft an qualifiziertem Fachpersonal. Hierdurch werden Unsicherheiten der Entscheider in Anwenderunternehmen deutlich verstärkt, da vielfach langjährige, stabile und gute Beziehungen zwischen Unternehmen und den sie betreuenden Systemhäusern anzutreffen sind. Gerade den wichtigen und risikoreichen Systemwechsel möchten viele mit einem Partner durchführen, der ihr Unternehmen gut kennt. Letztlich stellt damit die Kompetenz der Systemhäuser ein wichtiges Hemmnis dar.

## **Roadmap „Arbeitsplatzbezogene Computerlösungen 2020 – Entwicklung eines Leitmarktes für Green Office Computing“**

Ziel der Roadmap ist ein nachhaltiger Strukturwandel bei arbeitsplatzbezogenen Computerlösungen in Deutschland bis 2020. Mit der Roadmap soll ein Leitmarkt für „Green Office Computing“ entwickelt werden, der zu folgenden wirtschaftlichen und ökologischen Zielen beiträgt:

1. Erhöhung des Anteils energie- und materialeffizienter Arbeitsplatzcomputerlösungen von heute 50% auf über 60% in 2013 und 85% in 2020.<sup>6</sup>
2. Reduzierung des durchschnittlichen Primärenergieaufwands (KEA) von Arbeitsplatzcomputern in Deutschland von heute 500 kWh pro Jahr (inkl. Herstellung und Terminalserveranteil, ohne Monitor) auf 400 kWh in 2013 und 200 kWh pro Jahr in 2020.
3. Reduzierung des durchschnittlichen Produktgewichts pro Arbeitsplatzcomputer (inkl. Serveranteil) von heute 5,2 kg (ohne Monitor) um 20% bis 2013 und um mindestens 50% bis 2020.

Die 39 Maßnahmen der Roadmap dienen dazu, die genannten Zielsetzungen zu erreichen. Die Realisierung der Roadmap-Maßnahmen würden bis 2020 zu einer Einsparung von 29,4 TWh an Primärenergie, zu einer Stromkosteneinsparung von 2,75 Mrd. Euro sowie zu einer Reduzierung von CO<sub>2</sub>-Emissionen von 5,5 Mio. t und von 245.000 t an Computermaterial führen. Mit der Umsetzung der Roadmap kann außerdem ein rasant wachsender Markt für „grüne“ Zukunftstechnologien erfolgreich erschlossen und Deutschland als Green IT-Pionier im internationalen Wettbewerb positioniert werden.

Das breite Spektrum an Maßnahmen sowie die Ressourcen, die zu ihrer Umsetzung notwendig sind, machen deutlich, dass die Realisierung der Roadmap nur in einer konzertierten Aktion von IKT-Herstellern, IKT-Anwendern, Politik und Wissenschaft gelingen kann. Zur Durchführung der Roadmap wird hier daher die Gründung einer Initiative „Green Office Computing“ in der Form einer Öffentlich-Privaten-Partnerschaft vorgeschlagen. Als Netzwerk von Partnern, die ressourceneffiziente Computerlösungen in Unternehmen, Verwaltung und Bildungseinrichtungen fördern und voranbringen möchten, dient die Initiative als institutionelle „Plattform“, die sich um die Entwicklung der strategischen Partnerschaft sowie um die Koordination der Umsetzung der Roadmap-Maßnahmen kümmert. Die Initiative sollte durch die Bundesregierung, IKT-Anbieter, IKT-Anwender (Rat der IT-Beauftragten, CIOcolloquium, etc.), Branchenverbände wie BITKOM sowie wissenschaftliche Einrichtungen getragen werden.

---

<sup>6</sup> Als „energie- und materialeffizient“ werden hier solche Computerlösungen betrachtet, die mindestens 20% weniger an Energie verbrauchen bzw. mindestens 20% weniger an Endgerätgewicht haben als eine durchschnittliche Arbeitsplatzcomputerlösung im Jahr 2010.

