



Ökoeffizienzanalyse von Photovoltaikmodulen

Matthias Seitz
Dr. Małgorzata Kroban
Thorsten Pitschke
Dr. Siegfried Kreibe



gefördert durch
Bayerisches Staatsministerium für
Umwelt und Verbraucherschutz



Impressum

Alle Rechte (insbesondere das Recht der Vervielfältigung und Verbreitung sowie der Übersetzung) sind vorbehalten. Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Kein Teil der bifa-Texte darf in irgendeiner Form ohne Genehmigung der Herausgeber reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme gespeichert, verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

Herausgeber
bifa Umweltinstitut GmbH
Am Mittleren Moos 46
86167 Augsburg

Verfasser
Matthias Seitz
Dr. Małgorzata Kroban
Thorsten Pitschke
Dr. Siegfried Kreibe

Finanziert durch
Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz

Druck
Clicks GmbH

1. Auflage 2013
© bifa Umweltinstitut GmbH

Ökoeffizienzanalyse von Photovoltaikmodulen

Matthias Seitz
Dr. Małgorzata Kroban
Thorsten Pitschke
Dr. Siegfried Kreibe



gefördert durch
Bayerisches Staatsministerium für
Umwelt und Verbraucherschutz



INHALTSVERZEICHNIS

| | | |
|---|---|----|
| 1 | Kurzfassung | 1 |
| 2 | Projekthintergrund und Aufgabenstellung | 3 |
| 3 | Methodische Grundlagen..... | 4 |
| 4 | Anmerkungen zum Untersuchungsrahmen | 6 |
| 5 | Lebenswegmodellierung von PV-Systemen | 6 |
| 6 | End of Life – Entsorgung und Recycling..... | 14 |
| 7 | Ergebnisse der Ökoeffizienzanalyse | 16 |
| 8 | Fazit..... | 39 |
| 9 | Literatur | 44 |
| A | Anhang: Methodische Grundlagen..... | 45 |
| B | Anhang: Ergebnisse Wirkungskategorien..... | 53 |

1 Kurzfassung

Diese im Auftrag des Bayerischen Staatsministeriums für Umwelt und Verbraucherschutz durchgeführte Untersuchung zeichnet auf Basis des Status quo ein zukunftsgerichtetes Bild der umweltbezogenen Wirkungen von PV-Systemen entlang des gesamten Lebenszyklus so wie der Kosten für den Betrieb von PV-Anlagen. Es werden die Herstellung von PV-Gesamt-Systemen (Modul und Systemkomponenten), deren Betrieb in verschiedenen Anwendungsfällen sowie deren Entsorgung bewertet. Die Abbildung der aktuellen Produktionsverfahren wird für zellbasierte Siliziumtechnologien (mono- und multikristallin) sowie für Dünnschichttechnologien (CdTe¹ und CIS²) vorgenommen. Darauf aufbauend werden die Auswirkungen künftiger Weiterentwicklungen untersucht, wie z. B. der Einsatz verschiedener Recyclingverfahren, die Verbesserungen der Ausgangsmaterialherstellung und der Verarbeitungsverfahren. Nicht Gegenstand dieser Studie sind ungeplante Ereignisse wie beispielweise Brände oder die wilde Deponierung von defekten oder Alt-Modulen. Die Untersuchung wurde fachlich durch einen Beirat begleitet, dem Vertreter von in der Wertschöpfungskette Photovoltaik tätigen Unternehmen sowie Vertreter des Auftraggebers angehörten.

Die ökobilanzielle Betrachtung umfasst die Analyse von sieben Umweltwirkungen, die zur Gesamtumweltwirkung – dem Ökologie-Index – aggregiert werden. Aufgrund der sehr dynamischen Marktentwicklung und der nur anhand von Angebotspreisen vorliegenden Kosteninformationen werden für die ökonomische Analyse die Stromgestehungskosten technologieunabhängig mit Hilfe der Vergütungssätze nach dem Erneuerbare Energie Gesetz (EEG) angenähert. Hiernach werden alle Technologien gleichermaßen anhand der vorgegebenen Klassifizierung der untersuchten Anwendungsfälle laut EEG eingeordnet (Gebäude bis 30 kWp, Gebäude ab 100 kWp und sonstige Freiflächen).

Im Rahmen der Untersuchung werden die PV-Technologien anhand von Produktionsanlagen zur Modulherstellung mit sehr unterschiedlicher Produktionskapazität und technologischer Reife abgebildet. Die jeweiligen Gesamtumweltwirkungen werden wesentlich durch die Skaleneffekte in der Produktion mit beeinflusst. Für die untersuchten Silizium-basierten PV-Systeme (mono- und multikristallin) ergeben sich mit Blick auf die Umweltwirkung nur geringfügige Unterschiede. Dieser Betrachtung liegen Angaben zur Modulherstellung bei hohen Produktionskapazitäten (größer 500 MWp) zugrunde. Die Analyse CdTe-basierter Systeme rekurriert auf Angaben eines Herstellers mit gefestigter Produktion (Kapazität >500 MWp), der ein stofflich hochwertiges Recycling seiner Module bereits heute sicherstellt und eines mittelständischen Herstellers, der eine neue Produktionslinie aufbaut (>50 MWp). Der Unterschied im Ökologie-Index von ca. 23 % zwischen den beiden untersuchten CdTe-Systemen ist auf den unterschiedlichen Stand der technologischen Entwicklung bei der Modul-/Laminatherstellung zurückzuführen. Darüber hinaus resultieren die Unterschiede in den Umweltlasten aus dem bereits heute realisierten stofflichen Modulrecycling eines Herstellers. Im Rahmen der Untersuchung werden CIS-basierte PV-Systeme auf Basis von zwei unterschiedlichen Modul-/Laminattypen analysiert, die in Anlagen mit vergleichsweise kleinen Kapazitäten produziert werden (>100 und <25 MWp). Die Umweltwirkungen beider CIS-Systeme sind ähnlich. Die Zusammensetzung des Ökologie-Indexes variiert dabei jedoch mit Blick auf die jeweils eingesetzten Materialien.

¹ Cadmiumtellurid (CdTe) ist eine kristalline Verbindung aus den Metallen Cadmium und Tellur.

² CIS steht als Kürzel für die Gruppe der Verbindungshalbleiter, die sich aus den Elementen Kupfer, Indium oder Gallium sowie Schwefel oder Selen zusammensetzen. CIS = CIGS & CIGSe.

Ökoeffizienzanalyse der Technologien anhand des Status quo

Für die betrachteten PV-Systeme ergeben sich, mit Bezug auf den gesamten für die Herstellung der Systeme eingesetzten Energieaufwand, je nach betrachtetem Anwendungsfall und Technologie **Energierrücklaufzeiten** zwischen 0,55 und 1,3 Jahren. Alle Modultypen erzeugen demnach während ihrer Lebensdauer ein Mehrfaches der für ihre Produktion eingesetzten Energie. Die Werte gelten mit dem gewählten Installationsort Nürnberg für einen mitteleuropäischen Standort mit guten Einstrahlungswerten. Für südeuropäische Standorte würden sich noch bessere Werte ergeben.

Die mit der Stromerzeugung aus Photovoltaik verbundene Gesamtumweltwirkung ist im Vergleich zur durchschnittlichen Stromerzeugung mit fossilen Energieträgern um den Faktor 10 bis 20 geringer. Es muss jedoch angemerkt werden, dass sich die Produkte „Strom aus Photovoltaik“ und „Strom aus nicht regenerativen Energien“ abseits der ökobilanziellen Bewertung von Umweltwirkungen in einigen Merkmalen, wie z. B. der mit derzeitigen Mitteln noch eingeschränkte Regelbarkeit der Photovoltaik, unterscheiden. Vor diesem Hintergrund sind die **umweltbezogenen Unterschiede** zwischen den einzelnen **PV-Technologien** als gering zu interpretieren. Die Zusammensetzung des Ökologie-Index variiert dabei jedoch. Dies ist auf die grundlegend unterschiedliche Fertigung von Wafer-basierten und substratbeschichteten PV-Modulen/Laminaten zurückzuführen. Bei Erstgenannten ist die Halbleiter- und Modulherstellung ausschlaggebend, bei Zweitgenannten stehen die Aufwendungen der Glasherstellung im Fokus.

Bei **Gegenüberstellung** der verschiedenen **Anwendungsfälle** der PV-Systeme weist die Anwendung Großdach-Industriell die beste Ökologie-Index Bewertung bei vergleichsweise niedrigen Vergütungssätzen auf. Innerhalb dieser Anwendung haben CdTe-Module die geringste Gesamtumweltwirkung, dicht gefolgt von monokristallinen Siliziummodulen bzw. den untersuchten CIS-Modulen kleinerer Hersteller. Freiflächenanlagen stellen für die regenerative Stromerzeugung mit Photovoltaik die günstigste Anwendung dar (niedrigste EEG-Vergütung). Die Gesamtumweltwirkung von Freiflächenanlagen ist allerdings höher als bei den Anwendungen Großdach-Industriell. Der umweltbezogene Unterschied der Anwendung monokristalliner Silizium-Module verkleinert sich im Vergleich zu CdTe-Modulen für die Freifläche. Der auf die Fläche bezogene Aufwand für das BOS³ ist für die Silizium-Technologien geringer. Für den Bereich privater Kleindachanlagen ergeben sich bei höherer EEG-Vergütung ähnliche, geringe Unterschiede in der Gesamtumweltwirkung wie für den Anwendungsfall Großdach-Industriell.

Umweltbezogene Stellschrauben und Potenziale

Aus umweltbezogener Sicht spielt das **BOS** je nach Technologie und vor allem Anwendungsfall eine bedeutende Rolle. Die Tatsache, dass die Modultechnologien in der Vergangenheit immer effizienter wurden, führt dazu, dass der umweltbezogene Beitrag des BOS zum Gesamtergebnis an Bedeutung gewinnt. Dementsprechend ist die Nutzung bestehender Infrastruktur, wie beispielsweise die Befestigung auf bestehenden Schrägdachflächen oder die Eingliederung von PV-Anlagen in bestehende Elektroniksysteme (Nutzung freier Transformatorkapazitäten), positiv zu bewerten.

Das Potenzial des **hochwertigen stofflichen Recyclings** von PV-Modulen erweist sich aus Umweltsicht als bedeutsam. Der Vergleich eines stofflich hochwertigen Recyclings zu einem Status quo-Recycling, das primär auf die Erfüllung von gewichtsbezogenen Recyclingquoten ausgerichtet ist, drückt sich, beispielhaft für Siliziummodule, in gut doppelt so hohen Umweltentlastungen durch das Modulrecyc-

³ BOS „Balance of System“: gesamte zum Funktionieren der Anlage benötigte Systemperipherie

ling aus. Insgesamt können die Umweltbelastungen durch die Etablierung eines stofflich hochwertigen Recyclings um ca. 10 % reduziert werden.

Für alle PV-Technologien wird für den Zeitraum 2011 bis 2012 eine Effizienzsteigerung festgestellt. Als Hebel dieser Entwicklung erweist sich besonders die Wirkungsgradsteigerung, sowohl bezüglich der Modulwirkungsgrade als auch der Skaleneffekte durch gesteigerte Durchsatzleistung der Produktionslinien. Bezogen auf den Ökologie-Index werden so Einsparungen von etwa 9 bis 17 % realisiert.

Hinsichtlich der **mittelfristigen Entwicklung** sind durch angestrebte Effizienzsteigerungen in der Fertigung (u.a. Optimierung der Gläser in Dicke und Eigenschaften und Reduktion von Kunststoffmaterialien) weitere Verbesserungen in der gleichen Größenordnung zu erwarten wie für den Zeitraum 2011/2012. Für die prognostizierte Wirkungsgrad-Entwicklung steht bei gleichbleibenden Fertigungsaufwendungen ein Verbesserungspotenzial in Höhe von 23 bis zu 33 % in Aussicht.

Der je Anwendungsfall und PV-Technologie angenommene **spezifische Jahresertrag** hat einen wesentlichen Einfluss auf die umweltbezogene Bewertung. Neben den unterschiedlichen PV-Technologien selbst wird dieser Wert mitbestimmt z. B. durch **Streuungen in der Fertigung und Spezifika der jeweiligen Auslegung** der Gesamt-PV-Systeme, z. B. der Auswahl der Wechselrichter in Anzahl und Größe oder der Stringverteilung. Die Umweltwirkungen würden, insbesondere für die jüngeren Dünnschichttechnologien kleinerer Hersteller, durch eine auf die PV-Technologien bezogene, noch spezifischere Auslegung der Gesamtsysteme voraussichtlich verringert werden.

2 Projekthintergrund und Aufgabenstellung

Photovoltaik stellt einen wichtigen Baustein der nachhaltigen Energieversorgung dar und leistet einen wesentlichen Beitrag zur Energiewende. Kritiker der Solartechnik hinterfragen aber weiterhin die Stromerzeugung mit PV-Modulen aus umweltbezogener Sicht.

Durch das Vorhaben „Ökoeffizienzanalyse von Photovoltaikmodulen“ legt bifa ein umfassendes Bild über die umweltbezogenen und ökonomischen Wirkungen vor, die mit Herstellung, Anwendung und Entsorgung aktuell verfügbarer PV-Technologien verbunden sind. Die Ziele des Vorhabens sind:

1. Abbildung der derzeitigen Produktionsverfahren und Einsatzsituationen für ausgewählte PV-Modul-Technologien
2. Ermittlung der ökologischen und ökonomischen Wirkungen mit Hilfe der Methodik der Ökoeffizienzanalyse
3. Identifizierung von Stellschrauben zur Verbesserung der Ökoeffizienz im Vergleich verschiedener PV-Module
4. Identifikation künftiger Möglichkeiten zur weiteren Verbesserung der Ökoeffizienz, beispielsweise durch verbesserte Rohstoffgewinnungs-, Fertigungs- oder Recyclingverfahren

Die Ergebnisse des Vorhabens unterstützen die strategische Weiterentwicklung der PV-Industrie. Die Vielfalt der verfügbaren PV-Modultechnologien kann im Rahmen der Untersuchung nicht vollständig abgebildet werden. Stellvertretend sind folgende PV-Modul-Technologien Gegenstand der Ökoeffizienzanalyse:

- a) Silizium-basierte Technologien: mono- und multikristallin

b) Dünnschichttechnologien: CdTe und CIS

Zur fachlichen Begleitung des Vorhabens wurde ein Projektbeirat eingerichtet, dem Vertreter von in der Wertschöpfungskette Photovoltaik tätigen Unternehmen sowie Vertreter des Auftraggebers angehören. Die Unterstützung erfolgte im Rahmen von Workshops zur Diskussion von Weichenstellungen, Annahmen und Ergebnissen sowie durch die Bereitstellung von Branchenkenntnissen und aktuellen, grundlegenden Daten.

3 Methodische Grundlagen

Die wesentlichen Bausteine der Untersuchung sind die ökobilanzielle Betrachtung der Umweltwirkungen, eine Kostenbetrachtung und deren Zusammenführung im Rahmen einer Ökoeffizienzanalyse. Abbildung 1 fasst die Schritte zur Ermittlung und gemeinsamen Betrachtung der ökologischen und ökonomischen Wirkungen zusammen.

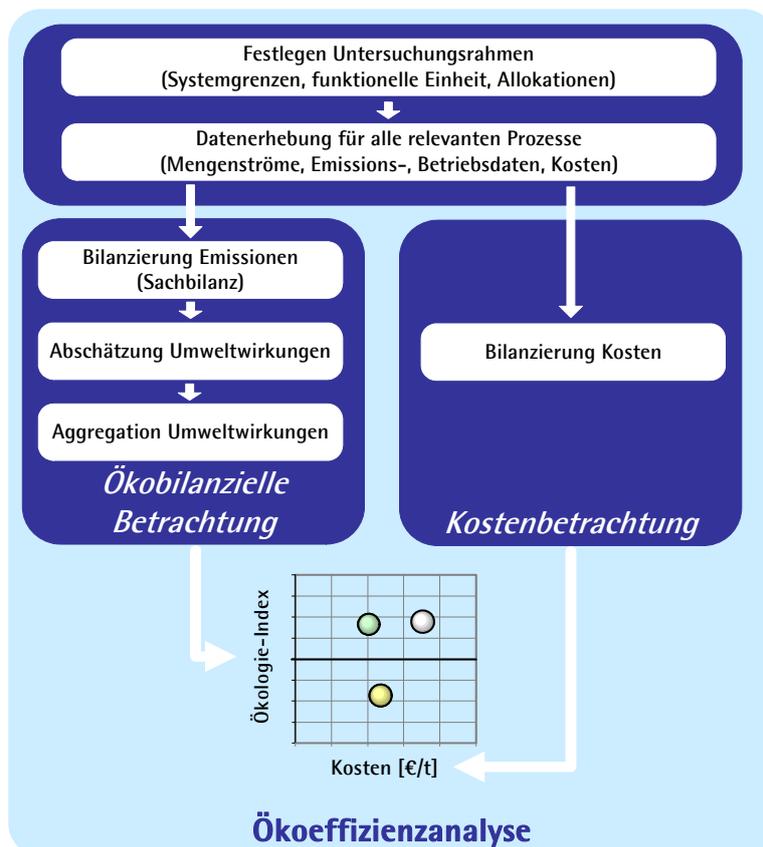


Abbildung 1: Schritte zur gemeinsamen Betrachtung der ökologischen und ökonomischen Auswirkungen im Rahmen der Ökoeffizienzanalyse.

Die ökobilanzielle Betrachtung orientiert sich an den Vorgaben der Normen zur Ökobilanz und liefert als Ergebnis Einzelwerte, welche die Umweltwirkungen der Verfahren charakterisieren. Die Analyse der Umweltwirkungen erfolgte anhand der in Tabelle 1 dargestellten Wirkungskategorien.

Tabelle 1: Auswahl der Wirkungskategorien, Zuordnung der Sachbilanzparameter zu den einzelnen Wirkungskategorien und Einheit der Wirkungsindikatorergebnisse

| Wirkungskategorie | Wirkung | Sachbilanzparameter |
|---|--|---|
| Treibhauseffekt [kg CO ₂ -Äq.] | Erwärmung der Erdatmosphäre | CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O |
| Versauerung [kg SO ₂ -Äq.] | Emission säurebildender Substanzen | NO _x als NO ₂ , SO ₂ , NH ₃ , (HCl, HF) |
| Terrestrische Eutrophierung [kg PO ₄ ³⁻ -Äq.] | Nährstoffzufuhr in Böden im Übermaß | NO _x als NO ₂ , NH ₃ |
| Photochemische Oxidantienbildung [kg C ₂ H ₄ -Äq.] | Bildung von bodennahem Ozon (Sommersmog) | CH ₄ , NMVOC, VOC unspez. (Benzol, Formaldehyd) |
| Humantoxizität [cases/kg _{emitted}] | Toxische Schädigung des Menschen und von Organismen | Luftemissionen: As, Pb, Cd, Cu, Ni, Hg, Zn Wasseremissionen: Cd, Cr(VI) |
| Ökotoxizität [PAF·m ³ ·day/kg] | Toxische Schädigung von Organismen und Ökosystemen | Luftemissionen: As, Pb, Cd, Cu, Ni, Hg, Zn Wasseremissionen: Cd, Cr(VI) |
| Ressourcennutzung [kg Eisen-Äq.] | Verbrauch fossiler Primärenergieträger und von Metallen aus Lagerstätten | Erdöl, Erdgas, Steinkohle und Metalle |
| (Äq.): Äquivalente (PAF): potentially affected fraction of species | | |

Die Umweltwirkungen werden mit Hilfe einer von bifa entwickelten Methode aggregiert. Die Prinzipien dieser Methode sind, dass sich die Vorgehensweise soweit möglich an den Vorgaben des Umweltbundesamtes (UBA) zur Bewertung in Ökobilanzen orientiert, die Methode an sich transparent und nachvollziehbar ist und als Ergebnis einen Gesamtwert ergibt.⁴

Für die Kostenbetrachtung werden die Stromgestehungskosten für die untersuchten PV-Anlagen mit Hilfe der Vergütungssätze nach dem Erneuerbare Energien Gesetz (EEG) angenähert.

Die Ökoeffizienzanalyse stellt schließlich das Ergebnis der ökobilanziellen Betrachtung den mit der Stromerzeugung aus PV-Anlagen verbundenen spezifischen Kosten (hier: EEG-Vergütungssätze) gegenüber.

⁴ Detaillierte Ausführungen zu den methodischen Grundlagen siehe auch Anhang A.

4 Anmerkungen zum Untersuchungsrahmen

Die Studie betrachtet einen planmäßigen Lebensweg bestehend aus Produktion, regulärem Betrieb und abschließender Entsorgung. Nicht Gegenstand dieser Studie sind ungeplante (auch illegale) Ereignisse wie Feuer, wilde Deponierung, etc. Die verschiedenen konzipierten PV-Anlagen erzeugen über ihre Nutzungsdauer unterschiedliche Strommengen. Zum besseren Vergleich der Ergebnisse werden diese auf die Strommenge (pro GWh) normiert. Die Datenerhebung bezieht sich auf den Status quo (2011/2012) sowie davon ausgehend auf zukünftige Entwicklungen. Dabei wird der Fokus auf die Herstellung und Anwendung in Deutschland gelegt. Die untersuchten Anwendungsfälle unterscheiden sich durch die Anlagengröße, den Neigungswinkel der PV-Module zur Sonne, sowie im Einsatz der weiteren Systemkomponenten wie Wechselrichter, Aufständerung und Verkabelung der PV-Anlage.

5 Lebenswegmodellierung von PV-Systemen

5.1 Lebensweg eines PV-Systems

Die Analyse der Umweltauswirkungen erstreckt sich über den gesamten Lebensweg der PV-Systeme in verschiedenen Einsatzbereichen mit folgenden Lebenswegabschnitten:

- a) Herstellungsphase
 - Rohstoffgewinnung und Veredelung – Herstellung von Ausgangsmaterialien
 - Modulherstellung – Herstellung des PV Moduls je nach Technologie
 - BOS⁵ Herstellung – Herstellung von Wechselrichter, Befestigungskomponenten, Verkabelung
 - PV-System Herstellung – Montage von Modulen und BOS im jeweiligen System
- b) Nutzungsphase
 - über die Lebensdauer erzeugte Strommenge eines PV-Systems
 - Einstrahlung
 - Degradation⁶ des Modulwirkungsgrades
- c) Entsorgung und Recyclingphase

Die Systemgrenze der Bilanzierung von PV-Systemen umfasst die Rohstoffgewinnung und -bereitstellung für technische Prozesse sowie die Abgabe von Elementarflüssen an die Umweltmedien Wasser, Luft und Boden. Ein zusätzlicher Nutzen aus Reststoffen sowie der Verwertung von Abfällen ist

⁵ BOS „Balance of System [component]“ (Begriffserläuterung siehe Kapitel 5.2.3)

⁶ PV-Module unterliegen durch Werkstoffalterung einer Leistungsminderung im Laufe der Zeit. Die Degradation muss bei der Ertragsermittlung berücksichtigt werden [PHOR 2013a].

als funktionsäquivalenter Nutzen errechnet⁷. Bereitstellung und Unterhalt der Infrastruktur (Bau, Wartung und Reparatur von Gebäuden, Maschinen, Industrieanlagen, Transportmittel und Verkehrswege) werden nicht berücksichtigt.

Die Herstellungsphase des PV-Systems wird für die folgenden Technologien untersucht:

- a) Silizium-basierte PV-Module: monokristallin und multikristallin
- b) Dünnschicht PV-Module: CdTe und CIS

Die Daten für die Rohstoffgewinnung und -veredelung werden zum größten Teil der Eco-Invent Datenbank [ECOI 2010] entnommen.

5.2 Systemkomponenten

5.2.1 Siliziumbasierte Halbleiter

Der Grundstoff für die Herstellung Silizium-basierter Solarzellen steht in Form von Quarzsand in ausreichender Menge zur Verfügung. Nach unterschiedlich aufwendigen Reinigungsschritten liegt das sog. Polysilizium in verschiedenen Qualitäten für unterschiedliche Anwendungsgebiete vor (Metallurgie, Solar-, Halbleiterindustrie). Als Referenzprodukte werden ein monokristalliner und ein multikristalliner Modultyp mit einer jeweiligen Leistung von durchschnittlich 245 Wp ausgewählt. Die Daten für multikristalline Module basieren auf Angaben eines Herstellers mit weltweiten Produktionskapazitäten für mono- und multikristalline Module mit jeweils >500 MWp. Die Herstellung monokristalliner Module unterscheidet sich nur bis zum Si-Ausgangsmaterial. Der schematische Fertigungsprozess ist Abbildung 2 zu entnehmen.