Tab. 3-2: Ausgewählte Maßnahmen der Roadmap „Arbeitsplatzbezogene Computerlösungen 2020“

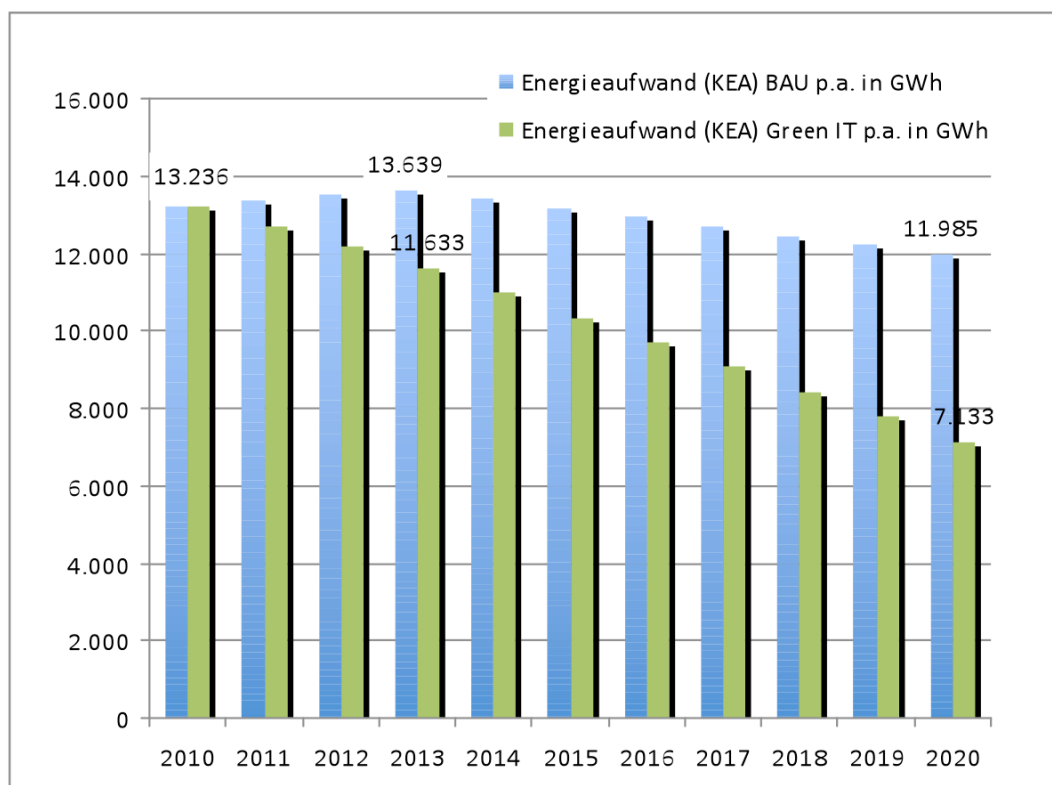
Roadmapping-Maßnahme	Zeitraum / -punkt der Realisierung
<b>Initiative „Green Office Computing“</b>	
Gründung einer Initiative „Green Office Computing“ als Öffentlich-Private-Partnerschaft	Gründung 2010 – 2011, Fortführung 2011 - 2020
<b>Informationskampagne „Green Office Computing“</b>	
Best Practice-Informationsmaterialien für verschiedene Zielgruppen (KMU, Behörden, usw.)	2010 – 2012; regelmäßige Aktualisierungen
Informationskampagne „Green Office Computing“ in Kooperation mit Wirtschaftsmedien: Zielgruppe TOP-Management (keine IT-Fachleute)	Schwerpunkt: 2010-2013, Fortführung 2014- 2020
Infokampagne „Green Cloud Computing“ mit IT-Fachmedien : Zielgruppe Betriebliche IT-Entscheider und IT-Fachleute	2010 - 2013
Green IT-Truck zur Präsentation innovativer Green IT-Lösungen vor Ort	2012 - 2015
Showroom „Green Office Computing“ in Berlin	ab 2012
<b>Leuchtturmprojekte „Thin Client &amp; Green Cloud Computing“</b>	
Leuchtturmprojekt kleine Dienstleistungsunternehmen, Arztpraxen, Handwerk, etc.	2011- 2015
Leuchtturmprojekt Engineering-Arbeitsplätze	2011-2015
Leuchtturmprojekt Wohnanlagen	2011-2015
<b>Geschäftsmodelle</b>	
Weiterentwicklung von Software as a Service (SaaS) und Desktop as a Service-Angeboten; attraktive Margen für Systemhäuser; Hardware/Dienste-Bundles (z.B. wie beim Mobilfunk); monatlich abgerechnete Angebote für Privathaushalte und Kleinunternehmen; TC-kompatible Lizenzmodelle für Software und ggf. Daten (z.B. elektronische Bücher)	2010-2015
<b>Bildung und Qualifizierung</b>	
Informations- und Schulungsveranstaltungen für Systemhäuser und Reseller „Zukunftsmarkt Green Office Computing“	2010 – 2011 Planung, 2011 – 2013, Umsetzung