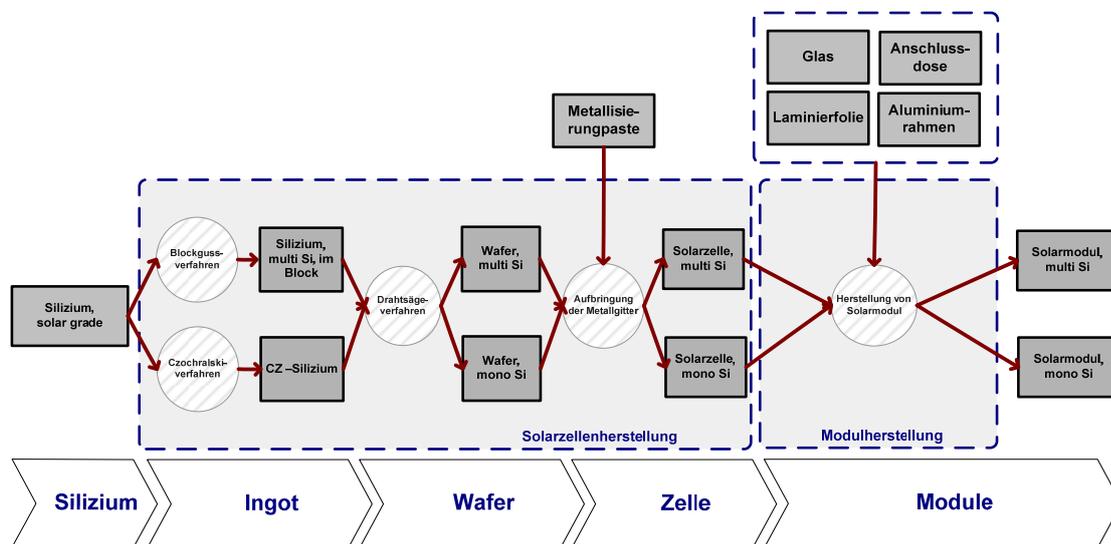


Abbildung 2: Übersicht über den Fertigungsprozess für Silizium-basierte PV-Module.

⁷ Der konventionelle Herstellungs- beziehungsweise Produktionsprozess eines Zusatznutzens wird als Äquivalenzprozess oder Äquivalenzsystem bezeichnet. Für jeden quantifizierbaren Zusatznutzen wird ein spezifisches Äquivalenzsystem modelliert,

5.2.2 Dünnschicht-Technologien

Dünnschicht-PV-Module basieren auf Halbleitern, die direkt auf ein Substrat (meistens auf einer Glasscheibe) aufgebracht werden.

5.2.2.1 Cadmiumtellurid-Technologie

Diese Technologie setzt als Halbleitermaterial Cadmiumtellurid (CdTe) ein, eine kristalline Verbindung aus den Metallen Cadmium und Tellur. Cadmium ist ein Abfallprodukt der Zink-, Kupfer- und Bleigewinnung und in seiner metallischen Form aufgrund seiner toxischen Eigenschaften nur sehr begrenzt weiterverwendbar. Durch die chemische Veredelung mit dem Halbmetall Tellur, welches bei der Kupfer- und Bleiherstellung aus Anodenschlamm extrahiert und in einigen Minen weltweit direkt abgebaut werden kann, entsteht CdTe. [CALY 2010] Abbildung 3 gibt einen Überblick über den Fertigungsprozess für CdTe PV-Module.

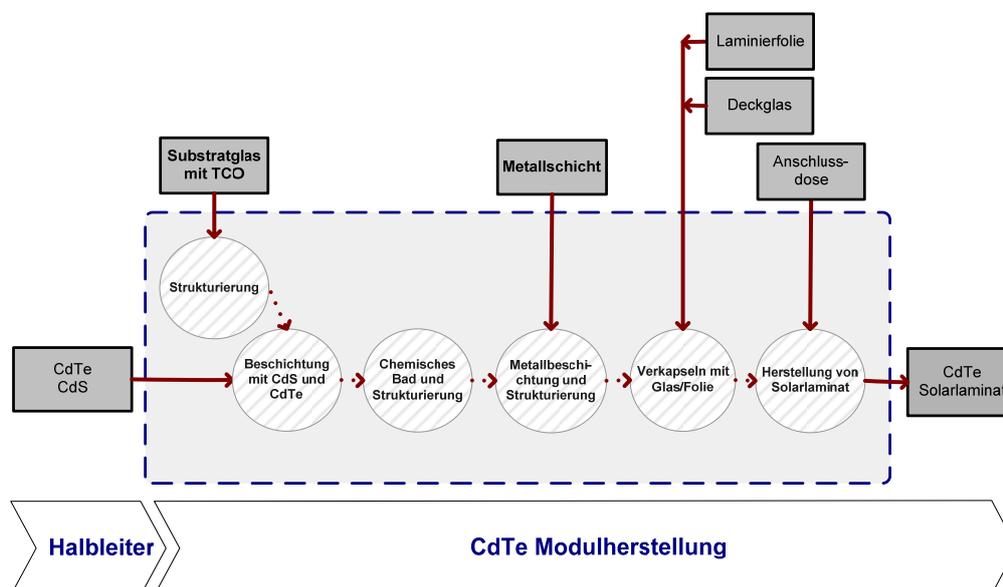


Abbildung 3: Übersicht über Fertigungsprozess für CdTe PV-Module

Als Referenzprodukte für die Lebenswegmodellierung werden zwei CdTe-Produkte herangezogen: Die Daten des CdTe-Modul 1 basieren auf Angaben eines Produzenten mit Produktionskapazitäten in Deutschland >50 MWp, die des CdTe-Modul 2 auf Angaben eines mittelständischen Unternehmens (Kapazität >50 MWp).

5.2.2.2 CIS-Technologie

Kupferbasierte Dünnschichtmodule zählen zu den jüngsten bereits kommerziell eingesetzten Dünnschichttechnologien. „CIS“ steht als Kürzel für die Gruppe der Verbindungshalbleiter. Die Halbleiterschicht besteht aus Kupfer (Cu), Indium (In) und Selen (Se) sowie aus Gallium (Ga) und Schwefel (S). In Abbildung 4 sind die grundsätzlichen Fertigungsschritte zusammengestellt.

das den gleichen beziehungsweise einen vergleichbaren funktionsäquivalenten Nutzen erzeugt.

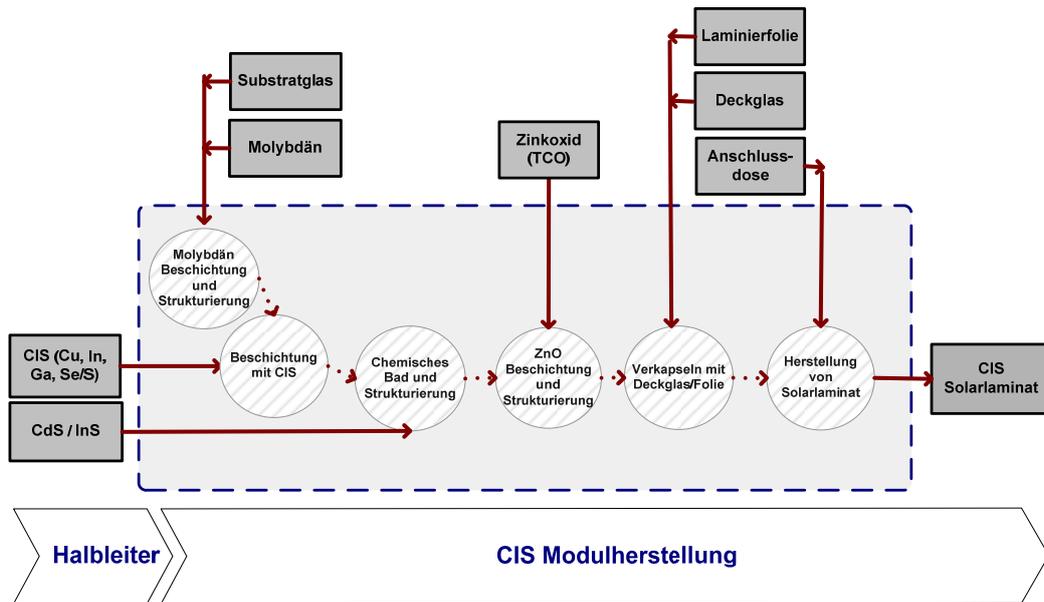


Abbildung 4: Übersicht über Fertigungsprozess für CIS PV-Module

Für die Lebenswegmodellierung werden zwei CIS-Produkte herangezogen: ein Kupfer-Indium-Disulfid mit einer Leistung von 125 Wp und ein Kupfer-Indium-Gallium-Diselenid mit einer Leistung von 90 Wp pro Modul. Beide Module werden im mittelständischen Maßstab hergestellt (Produktionskapazitäten >100 und <25 MWp).

5.2.3 Balance of System (BOS)

Der Begriff „Balance of System [component]“ (BOS) beschreibt die gesamte Systemperipherie bzw. Systemkonfiguration und fasst im engeren Sinn alle Anlagenteile zusammen, die zum Funktionieren der Anlage benötigt werden. Ausnahme ist die von der erneuerbaren Energiequelle gespeiste, "energieerntende" Kernkomponente. Photovoltaik-Module gehören also nicht zum BOS. Typische Bestandteile sind elektrische Baugruppen wie Wechselrichter und Verkabelung sowie bauliche Einrichtungen wie Fundamente und Trägerelemente. [PROZ 2009]

5.3 Einsatzsituation von PV-Modulen

Für die Bearbeitung des Vorhabens werden die folgenden exemplarisch definierten Anwendungsfälle abgeleitet, die die Verwendung verschiedener PV-Technologien in verschiedenen Einsatzbereichen/-situationen abbilden. Es wird eine Differenzierung entsprechend der in der Branche gängigen Marktsegmente⁸ vorgenommen:

- Aufdach-Privat – Rooftop-Residential (RTR),
- Großdach-Industriell – Rooftop-Commercial/Industrial (RTC) und
- Freiflächenanlage – Ground-Mounted (GM).

⁸ Im Wesentlichen wird nach Anlagengröße unterschieden: z. B. Gebäudeanlagen bis 30 kWp (Kleindächer, meist Wohngebiet), Gebäudeanlagen ab 100 kWp (Großdächer, meist kommerziell/industriell), bodeninstallierte Anlagen im MWp-Bereich (Freiflächen, meist Energieversorger)

Tabelle 2 zeigt eine Übersicht der für die Bilanzierung der beschriebenen Anwendungsfälle festgelegten Parameter.

Tabelle 2: Übersicht der Anlagen-Parameter für die drei Anwendungsfälle Aufdach-Privat, Großdach-Industriell und Freiflächenanlage

| Anwendungsfall | Parameter | Wert |
|---|----------------|--|
| Allgemein | Standort | Nürnberg, Klimadatensatz (1981-2000) |
| | Ausrichtung | Ausrichtung: Süd |
| | Modulleistung | Si: 245 Wp (mono) / 245 Wp (multi) CdTe: 85 Wp / 80 Wp CIS: 125 Wp / 90 Wp |
| Aufdach-Privat <i>Rooftop Residential</i> | Anlagengröße | 50 m ² |
| | Aufstellwinkel | 30 ° |
| | Befestigung | Konfiguration 30 °-Dach (Ziegel) |
| | Wechselrichter | ca. 10 kW |
| | Kabel | DC: ab 30 bis 70 m, AC: 5 m Mittelspannungskabel vorhanden |
| | Transformator | keiner, da Teil der bestehenden Infrastruktur |
| Großdach-Industriell <i>Rooftop Commercial</i> | Anlagengröße | 1.500 m ² |
| | Aufstellwinkel | 15 ° |
| | Befestigung | Konfiguration 15 °-Dach (Trapezwellblech) |
| | Wechselrichter | ca. 250 kW |
| | Kabel | DC: ab 850 bis 4.000 m, AC: 25 m Mittelspannungskabel vorhanden |
| | Transformator | keiner, da Teil der bestehenden Infrastruktur |
| Freiflächenanlage <i>Ground-Mounted</i> | Anlagengröße | 5 MWp |
| | Aufstellwinkel | 30 ° |
| | Befestigung | Konfiguration ebene Fläche → Beirat |
| | Wechselrichter | ca. 10 kW |
| | Kabel | DC: ab 70.000 bis 170.000 m, AC-Mittelspannungskabel: 5.000 m |
| | Transformator | ja, mit Wechselrichter kombiniert |

Tabelle 3 fasst die detaillierte Auslegung für die PV-System-Modellierung zusammen. Der obere Teil zeigt die ausgewählte Anzahl der Module und die Wechselrichterauslegung für die Anwendungsfälle. Ebenso sind die installierte Anlagenleistung und die Ertragspezifika angegeben. Beide Angaben wurden für das Basisjahr 2011 ermittelt. Die Stromerträge der Szenarien 2012 und mittelfristige Entwick-

lung leiten sich über eine Hochrechnung der Modulleistung⁹ entsprechend ab. Der untere Teil der Abbildung fasst die Stückgewichte der Befestigungskomponenten, der Verankerung, Einfriedung und Kabellängen zusammen.

Tabelle 3: Überblick über die (oben) Anzahl der PV-Module und Wechselrichterauslegung für die bilanzierten Systemkonfigurationen mit Zusatzinformation zu PV-Leistung und spezifischem Jahresertrag aus PV*Sol®; (unten) Stückgewichte der Befestigungskomponenten, der Verankerung und Einfriedung sowie Angaben über die Kabellängen; alle Werte werden in einem zweiten Schritt auf die Bezugs-einheit (Spalte Normierung) normiert

| Szenario | Normierung | Bezug 1 | | | | | | | Wechselrichter, 10kW, skalierbar, für PV (rund 4...) | | | Wechselrichter, 1MW, skalierbar, für PV (ca. 6 t) | | Transformator, Mittelspannung, 1 MW (ca. 14.5 t) | | PV-Leistung | | spezifischer Jahresertrag |
|------------|----------------|----------------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|--|------|------|---|---------|--|--|-------------|--|---------------------------|
| | | m ² | Stk. | Stk. | Stk. | Stk. | Stk. | Stk. | kW | MW | MW | kWp | kWh/kWp | | | | | |
| RTR_multi | 50 | 50,3 | 30 | | | | | | 8 | | | 7,35 | 1.001 | | | | | |
| RTR_mono | 50 | 50,3 | | 30 | | | | | 8 | | | 7,35 | 996 | | | | | |
| RTR_CdTe_1 | 50 | 46,8 | | | 65 | | | | 6 | | | 5,53 | 1.050 | | | | | |
| RTR_CdTe_2 | 50 | 46,8 | | | | 65 | | | 6 | | | 5,20 | 1.016 | | | | | |
| RTR_CIS_1 | 50 | 48,23 | | | | | 45 | | 6 | | | 5,63 | 935 | | | | | |
| RTR_CIS_2 | 50 | 46,35 | | | | | | 56 | 5 | | | 5,04 | 916 | | | | | |
| | m ² | m ² | Stk. | Stk. | Stk. | Stk. | Stk. | Stk. | kW | MW | MW | kWp | kWh/kWp | | | | | |
| RTC_multi | 1.500 | 1.475 | 880 | | | | | | 240 | | | 216 | 990 | | | | | |
| RTC_mono | 1.500 | 1.475 | | 880 | | | | | 240 | | | 216 | 964 | | | | | |
| RTC_CdTe_1 | 1.500 | 1.426 | | | 1.980 | | | | 165 | | | 168 | 1.017 | | | | | |
| RTC_CdTe_2 | 1.500 | 1.426 | | | | 1.980 | | | 150 | | | 158 | 982 | | | | | |
| RTC_CIS_1 | 1.500 | 1.447 | | | | | 1.350 | | 181 | | | 169 | 921 | | | | | |
| RTC_CIS_2 | 1.500 | 1.449 | | | | | | 1.750 | 168 | | | 158 | 880 | | | | | |
| | MWp | MWp | Stk. | Stk. | Stk. | Stk. | Stk. | Stk. | kW | MW | MW | kWp | kWh/kWp | | | | | |
| GM_multi | 5 | 5,304 | 21.648 | | | | | | | 4,80 | 4,80 | 5304 | 1.086 | | | | | |
| GM_mono | 5 | 5,304 | | 21.648 | | | | | | 4,80 | 4,80 | 5304 | 1.064 | | | | | |
| GM_CdTe_1 | 5 | 5,310 | | | 62.496 | | | | | 4,56 | 4,56 | 5312 | 1.047 | | | | | |
| GM_CdTe_2 | 5 | 5,310 | | | | 62.496 | | | | 4,56 | 4,56 | 5000 | 1.065 | | | | | |

⁹ siehe Parameter P in Tabelle 5 (Seite 20)

| Szenario | Normierung | Bezug 2 | | | | | | Bezug 3 | | Bezug 3 | | | |
|------------|----------------|----------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------|--|-------------------------------|---|---------------------------------------|----------------|----------------|------------------------------------|-------------------------------------|----------------------------|
| | m ² | m ² | kg | kg | kg | kg | kg | m ² | m ² | m ² | m | m | m |
| | | Dachhaken, Edelstahl, geschweißt | Trägerprofile, Aluminium, extrudiert | Modulklemmen, Aluminium, gebohrt | BOS-Zubehör, Einklickbausteine, Kunststoff | Schrauben, Edelstahl, gefräst | Verankerung/Fundament, für PV-Freiflächenanlage | Einfriedung, für PV-Freiflächenanlage | | | Kabel, Gleichspannung, für PV (DC) | Kabel, Wechselspannung, für PV (AC) | Kabel, Mittelspannung (AC) |
| RTR_multi | 50 | 51,92 | 48 | 59 | 4,6 | 0,1 | 7,4 | | | 50,30 | 70 | 5 | |
| RTR_mono | 50 | 51,92 | 48 | 59 | 4,6 | 0,1 | 7,4 | | | 50,30 | 70 | 5 | |
| RTR_CdTe_1 | 50 | 49,17 | 67 | 78 | 11 | 0,1 | 8,5 | | | 46,80 | 110 | 5 | |
| RTR_CdTe_2 | 50 | 49,17 | 67 | 78 | 11 | 0,1 | 8,5 | | | 46,80 | 110 | 5 | |
| RTR_CIS_1 | 50 | 51,39 | 48 | 61 | 3,2 | 0,1 | 7,8 | | | 48,23 | 130 | 5 | |
| RTR_CIS_2 | 50 | 48,30 | 59 | 73 | 0,0 | 0,1 | 8,1 | | | 46,35 | 150 | 5 | |
| | m ² | m ² | kg | kg | kg | kg | kg | m ² | m ² | m ² | m | m | m |
| RTC_multi | 1.500 | 1.523 | 0 | 1.012 | 131 | 1,8 | 33 | | | 1.475 | 840 | 25 | |
| RTC_mono | 1.500 | 1.523 | 0 | 1.012 | 131 | 1,8 | 33 | | | 1.475 | 840 | 25 | |
| RTC_CdTe_1 | 1.500 | 1.498 | 7,4 | 2.226 | 335 | 4,0 | 0,2 | | | 1.426 | 3.960 | 25 | |
| RTC_CdTe_2 | 1.500 | 1.498 | 7,4 | 2.226 | 335 | 4,0 | 0,2 | | | 1.426 | 3.960 | 25 | |
| RTC_CIS_1 | 1.500 | 1.542 | 0 | 1.525 | 201 | 2,7 | 60 | | | 1.447 | 2.796 | 25 | |
| RTC_CIS_2 | 1.500 | 1.510 | 6,3 | 1.975 | 530 | 3,6 | 0,2 | | | 1.449 | 3.180 | 25 | |
| | MWp | MWp | t Fe | kg Al | kg PVC | t Zement | t Fe | MWp | km | km | km | km | km |
| GM_multi | 5 | 1 | 38,3 | 340 | 706 | 76,3 | 4,9 | 5 | 4,6 | 66,3 | 30,0 | 30,0 | 30,0 |
| GM_mono | 5 | 1 | 38,3 | 340 | 706 | 76,3 | 4,9 | 5 | 4,6 | 66,3 | 30,0 | 30,0 | 30,0 |
| GM_CdTe_1 | 5 | 1 | 91,8 | 1.136 | 529 | 43,4 | 4,8 | 5 | 14,8 | 103,0 | 30,7 | 30,7 | 30,7 |
| GM_CdTe_2 | 5 | 1 | 91,8 | 1.136 | 529 | 43,4 | 4,8 | 5 | 14,8 | 103,0 | 30,0 | 30,0 | 30,0 |

Vergleicht man beispielsweise die Bauteilgewichte für die Befestigung (Tabelle 3, unten, grüner Bereich) im Anwendungsfall Großdach-Industriell (RTC), ist erkennbar, dass für die flächenmäßig kleineren Dünnschichtmodule etwa doppelt so viele Aluminium-Trägerprofile und mehr als doppelt so viele Modulklemmen und Einklickbausteine Verwendung finden. Mit Bezug auf die begrenzte Fläche (1.500 m²) können mit Dünnschicht-Modulen aber nur Anlagenleistungen um 165 kWp (Tabelle 3, oben, PV-Leistung) realisiert werden. Für Silizium-Module liegt der Wert bei 216 kWp, was am höheren Wirkungsgrad der Module liegt.

Ein weiterer Vergleich verdeutlicht den Mehraufwand für die Installation einer Freiflächenanlage (GM) gegenüber der Installation auf einem Großdach (RTC). Pro installiertem kWp werden bei der Silizium-basierten Freiflächenanlage fast 9 kg an Eisenmetall, Aluminium und Kunststoffen für die Befestigung aufgewendet. Die Werte für den Anwendungsfall Großdach-Industriell (RTC) liegen nur bei etwa 5,5 kg/kWp (60 %). Für CdTe-Freiflächenanlagen werden fast 20 kg/kWp der Materialien verbaut. Auf dem Großdach liegen die Werte nur bei ca. 15 kg (79 %) pro installiertem kWp. Gegenüber einer Aufdachkonstruktion kommen bei Freiflächenanlagen noch Aufwendungen für die Verankerung der sog. Tische mit Fundamenten hinzu. Letztlich muss eine statisch ausreichende Befestigung geschaffen werden. Ein bestehendes Dach übernimmt diese Funktion bereits teilweise.

Ertragsberechnung

Für die Ertragsberechnung der gewählten Systemkonfigurationen wird eine Simulation im Programm PV*Sol® durchgeführt. Als Standort wird mit Nürnberg ein in Bayern zentral gelegener Ort mit mittleren, aber dennoch guten Einstrahlungswerten ausgewählt.

Die aus PV*Sol® ermittelten spezifischen Jahreserträge unterliegen pro Jahr durch die Alterung der Module einer Degradation von 0,7 % des Anfangsertrages. Bei der Berechnung des Gesamtstromertrages über die festgelegte Laufzeit von 30 Jahren wird dem Rechnung getragen. Alle ermittelten spezifischen Jahreserträge sind für die jeweiligen Einsatzsituationen und PV-Technologien bereits in Tabelle 3 zusammengefasst.

5.4 Ermittlung der Kosten

Die vorliegende Studie wurde im Umfeld sehr dynamischer Marktentwicklungen durchgeführt. Die eigentlichen Systemkosten der Stromerzeugung konnten nur preisbasiert angenähert werden. Als Stromgestehungskosten (LCOE)¹⁰ ergaben sich somit nahezu die zum Zeitpunkt gültigen EEG-Vergütungssätze für die jeweiligen Anwendungsfälle. Im Wesentlichen stellen sich für alle Technologien zudem identische LCOE ein, was sich durch die Orientierung der Endkundenpreise an der Einspeisevergütung erklärt.