Aufnahme von TC&SBC und Green Computing in den universitären Bildungskanon (Informatik etc.)	Pilotvorhaben (2011– 2014), Transfer (2014 – 2020)
Stiftungslehrstühle „Serverbasierte Computerlösungen“ und „Green Office and Home Computing“	Sondierung 2011 – 2012, Einrichtung ab 2013
Aufnahme von TC&SBC und Green Computing in den Bildungskanon (Informatik-Unterricht etc.) in Schulen	Pilotvorhaben (2011 –2014), Transfer (2014 – 2020)
<b>Gewerkschaften, Betriebs-, Personalräte</b>	
Studie zu Auswirkungen und Akzeptanz serverbasierter APC-Lösungen	2011
Entwicklung einer Muster-Betriebsvereinbarungen zu serverbasierten APC-Lösungen und Verbreitung von Ergebnissen der Studie	2011
Dialoge mit Gewerkschaften, Technologieberatungsstellen, Betriebs- u. Personalräten	Ab 2012
<b>Technologieentwicklung und Standards</b>	
F&E zur Steigerung der Energie- und Materialeffizienz von TCs	Ab 2010
High-Performance Server und High-Performance-Bandbreite für Engineering- und Grafik-Anwender	Ab 2011
Entwicklung von Softwarelösungen zur Steigerung des Verhältnisses von Clients pro Server im SBC, HVD und SaaS	Ab 2011
Förderung der Diffusion von Mini-PCs	Ab 2010
Maßnahmen zur Steigerung der durchschnittl. Infrastruktur-Energieeffizienz (PUE) von Rechenzentren in Deutschland von heute 1,9 auf 1,6 in 2013 und 1,3 in 2020	Ab2010
<b>Der Staat als Förderer und IT-Anwender“</b>	
Green Office Computing als Element der IKT-Strategie der Bundesregierung sowie Aufnahme in den Green IT Aktionsplan der Bundesregierung	2010
Innovationsallianz „Energiesparende Anwendungssoftware“	Umsetzung: 2012 - 2015
Anpassung von Richtlinien und Rahmenverträgen der öffentlichen Beschaffung	2010 - 2012
Blauer Engel für Thin Clients und Mini-PCs	2011 - 2012
Green Office Computing als Schwerpunkt im BMU-Förderschwerpunkt „IT goes green“	2010 - 2020



### Einsparpotenziale durch Umsetzung der Roadmap: Green IT-Szenario

Das Green IT-Szenario unterscheidet sich vom BAU-Szenario dadurch, dass es von der Umsetzung der oben vorgestellten Roadmap ausgeht.<sup>7</sup> Die Wirkung der Roadmap-Maßnahmen bildet sich also als Differenz zwischen BAU- und Green IT-Szenario ab. Nicht alle Wirkungen der Roadmap-Maßnahmen können quantifiziert werden. Daher wurden in die Wirkungsabschätzung nur jene Maßnahmen aufgenommen, deren Wirkung auf Basis von Expertenurteilen und Workshops hinreichend plausibel und begründet abgeschätzt werden konnte. Die Realisierung der Roadmap bildet sich im „Green IT-Szenario ab und würde zu folgenden Effekten führen:

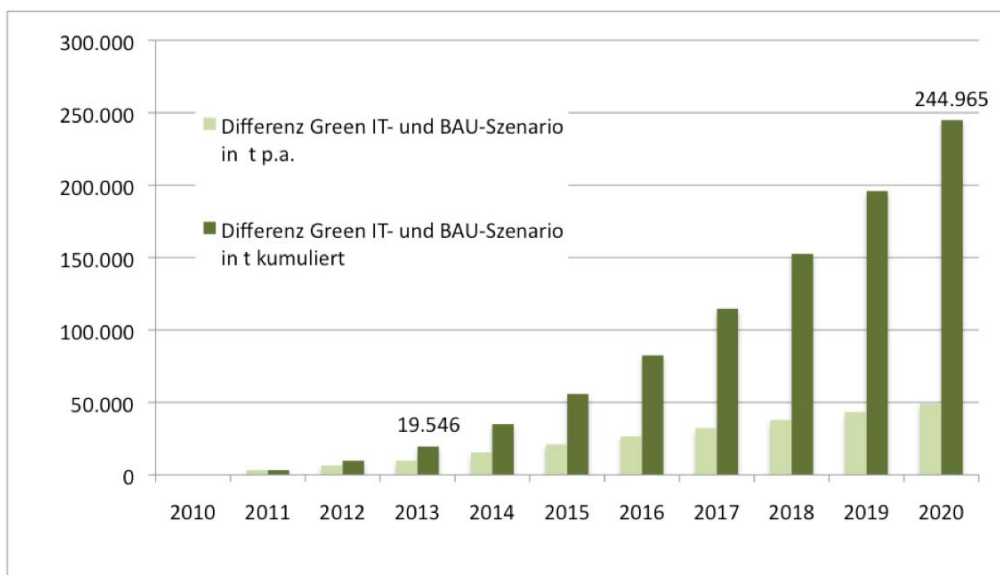
Abb. 3-3: BAU- und Green IT-Szenario im Vergleich – Energiebedarf (KEA) von Arbeitsplatzcomputern in Deutschland (inkl. Herstellung und Terminalservernutzung, ohne Monitor)



Quelle: Eigene Berechnungen, Fichter/Clausen/Hintemann (2010)

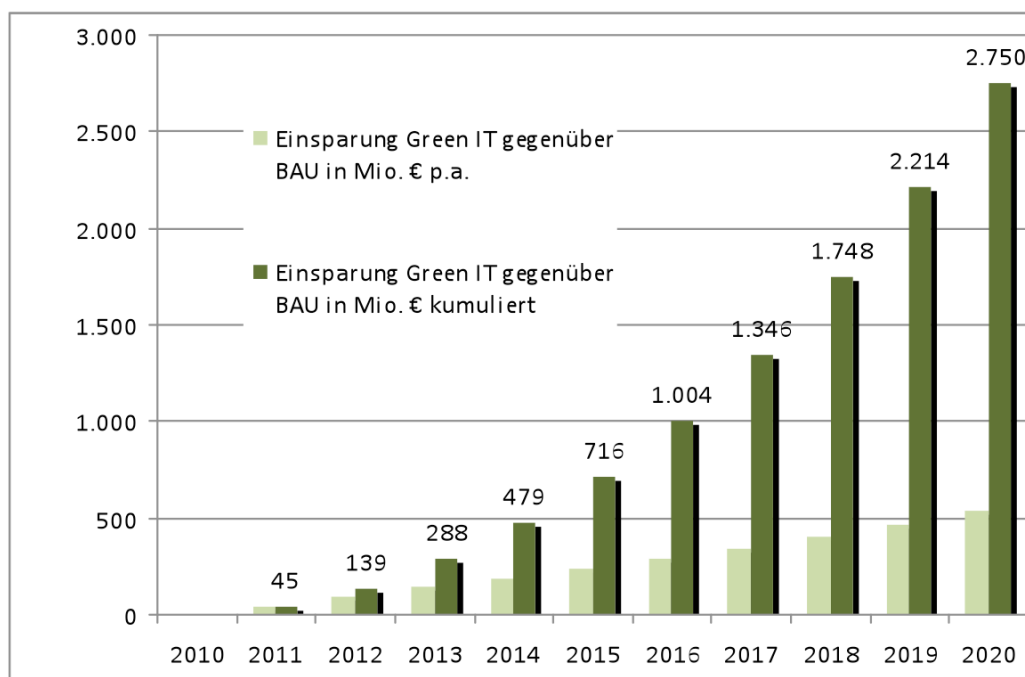
<sup>7</sup> Während ein „Szenario“ die Situation zu einem definierten Zeitpunkt in der Zukunft (z.B. im Jahr 2020) darstellt, beschreibt die „Roadmap“ den Entwicklungspfad dorthin.