Bezüglich der Berücksichtigung ökonomischer Aspekte im Rahmen der Ökoeffizienzbetrachtung wird die vergleichende Diskussion der Stromgestehungskosten auf Basis preisbasierter LCOE für die verschiedenen PV-Technologien als wenig sinnvoll erachtet. Die ökonomische Einschätzung der Technologien wird somit, relativ zur im jeweiligen Zeitraum gültigen Vergütung, nach EEG vorgenommen. Tabelle 4 zeigt die Einspeisetarife für die zu bewertenden Anwendungsfälle und Zeiträume [BNA 2013a, BNA 2013b].

Tabelle 4: Einspeisetarife nach EEG für ausgewählte Zeitpunkte (Veränderung in %) [BNA 2013a, BNA 2013b]

| Einspeisetarife nach EEG [€ ct/kWh] | Dez 2011 | | Jan 2012 | | Jun 2012 | | Dez 2012 |
|--|-------------|-------|-------------|---------|-------------|--------|-------------|
| Gebäude, bis 30 kWp | 28,74 | -15 % | 24,43 | -22,6 % | 18,92 | -7,8 % | 17,45 |
| Gebäude, ab 100 kWp | 25,86 | -15 % | 21,98 | -27,2 % | 16,01 | -7,7 % | 14,77 |
| Freiflächen, sonstige | 21,11 | -15 % | 17,94 | -27,0 % | 13,1 | -7,8 % | 12,08 |

¹⁰ LCOE „Levelized Costs of Electricity“

6 End of Life – Entsorgung und Recycling

6.1 Ausgangssituation

Die Entsorgung von PV-Modulen beschränkt sich heute auf fehlerhafte oder während des Transports beschädigte Module. Dies ist auf die lange Lebensdauer von PV-Modulen zurückzuführen. Bei einer prognostizierten Lebensdauer von 30 Jahren werden erst in den nächsten Jahrzehnten größere Mengen an PV-Modulen zur Entsorgung anstehen. Derzeit bestehen einerseits das übergreifende Rücknahme und Recyclingprogramm PV-Cycle, dem etwa 90 % aller Hersteller des europäischen Solarmarktes angehören [SONN 2012], zum anderen verpflichten sich auch einzelne Hersteller, Module eigenverantwortlich zurückzunehmen und zu recyceln. Die EU-Richtlinie 2012/19/EU¹¹ (WEEE-Novelle) fixiert zudem die Anforderungen an die Hersteller bzgl. der Sammel- und Verwertungsquoten.

Bei den BOS-Bauteilen handelt es sich im Wesentlichen um Komponenten aus der Bau- und Elektrobranche für die etablierte Rücknahme- und Recyclingsysteme bestehen.

6.2 Abbildung der Entsorgung von PV-Modulen

Bei der Betrachtung der Verwertung der PV-Altmodule sind der besonders hohe Anteil an Glas (bis zu 90 %) sowie die Metallanteile im Produkt von Bedeutung. Das Recycling von Halbleitermaterialien ist erst nach einer aufwändigen Aufbereitung möglich. Im Rahmen des Vorhabens werden zwei Szenarien in Bezug auf die Entsorgung von PV-Modulen analysiert.

6.2.1 Szenario Status quo-Recycling – Recycling Option minimal

Dem Szenario Status quo-Recycling liegt die aktuelle Entsorgungssituation der PV Systeme zu Grunde. Im Falle von Siliziummodulen erfüllt dieses Szenario schon jetzt die ab 2018 vorgesehenen Anforderungen nach WEEE-Novelle. Die Aufbereitungstechniken, die schon heute für die PV-Silizium-Module angewendet werden, ermöglichen eine fast vollständige Wiederverwertung von Glas und Metallen. Nach der Sammlung von Silizium-PV-Modulen werden die Anschlussdosen und Kabel vom Modul abgetrennt und dem Recycling zugeführt. Das Modul wird geschreddert und die verbleibenden Fraktionen sortiert und zerkleinert. Die Hauptkomponenten Glas, Aluminium und Kupfer werden dem Recyclingprozess zugeführt. Das Glas wird zu Glasfasern und Glasdämmstoffen verarbeitet, Aluminium und Kupfer werden dem Metallrecycling zugeführt. Es findet kein stoffliches Recycling von Silizium statt.

Diese Art der Photovoltaikmodulaufbereitung eignet sich jedoch nicht für Dünnschichtmodule, da die Gläser mit der Halbleiterschicht kontaminiert sind und ohne Entfernung des Halbleiters keine Wiederverwertung des Glases möglich ist. Da die Dünnschichtmodule erst seit wenigen Jahren installiert werden und die Abfallmenge sehr gering ist, fehlt es momentan an kommerziellen Aufbereitungsanlagen für diese Modulkategorie. Eine Ausnahme für die Behandlung von Produktions-/Montageabfällen bildet an dieser Stelle der weltweit größte Anbieter von CdTe-Modulen. Dieser betreibt seit dem Jahr

¹¹ Richtlinie 2012/19/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 4. Juli 2012 über Elektro- und Elektronik-Altgeräte (Neufassung)

2005 eine eigene Recyclinganlage und stellt für alle eigenen Module die kostenlose Rücknahme und das Recycling sicher.

6.2.2 Szenario hochwertiges Recycling – Recycling Option optimal

Das Szenario soll die Potenziale hochwertiger Recyclingprozesse abbilden, die schon heute in Pilotanlagen bzw. industriellen Prozessen Anwendung finden.

Für die Abbildung von Entsorgungsprozessen, die ein hochwertiges stoffliches Recycling (von Glas, Aluminium, Kupfer sowie Solarzellenbruch) realisieren, werden für Si-basierte Module die diesbezüglichen Erfahrungen eines führenden Modulproduzenten berücksichtigt. Der Prozess beginnt mit der Abtrennung der Anschlussdosen und noch vorhandener Kabel. Die Anschlussdosen werden als Elektronikschrott gesammelt, die Kabel gehen zum Kabelrecycling. In der Recyclingofenanlage erfolgt eine thermische Verbundtrennung. Die im Modul vorhandenen organischen Bestandteile werden vollständig in die gasförmige Phase überführt. Nach der thermischen Zersetzung des Modulverbundes werden die anorganischen Komponenten getrennt und sortiert. Eine Kombination aus mehreren Aggregaten führt zu Reinheiten des Solarzellbruchs >99,99 % [SOCY 2012].

Die Potenziale des hochwertigen Recyclingprozesses für CdTe-Dünnschichtmodule werden anhand einer sich bereits im industriellen Maßstab in Betrieb befindlichen Anlage betrachtet. Die angewendete Technologie [FIRS 2009] ermöglicht ein hochwertiges Recycling von Glas, Aluminium, Kupfer sowie Halbleitermaterialien, die weiter zu CdTe aufbereitet werden. Nach Herstellerangaben können dadurch über 95 % des Halbleitermaterials in einem metallhaltigen Filterkuchen sowie etwa 90 bis 95 % des Glases zurückgewonnen werden, zum Teil bereits in hochwertiger Qualität. Die Module werden nach der Abtrennung von Dose und Kabel einem Trockenprozess zugeführt, in welchem sie geschreddert und zerkleinert werden (Trennung der Laminierfolie vom Glas). Ein nachgeschalteter Nassprozess umfasst die Entfernung der Halbleiterschichten, die Trennung von Feststoffen (Glas-Laminiermaterial-Separation) und Flüssigstoffen (Ausfällung und Entwässerung). Anschließend werden die Halbleitermaterialien aus dem Filterkuchen in einem nachgeschalteten Prozess aufbereitet.

Die Untersuchung der hochwertigen Recyclingmöglichkeiten von CIS-Modulen erfolgt anhand von Daten einer Pilotanlage eines Chemieunternehmens. Zur Ausfällung der Halbleitermaterialien nutzt das Unternehmen eine Chemikalienkombination [LOSE 2013], mit der sich bei Raumtemperatur die Halbleiterverbindungen in unterschiedlicher Reinheit ablösen lassen (z. B. Indiumgewinnung mit 95 %iger Reinheit). [PVM 2011] Outputmaterialien dieses Prozesses sind hochwertiges Flachglas, Laminierfolie, Metalle sowie Halbleiter, die weiter aufbereitet werden können.

7 Ergebnisse der Ökoeffizienzanalyse

Die Ermittlung der Umweltauswirkungen für jede in der Studie untersuchte Technologie erfolgt anhand der in Kapitel 3 beschriebenen Methodik (siehe auch Anhang A). Für die Erstellung des Stoffstrommodells werden alle notwendigen Parameter und Annahmen in sog. Szenarien abgebildet.

7.1 Überblick über die Szenarien

Die folgenden Tabellen fassen die in den Kapiteln 5 und 6 beschriebenen Aspekte nochmals zusammen. Tabelle 5 gibt einen Überblick über die bilanzierten Anwendungsfälle und die beiden Recycling-Szenarien am Lebenszyklusende.

Tabelle 5: Auslegung der Anwendungsfälle für die zu bilanzierenden Szenarien

| Anwendungsfälle nach Marktkategorien | |
|--|---|
| Aufdach-Privat | 50 m ² Dachfläche, Ausrichtung 30° Süd, Ziegeldach |
| Großdach-Industriell | 1.500 m ² Dachfläche, Ausrichtung 15° Süd, Trapezwellblech |
| Freiflächenanlage | 5 MWp installierte Anlagenleistung, ebene Fläche mit Aufständigung, Ausrichtung 30° Süd |
| Recycling-Szenarien | |
| Rec.SQ | Recycling-Option Status quo = minimales Recycling ¹ |
| Rec.opt | Recycling-Option optimal = hochwertiges Recycling |
| ¹ Ausnahme: Recyclinganlage von führendem CdTe-Hersteller bereits in Betrieb, daher im Fall CdTe (1) bereits hochwertiges Recycling | |

Tabelle 6 zeigt die die Modul-Spezifika für die Ist-Situation der PV-Modulherstellung im Jahr 2011 im Überblick (Szenario 2011). Die kurzfristigen Verbesserungen, die ausgehend von der Situation in 2011 bereits im Jahr 2012 realisiert werden konnten, finden sich im Szenario 2012 wieder.

In zwei weiteren Szenarien wird das Potenzial mittelfristig zu erwartender Entwicklungen abgebildet. Zum einen werden die Möglichkeiten der Reduktion des Ressourceneinsatzes in der Modulfertigung durch eine höhere Fertigungs-Effizienz behandelt. Zum anderen wird ein Ausblick über die voraussichtliche Entwicklung der Modulwirkungsgrade gegeben. Für beide Szenarien kann eine mittelfristige Umsetzung innerhalb der nächsten fünf Jahre als wahrscheinlich angenommen werden. Im Sinne einer konservativen Betrachtung werden beide Szenarien getrennt voneinander betrachtet und nicht kombiniert dargestellt.

Tabelle 6: Szenarienüberblick und wichtige Parameter

| Szenarien | 2011 | 2012 | Mittelfristige Entwicklung Fertigungs-Effizienz | Mittelfristige Entwicklung Modul-Wirkungsgrad* |
|---|---|-------------------------|---|--|
| Modulfertigung | | | | |
| Silizium mono | monokristallin: P: 245 Wp A: 1,68 m ² | P: 265 Wp | Materialeinsparung: - Deckglas: 25 % Substituierung: - Blei: vollständig - Silber: anteilig zu 50 % | P: 350 Wp |
| Silizium multi | multikristallin: P: 245 Wp A: 1,68 m ² | P: 255 Wp | Materialeinsparung: - Deckglas: 25 % Substituierung: - Blei: vollständig - Silber: anteilig zu 50 % | P: 340 Wp |
| CdTe (1) | CdTe: P: 85 Wp A: 0,72 m ² | P: 95 Wp | Materialeinsparung: - Substratglas: 25 % | P: 125 Wp |
| CdTe (2) | CdTe: P: 80 Wp A: 0,72 m ² | P: 85 Wp | Materialeinsparung: - Substratglas: 25 % | P: 120 Wp |
| CIS (1) | CIGS: P: 125 Wp A: 1,09 m ² | P: 125 Wp, Neudesign | Materialeinsparung: - Substratglas: 25 % | P: 185 Wp |
| CIS (2) | CIGSe: P: 90 Wp A: 0,81 m ² | k.a. | k.a. | k.a. |
| Material- und Energieeinsatz (für alle Technologien) | modulspezifisch | keine Änderung | Materialeinsparung: - Metalle: 1 % - Kunststoffe: 5 % Energieeinsparung: - Strom: 5 % | keine Änderung |
| Balance of System | | | | |
| Dachhaken, Schrauben | aus Edelstahl | keine Änderung | aus stückverzinktem Stahl | keine Änderung |
| PV-Kabel (DC/AC) | 100 % Kupfer | keine Änderung | 80 % Kupfer, 20 % Aluminium | keine Änderung |
| Kabel Mittelspannung | 100 % Kupfer | keine Änderung | 20 % Kupfer, 80 % Aluminium | keine Änderung |
| P: Nennleistung der PV-Module A: PV-Modulfläche (Außenabmessungen) * Erwartete Leistung aufgrund von Wirkungsgradsteigerungen | | | | |

7.2 Erläuterungen zur Darstellung der Ergebnisse

Für die Auswertung der zu vergleichenden Szenarien werden Darstellungen verwendet, wie in Abbildung 5 erläutert.

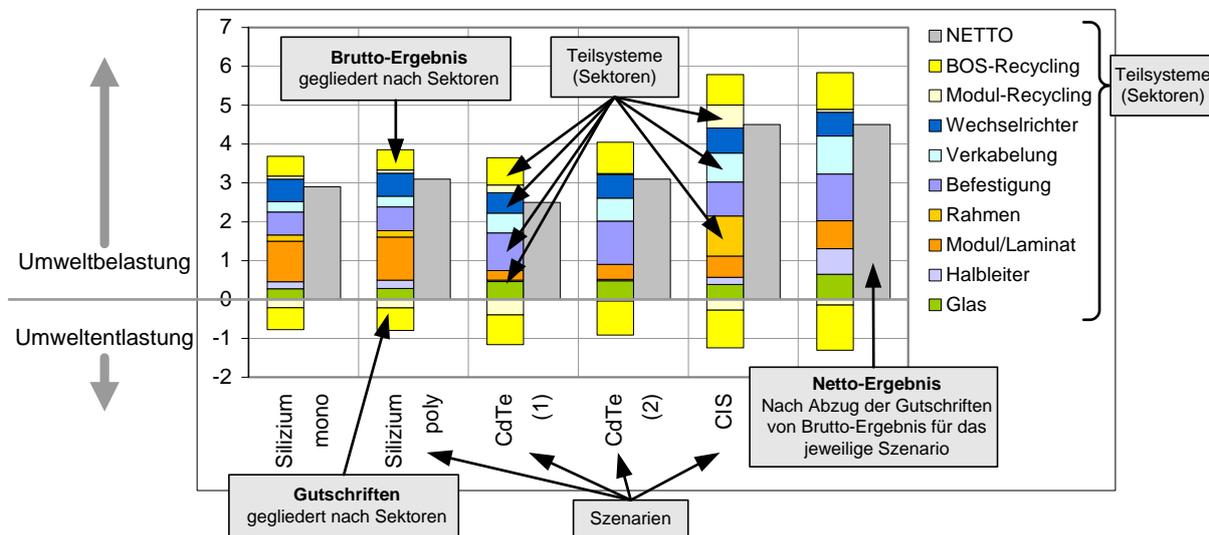


Abbildung 5: Erläuterung der graphischen Darstellung zur Bewertung der Beiträge der untersuchten Szenarien zu den betrachteten Wirkungskategorien und den Einzelparametern

Die ökobilanziellen Betrachtung liefert drei Ergebnissätze. Die jeweils linken Balken der Abbildung 5 zeigen zum einen die Brutto-Aufwandsergebnisse (Umweltbelastungen – Balken nach oben) und zum anderen die Gutschriften (Umweltentlastungen – Balken nach unten). Die sektorale Darstellung in farblich unterteilten Abschnitten erlaubt es, die Teilsysteme (Sektoren) mit relevanten Beiträgen zum Gesamtergebnis zu identifizieren.

1. Die PV-Module setzen sich dabei aus folgenden Sektoren zusammen:
 - a) Glas = Herstellungsprozess aus Rohstoffen
 - b) Halbleiter = Herstellungsprozess aus Rohstoffen
 - c) Modul/Laminat = Solarmodul/Laminat-Fertigung mit Vorketten für Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffe, Energieverbrauch sowie Prozessemissionen
 - d) Rahmen = Herstellungsprozess aus Rohstoffen

Die Summe der oben aufgeführten Positionen entspricht somit den Produktionsaufwendungen für die Solarmodule bzw. Solarlamine. Aus Herstellersicht also die Umweltbelastungen, für die diese direkt verantwortlich zeichnen (analog der Betrachtungsweise in verschiedenen Hersteller-Bilanzierungen). Die Aufwendungen für das BOS stellen aus PV-Modul-Herstellersicht indirekte Umweltbelastungen dar.

2. Die Aufwendungen für das BOS setzt sich folgendermaßen zusammen:
 - a) Befestigung = Rohstoffbereitstellung- und Herstellungsaufwand für Dachhaken, Trägerprofile, Modulklemmen und Schrauben; für Freiflächenanlagen zudem Pfosten, Fundamente und Einfriedung

- b) Verkabelung = Rohstoffbereitstellungs- und Herstellungsaufwand für Gleich-, Wechsel-, und Mittelspannungskabel
 - c) Wechselrichter = Rohstoffbereitstellungs- und Herstellungsaufwand für Wechselrichter; für Freiflächenanlagen zudem für Transformatoren
3. Für das Recycling wird nach Modul- und BOS-Bauteilen unterschieden (siehe 1. und 2.) und es werden sowohl die
- a) Aufwendungen der Aufbereitungsprozesse als auch
 - b) die resultierenden Gutschriften
- dargestellt.

Aus der Verrechnung der Umweltbelastungen und -entlastungen resultiert das Netto-Ergebnis für das betrachtete Szenario, das in Abbildung 5 jeweils im rechten (grauen) Balken dargestellt ist. Es zeigt an, ob die Umwelt durch den Beitrag des Szenarios insgesamt belastet (Balken nach oben) oder entlastet (Balken nach unten) wird.

Im Folgenden werden alle Ergebnisse anhand der Darstellung der Ökologie-Index Punkte, normiert auf eine GWh produzierten PV-Strom, vorgestellt und diskutiert. Der Ökologie-Index ergibt sich durch Aggregation aller sieben analysierten Einzel-Wirkungskategorien (Tabelle 1). Die Ergebnisse hierzu sind dem Anhang B zu entnehmen.

7.3 Vergleich Si-basierte PV-Anlagen

7.3.1 Technologie 2012 und Recyclingszenarien

Im Folgenden werden die Umweltwirkungen aus Herstellung, Nutzung und Recycling Si-basierter PV-Systeme (mono und multikristallin) für das Szenario 2012 dargestellt. Die Hersteller verfügen über Anlagen mit einer Kapazität von über 500 MWp. Dabei sind für den Lebenswegabschnitt Recycling die in Kapitel 6 beschriebenen beiden Optionen Status quo-Recycling (Rec.SQ) und stofflich hochwertiges Recycling (Rec.opt) gegenübergestellt.

Abbildung 6 zeigt für die Si-basierten PV-Systeme den Ökologie-Index als umweltbezogenes Gesamtergebnis bezogen auf die Herstellung einer GWh Strom im Anwendungsfall Aufdach-Privat.

Der Ökologie-Index liegt im Szenario mit Status quo-Recycling (Rec.SQ) bei 2,5 Ökologie-Index Punkten für Silizium mono und 2,6 Ökologie-Index Punkten für Silizium multi. Bei stofflich hochwertigem Recycling (Rec.opt) reduziert sich die Gesamtumweltwirkung bei Silizium mono auf 2,3 Ökologie-Index Punkte bzw. bei Silizium multi auf 2,4 Ökologie-Index Punkte.

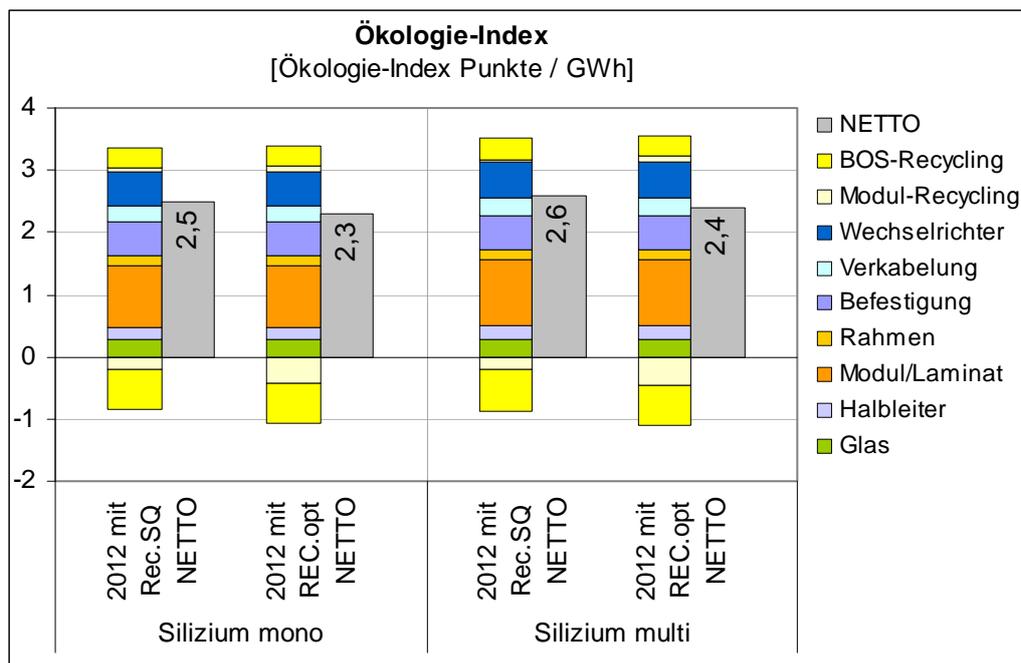


Abbildung 6: Beiträge der Sektoren zum Ökologie-Index der Szenarien Silizium mono und Silizium multi (Modultyp: Silizium, Anwendungsfall: Aufdach-Privat)

Abbildung 6 zeigt, dass mit Blick auf die Umweltwirkung nur geringfügige Unterschiede zwischen den Si-basierten Technologien bestehen. Stofflich hochwertiges Recycling bietet gegenüber Status quo-Recycling für beide Si-Technologien das Potenzial die Gesamtumweltwirkung um ca. 8 % zu verringern.

7.3.2 Kurz- und mittelfristige Entwicklungen in Effizienz und Wirkungsgrad

Dieses Kapitel analysiert zum einen, welche Umwelterfolge Si-basierte PV-Systeme durch Effizienzsteigerungen im Zeitraum von 2011 bis 2012 erzielt haben. Darüber hinaus wird betrachtet, welche Verbesserungen mittelfristig in den nächsten fünf Jahren für Si-basierte PV-Systeme zu erwarten sind (vergleiche Tabelle 6). Das Szenario Effizienz beschreibt dabei beispielsweise die Einsparung von Rohstoffen bei der Herstellung von Modulen und dem BOS. Das Szenario Wirkungsgrad beschreibt die zu erwartende Steigerung des Wirkungsgrades der hergestellten Module. Die Entwicklung der betrachteten Technologien ist anhand des Anwendungsfalls Aufdach-Privat dargestellt.