Abb. 3-4: Materialeinsparung<sup>8</sup> bei Arbeitsplatzcomputern in Deutschland (inkl. Terminalserveranteile, ohne Monitor) durch die Umsetzung der Roadmap (Green IT –Szenario)



Quelle: Borderstep Institut 2010

Abb. 3-5: Einsparung von Stromkosten<sup>9</sup> beim Betrieb von Arbeitsplatzcomputern in Deutschland durch die Umsetzung der Roadmap (Green IT-Szenario), Eigene Berechnungen, Fichter/Clausen/Hintemann (2010)



<sup>8</sup> Hier wurden lediglich die Gewichtsreduzierungen der Endgeräte berücksichtigt. Würde man zusätzlich auch noch die damit verbundenen Veränderungen beim Material- und Rohstoffeinsatz entlang des Produktlebensweges berücksichtigen, lägen die Zahlen wesentlich höher.

<sup>9</sup> Bei der Berechnung der Stromkosten wurde von einem durchschnittlichen Strompreis bei gewerblichen Kunden von 0,18 €/kWh in 2010 und einem Preisanstieg von 5% p.a. ausgegangen.

## 4 Leasson learnt: Was kann ein kooperatives Roadmapping leisten?

Das kooperative Roadmapping kann folgendes leisten:

- *Langfristperspektive*: Früherkennung von Chancen und Risiken (z.B. von Rohstoffengpässen in der Photovoltaik oder von ökologischen und wirtschaftlichen Chancen der Entwicklung eines Leitmarktes Green Office Computing).
- *Potenzialabschätzung*: Ermittlung der Materialeffizienz- und Ressourcenschonungspotenziale (z.B. durch den verstärkten Einsatz „schlanker“ Computertypen (Thin Clients) für Arbeitsplätze oder z.B. im Bereich der Photovoltaik in der Fertigung und Verwertung photovoltaischer Produkte).
- *Beschleunigung und Förderung der Verbreitung schon bestehender Effizienztechnologien*: Besseres Verständnis bestehender Hemmnisse für die Umsetzung ressourceneffizienter Zukunftslösungen (z.B. Systemwechsel im Bereich IT) und Klärung der Frage, wie die Potenziale für Materialeffizienz und Ressourcenschonung z.B. in der Fertigung von Photovoltaik-Produkten kurz-, mittel- und langfristig bestmöglich erschlossen werden können.
- *Einbindung unterschiedlicher Akteursperspektiven*: Ressourceneffizienz aus der Sicht unterschiedlicher Akteure. Im Bereich der Photovoltaik z.B. die Photovoltaikindustrie, der Maschinen- und Anlagenbau, der Automationstechnik, der Recyclingbetriebe und entsprechender Wirtschafts- und Fachverbände), z. B. mit Blick auf die Frage: Wie kann durch neue Produktionskonzepte (Maschinen- und Anlagenbau, Automationstechnik) die Erschließung der Effizienzpotenziale in der Wertschöpfungskette unterstützt werden? Im Bereich von Arbeitsplatzcomputern z.B. die IT-Hersteller, die Softwareanbieter, die Systemhäuser, die IT-Anwender (KMUs, Großunternehmen, Behörden, Schulen etc.) und Wissenschaft.
- *Innovationsfahrplan*: Entwicklung konkreter Maßnahmen zur Erschließung der Materialeffizienz- und Ressourcenschonungspotenziale (z.B. Roadmap Arbeitsplatzbezogene Computerlösungen 2020) mit konkreten Zielsetzungen, Zeitplänen, Meilensteinen und Zuständigkeiten.
- *Unterstützung und Konkretisierung der „ökologischen Industriepolitik“* des BMU, insbesondere der Offensive zur Material- und Energieeffizienz und der Erschließung von grünen Zukunftsmärkten durch branchenorientierte Roadmappingprozesse.
- *Identifizierung von Technologiebedarfen, Standardisierungsbedarfen*, Forschungsbedarfen, Qualifizierungserfordernisse, Anwenderanforderungen und Bedingungen zur Erschließung von besonders relevanten Zukunftsmärkten der Ressourceneffizienz.
- *Bündelung von Kompetenzen*: Im Roadmapping werden spezifische Kompetenzen und Know-how aus Forschungseinrichtungen, Unternehmen, Verbänden und ge-

sellschaftlichen Gruppen gebündelt. Dies kann von einzelnen Firmen, insbesondere KMU allein nicht geleistet werden. Sie erhalten einen direkten Zugang zu interdisziplinärem Wissen und zu spezifischem Know-how.

- *Einbindung von Branchenverbänden:* Einbindung, Sensibilisierung und Aktivierung von Branchen- und Fachverbänden als (bisher wenig genutzte) Plattform zur Entwicklung von abgestimmten Innovationsfahrplänen zur Ressourceneffizienz und als potenzielle Multiplikatoren für den Transfer der Ergebnisse in das Innovationsmanagement von Unternehmen (mit Pilotcharakter).
- *Marktchancen:* Aufzeigen von Möglichkeiten und Strategien zur Schaffung und Erweiterung von Märkten für Effizienztechnologien und Identifikation von Pilotprojekten für deutsche Unternehmen auf zentralen Zukunftsmärkten der Effizienztechnologien.
- *Innovationsimpulse für Unternehmen:* Impulse zur Verknüpfung der Roadmap mit operativen Aktivitäten in Innovationspolitik und -management der Unternehmen zur Erschließung von Ressourceneffizienzpotenzialen.

Die Erfahrungen aus den Roadmappingprojekten können auch auf andere Technologiefelder übertragen und als wesentliches Element einer innovationsorientierten Umweltpolitik genutzt werden. Bei der zukünftigen Nutzung der Methodik des kooperativen Roadmapping sind allerdings eine Reihe wichtiger Aspekte zu beachten, damit der Prozess effizient und effektiv gestaltet und zur Aktivierung hoher Ressourceneinsparpotenziale genutzt werden kann:

- Einbindung unabhängiger, markt- bzw. technologieutraler Prozessmoderatoren mit Fachexpertise und Methodenkompetenz,
- Auswahl von Such- und Betrachtungsfeldern mit hohem Ressourceneinsparpotenzial und „versteckten“ Chancen (z.B. Querschnittstechnologien),
- Vorhandensein eines politischen Willens bei Ministerien und Behörden zur Entwicklung einer Roadmap in Kooperation mit Wirtschaft und Wissenschaft,
- Engagierte Vertreter aus Ministerien und Behörden, die aktiv im Prozess der Erarbeitung der Roadmap mitwirken,
- Engagierte Branchenexperten und hochrangige Entscheidungsträger beteiligen,
- Technologische Sichtweise erweitern: Anwender- und Nutzerintegration,
- Wissen aus verschiedenen Blickwinkeln generieren (z.B. Delphi-Umfragen),
- Mögliche Nebenfolgen und Risiken nicht ausblenden (z.B. Rebound-Effekte),
- Gesellschaftliche Stakeholder einbeziehen,
- Ergebnisse zielgruppenorientiert und aktiv transferieren,
- Kontinuität sichern: z.B. durch die Institutionalisierung von Allianzen.