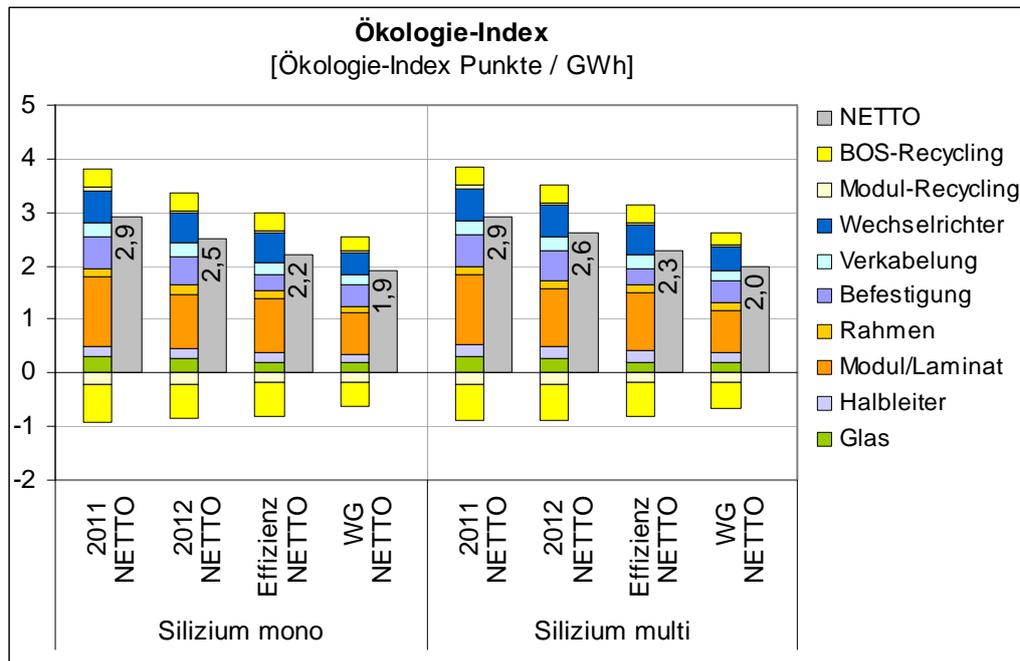


Abbildung 7: Beiträge der Sektoren zum Ökologie-Index der Szenarien 2011, 2012, Effizienz- und Wirkungsgrad für mono- und multikristalline Module (Modultyp: Silizium, Anwendungsfall: Aufdach-Privat)

Abbildung 7 zeigt, dass die bereits im Zeitraum 2011/2012 umgesetzten Effizienzsteigerungen und besonders die mittelfristigen Entwicklungen erhebliche Potenziale zur Reduktion von Umweltwirkungen bieten. So konnten im Zeitraum 2011/2012 die Gesamtumweltwirkungen um durchschnittlich ca. 12 % verringert werden.

Die mittelfristige Entwicklung bietet das Potenzial, die Umweltwirkungen gegenüber dem Jahr 2011 um über ein Drittel zu reduzieren. Die Potenziale liegen dabei im Wesentlichen bei der Modulherstellung (verbesserte Fertigungstechnologie, Erhöhung des Wirkungsgrades, Materialeinsparung und Substitution).

7.3.3 Anwendungsfälle

Abbildung 8 zeigt die Umweltwirkung quantifiziert als Ökologie-Index von Si-basierten PV-Systemen in den Anwendungsfällen Aufdach-Privat, Großdach-Industriell und Freiflächenanlage.

Für Silizium mono bzw. multi beträgt der Ökologie-Index im Szenario Aufdach-Privat 2,5 bzw. 2,6 Ökologie-Index Punkte. Für das Szenario Großdach-Industriell liegen die Werte bei 2,0 und für das Szenario Freiflächenanlage bei 2,8 bzw. 2,9 Ökologie-Index Punkten. Die verschiedenen Anwendungsfälle weisen somit erhebliche Unterschiede in der umweltbezogenen Wirkung auf.

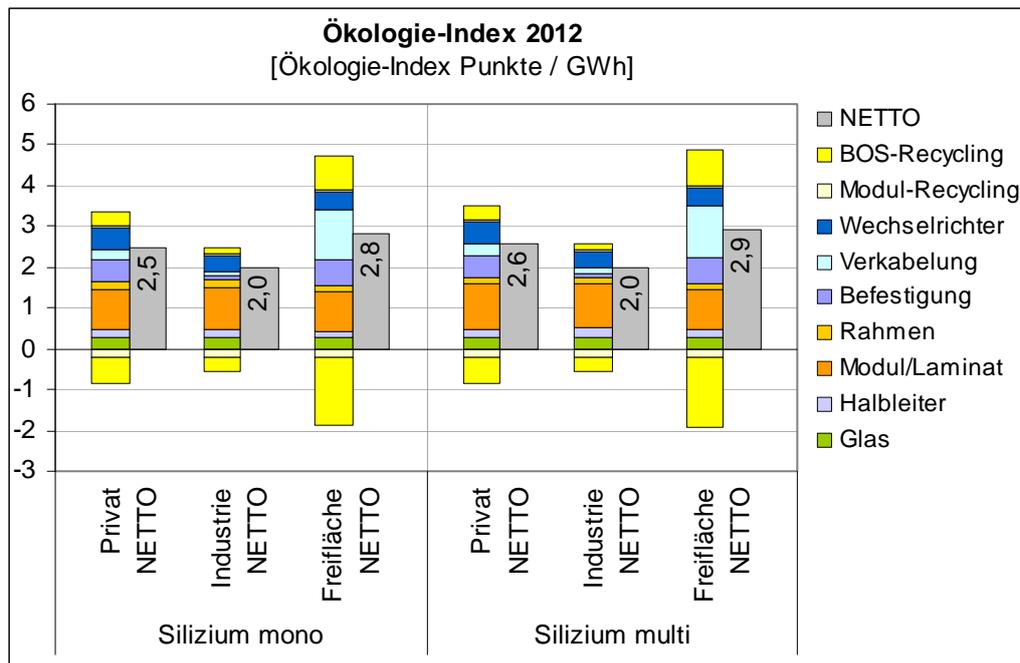


Abbildung 8: Beiträge der Sektoren zum Ökologie-Index der Szenarien; Vergleich der Technologie-Anwendungsfälle für mono- und multikristalline Module (Modultyp: Silizium, Anwendungsfall: Aufdach-Privat, Großdach-Industriell und Freiflächenanlage)

Der Vergleich zeigt, dass das Szenario Großdach-Industriell für beide Si-basierten Technologien den geringsten Ökologie-Index und damit die geringsten Umweltbelastungen aufweist. Das Szenario Aufdach-Privat ist mit höheren Umweltbelastungen verbunden, die aus höheren Beiträgen der Sektoren Befestigung und Verkabelung resultieren.

Das Szenario Freiflächenanlage weist eine Verdopplung der Umweltbelastungen im Vergleich zum Großdach-Industriell auf. Die höhere Umweltwirkung resultiert aus deutlich größeren Materialmengen, die für Befestigungskomponenten und Verkabelung bei Freiflächenanlagen (Sektoren Befestigung und Verkabelung) benötigt werden. Dies schlägt sich besonders in den in den Wirkungskategorien Ressourcenbeanspruchung und Humantoxizität nieder. Mit Blick auf die Humantoxizität hat bei Freiflächenanlagen der massive Verbrauch an verzinktem Stahl für das BOS erheblichen Einfluss.

7.4 Vergleich CdTe PV-Anlagen

7.4.1 Technologie 2012 und Recyclingszenarien

Im Folgenden werden die Umweltwirkungen aus Herstellung, Nutzung und Recycling von CdTe-Systemen für das Szenario 2012 dargestellt. Die Hersteller verfügen über Anlagen mit einer Kapazität von >500 MWp CdTe (1) und >50 MWp CdTe (2). Dabei sind für den Lebenswegabschnitt des Recyclings die in Kapitel 6 beschriebenen Optionen Status quo-Recycling (Rec.SQ) und stofflich hochwertiges Recycling (Rec.opt) gegenübergestellt.

Abbildung 9 zeigt für die CdTe-PV-Systeme den Ökologie-Index als umweltbezogenes Gesamtergebnis bezogen auf die Herstellung einer GWh Strom im Anwendungsfall Aufdach-Privat.

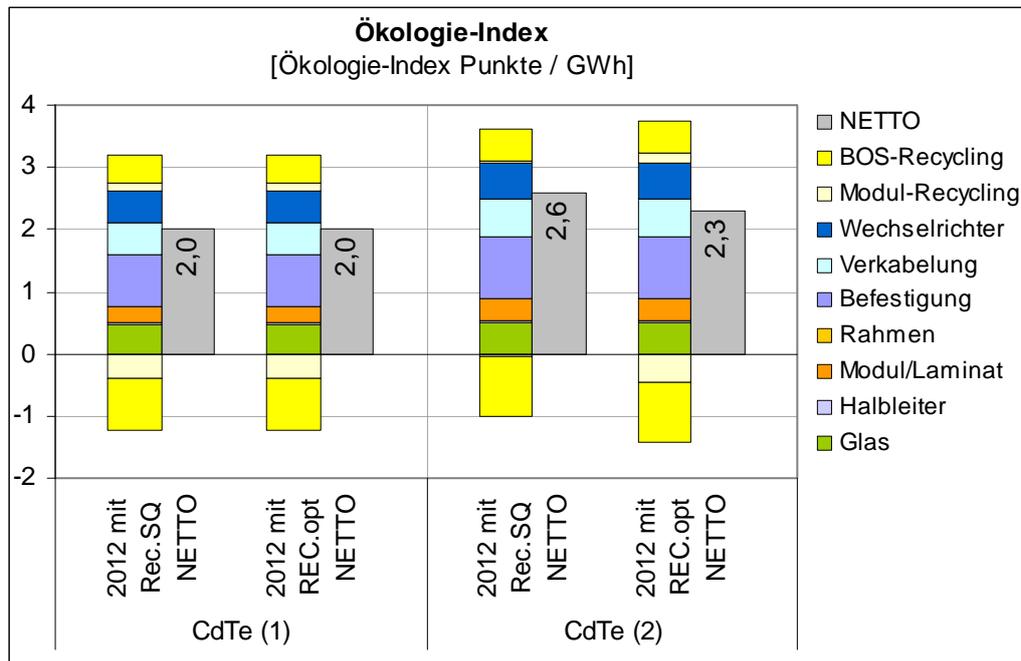


Abbildung 9: Beiträge der Sektoren zum Ökologie-Index der Szenarien CdTe (1) und CdTe (2) (Modultyp: CdTe, Anwendungsfall: Aufdach-Privat)

Für CdTe (1) sind beide Recyclingszenarien mit identischen Umweltwirkungen verbunden. Da der CdTe-Modulhersteller, dessen Angaben dem System CdTe (1) zu Grunde liegen, bereits ein stofflich hochwertiges Recyclingverfahren realisiert hat, ist auch im Szenario Rec.SQ ein stofflich hochwertiges Recycling, das über die Quotenvorgaben der WEEE hinausgeht, zu betrachten (vergleiche dazu auch Kapitel 6.2.1).

Bei Vergleich der Rec.SQ Szenarien beträgt der Ökologie-Index für CdTe (1) 2,0 und für CdTe (2) 2,6 Ökologie-Index Punkte. Der Unterschied im Ökologie-Index von ca. 23 % zwischen den beiden CdTe-Systemen ist zum einem auf den unterschiedlichen Stand der technologischen Entwicklung bei der Modulherstellung zurückzuführen. CdTe (1) basiert auf Angaben eines Herstellers mit einer gefestigten Produktion, während CdTe (2) die Situation eines mittelständischen Herstellers widerspiegelt, der eine neue Produktionslinie aufbaut. Darüber hinaus resultieren die Unterschiede in den Umweltlasten aus dem realisierten stofflichen Modulrecycling für CdTe (1). Bei stofflich hochwertigem Recycling auch für CdTe (2) (Szenario Rec.opt) reduziert sich die Gesamtumweltwirkung im Vergleich zum Szenario Rec.SQ um 0,3 Ökologie-Index Punkte bzw. ca. 12 %.

7.4.2 Kurz- und mittelfristige Entwicklungen in Effizienz und Wirkungsgrad

Dieses Kapitel zeigt zum einen, welche Umwelterfolge CdTe-PV-Systeme durch Effizienzsteigerungen im Zeitraum von 2011 bis 2012 erzielt haben. Darüber hinaus wird betrachtet, welche Verbesserungen mittelfristig in den nächsten fünf Jahren für CdTe-PV-Systeme zu erwarten sind (vergleiche

Tabelle 6). Das Szenario Effizienz beschreibt dabei beispielsweise die Einsparung von Rohstoffen bei der Herstellung von Modulen und dem BOS. Das Szenario Wirkungsgrad beschreibt die zu erwartende Steigerungen des Wirkungsgrades der hergestellten Module. Die Entwicklung der betrachteten Technologien ist anhand des Anwendungsfalls Aufdach-Privat dargestellt.