## 5 Literatur

Behrendt, S.: Integriertes Roadmapping, Springer Heidelberg Berlin New York 2010.

Cremer, C. et al. (2003): Der Einfluss moderner Gerätegenerationen der Informations- und Kommunikationstechnik auf den Energieverbrauch in Deutschland bis zum Jahr 2010 – Möglichkeiten zur Erhöhung der Energieeffizienz und zur Energieeinsparung in diesen Bereichen, Projektnummer 28/01, Kurzfassung des Abschlussberichts an das Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit, Karlsruhe/Zürich, Januar 2003.

Fichter, K.; Clausen, J.; Hintemann, R. (2010): Szenarien „Arbeitsplatzbezogene Computerlösungen 2020“, Arbeitspapier im Rahmen von AP 9 Roadmap-Dialoge des Vorhabens „Materialeffizienz und Ressourcenschonung (MaRes)“, Berlin.

## 6 Glossar

ATO: Antimon-Zinn-Oxid

CdTe: Cadmium-Tellurid ist eines von mehreren Halbleitermaterialien, auf dessen Basis Dünnschicht-Photovoltaik-Module hergestellt werden.

CIGS: steht für Solarzellen auf Basis von Kupfer-Indium-Gallium-Diselenid

CIS: Kupfer-Indium-Disulfid-Technologie

c-Si: Monokristalline Solarzellen

Dendritisches Gießverfahren (mc-Si): Das dendritische Verfahren ist eine Züchtungsmethode, die auf das Verständnis von genauen Kristallzüchtungsmechanismen zur Kontrolle der Mikrostrukturen und Kristalldefekte basiert.

Elektromagnetisches Verfahren: Bei dem elektromagnetischen Verfahren wird Silizium durch das von Induktionsmagnetspulen erzeugte elektromagnetische Feld geschmolzen. Die nach innen gerichtete elektromagnetischen Kräfte halten das Silizium im Zentrum des Reaktors. Es ist daher kein Tiegel mehr nötig und der Sauerstoffeinbau wird größtenteils vermieden.

EoL: End-of-life-Recycling

Flußbettreaktor: Reaktoren für die Herstellung von Silizium.

Free Space Reaktor (FSR): Die FSR-Technologie stellt Si-Pulver aus Monosilan her. Diese Technologie hat das Potential, die Verunreinigungen im Silizium, welche durch Kontakt mit den Reaktorwänden entstehen, zu vermeiden.

Ingots: Block aus einem Halbleitermaterial wie Silizium. Das Ziehen von größeren Ingots hat das Potential, den Durchsatz zu erhöhen und den spezifischen Energieverbrauch zu reduzieren.

ITO: Indium-Zinn-Oxid

Kerf-Loss: Schnittverlust; Großes Potenzial für Einsparungen ist durch die Reduzierung des Sägeverlusts gegeben.

Lift-off-Prozess: Abplatzen der Metallisierung

Magnetisches CZ-Verfahren: Beim Magnetischen Czochralski-Verfahren (CZ) kann der Sauerstoff beim Kristallziehen vom Silizium ferngehalten werden.

MG-Si: metallurgisches Silizium

MJC: Multi Junction Cells

PECVD-Prozess : Plasma Enhanced Chemical Vapour Deposition

Poly-Si: Polykristalline Zellen, auch: Multikristalline Zellen genannt (poly-Si oder mc-Si)



Slurry: Für das Trennen von Siliciumstäben, mittels der Drahtsägetechnologie, wird das Sägeslurry benötigt. Es ist eine Verbindung aus flüssigem Glykol bzw. Öl und Siliciumcarbid.

SoG-Si: Solar-Grade-Silizium

TCO: transparentes leitfähiges Oxid

UMG-Si: Upgraded Metallurgical Grade-Silizium

Vapor to Liquid Deposition (VLD): ähnlich dem Siemens Prozess, jedoch mit dem Unterschied, dass der rohrförmige Reaktor mit induktiver Heizung Silizium in flüssiger Form abscheidet.