Abbildung 10 zeigt, dass die bereits im Zeitraum 2011/12 umgesetzten Effizienzsteigerungen und besonders die mittelfristigen Entwicklungen erhebliche Potenziale zur Reduktion von Umweltwirkungen bieten. So konnten im Zeitraum 2011/12 die Gesamtumweltwirkungen um 9 % bei CdTe (1) und 10 % bei CdTe (2) verringert werden. Mittelfristig zu realisierende Entwicklungen bieten das Potenzial, die Umweltwirkungen gegenüber dem Jahr 2011 um 32 % bei CdTe (1) bzw. 34 % bei CdTe (2) zu reduzieren. Die Potenziale liegen dabei bei der Modulherstellung (verbesserte Fertigungstechnologie und -effizienz, Erhöhung des Wirkungsgrades, Materialeinsparung und Substitution) und der Substitution von Material wie z. B. Kupfer oder Edelstahl im BOS.

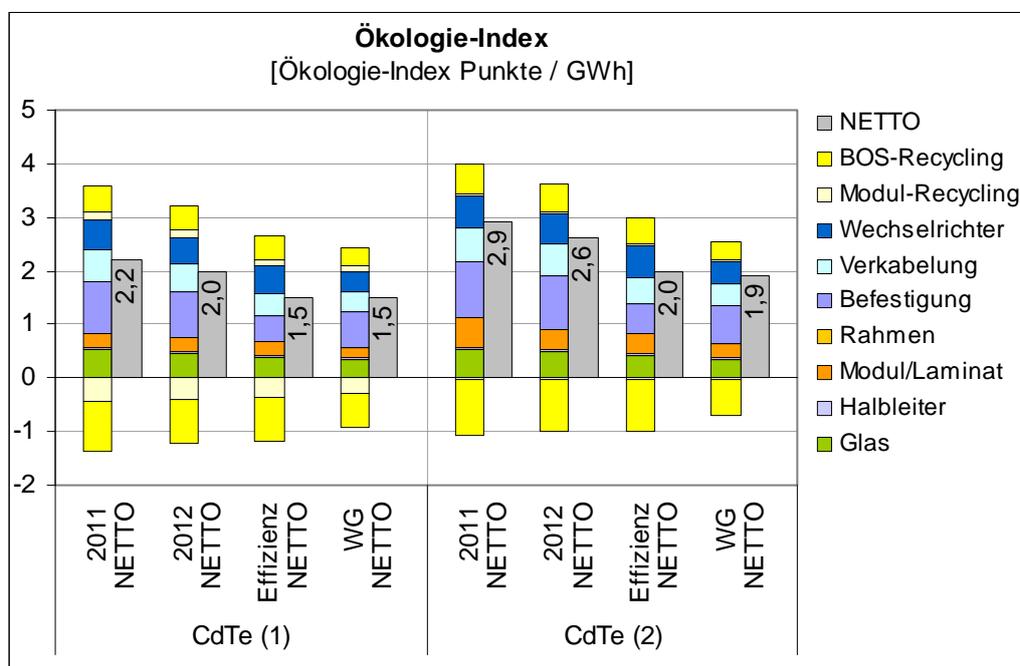


Abbildung 10: Beiträge der Sektoren zum Ökologie-Index der Szenarien 2011, 2012, Effizienz- und Wirkungsgrad für CdTe-Systeme (Modultyp: CdTe, Anwendungsfall: Aufdach-Privat)

7.4.3 Anwendungsfälle

Abbildung 11 zeigt die Umweltwirkungen quantifiziert als Ökologie-Index von CdTe-PV-Systemen in den Anwendungsfällen Aufdach-Privat, Großdach-Industriell und Freiflächenanlage. Der Ökologie-Index 2012 für CdTe (1) im Szenario Aufdach-Privat liegt bei 2,0 Ökologie-Index Punkten, für das Szenario Großdach-Industriell bei 1,4 und für das Szenario Freiflächenanlage bei 2,5. Der Ökologie-Index 2012 für CdTe (2) kommt bei etwas höheren Umweltbelastungen zur gleichen Rangfolge der Szenarien.

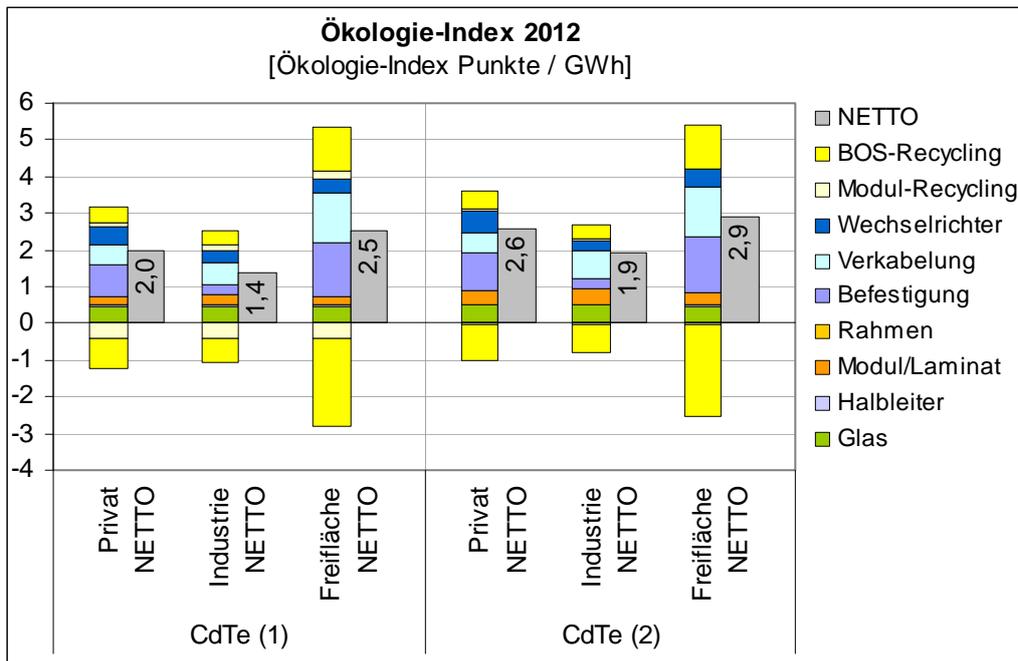


Abbildung 11: Beiträge der Sektoren zum Ökologie-Index der Szenarien; Vergleich der Technologie-Anwendungsfälle für CdTe (1) und CdTe (2) (Modultyp: CdTe, Anwendungsfall: Aufdach-Privat, Großdach-Industriell und Freiflächenanlage)

Der Vergleich zeigt, dass das Szenario Großdach-Industriell für beide CdTe-basierten Systeme den geringsten Ökologie-Index und damit die geringsten Gesamtumweltwirkung aufweist. Das Szenario Aufdach-Privat ist mit höheren Umweltbelastungen verbunden, die aus höheren Beiträgen der Sektoren Befestigung, Wechselrichter und BOS-Recycling resultieren.

Das Szenario Freiflächenanlage weist eine zwischen 34 % und 44 % Steigerung der Gesamtumweltwirkung im Vergleich zum Szenario Großdach-Industriell auf. Die höhere Umweltlast resultiert aus deutlich größeren Materialmengen, die für Befestigungskomponenten und Verkabelung bei Freiflächenanlagen benötigt werden.

7.5 Vergleich CIS PV-Anlagen

7.5.1 Technologie 2012 und Recyclingszenarien

Im Folgenden werden die Umweltwirkungen aus Herstellung, Nutzung und Recycling von CIS-PV-Systemen dargestellt. Für CIS (1) wird das Szenario 2012 betrachtet, für CIS (2) liegen die Daten nur für das Szenario 2011 vor. Die Hersteller verfügen über Anlagen mit einer Kapazität von >100 MWp CIS (1) und <25 MWp CIS (2). Dabei sind für den Lebenswegabschnitt des Recyclings die in Kapitel 6 beschriebenen Szenarien Status quo-Recycling (Rec.SQ) und stofflich hochwertiges Recycling (Rec.opt) gegenübergestellt.

Abbildung 12 zeigt für die CIS-PV-Systeme den Ökologie-Index als umweltbezogenes Gesamtergebnis bezogen auf die Herstellung einer GWh Strom im Anwendungsfall Aufdach-Privat. Die zugrundeliegenden Ertragsdaten für CIS (1) basieren – wie grundsätzlich für alle Szenarien 2012 – auf einer Hochrechnung der Energieertragssimulation 2011.

Der Ökologie-Index beträgt im Szenario mit Status quo-Recycling (Rec.SQ) 3,0 Ökologie-Index Punkte für CIS (1) und 3,4 für CIS (2). Die höheren Gutschriften aus dem Modul-Recycling bei CIS (1) resultieren aus der Rückführung der verwendeten rückseitigen Befestigungsschienen. CIS (2) ist dagegen ein rahmenloses Laminat. Bei stofflich hochwertigem Recycling (Rec.opt) reduziert sich die Gesamtumweltwirkung für CIS (1) um 17 % auf 2,5 Ökologie-Index Punkte bzw. bei CIS (2) um 18 % auf 2,8 Ökologie-Index Punkte.

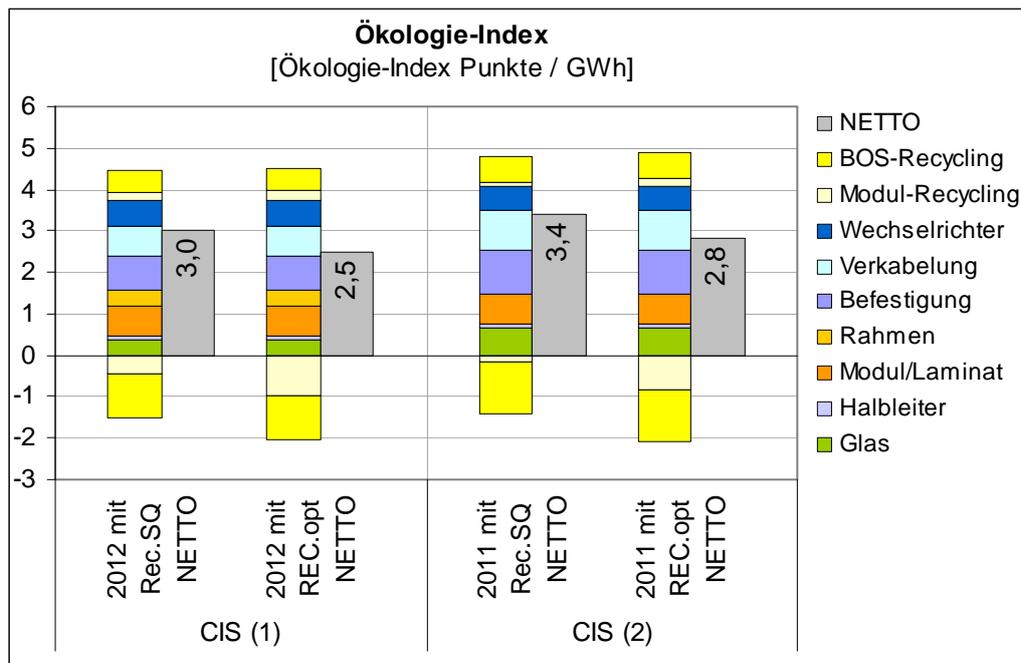


Abbildung 12: Beiträge der Sektoren zum Ökologie-Index der Szenarien CIS (1) und CIS (2) (Modultyp: CIS, Anwendungsfall: Aufdach-Privat)

Abbildung 12 zeigt, dass bei Betrachtung der gleichen Recyclingszenarien mit Blick auf die Umweltwirkung absolut nur geringfügige Unterschiede zwischen CIS (1) und CIS (2) bestehen. Die sektorale Zusammensetzung der Umweltwirkung weist allerdings Unterschiede auf. Bei CIS (1) führten die für das Modul verwendeten Befestigungsschienen aus normverzinktem Stahl (Sektor Rahmen) im Vergleich zu CIS (2) zu zusätzlichen Umweltbelastungen. Dagegen hat bei CIS (2) der Sektor Glas im Vergleich zu CIS (1) einen deutlich höheren Beitrag zu den Umweltbelastungen.

7.5.2 Kurz- und mittelfristige Entwicklungen in Effizienz und Wirkungsgrad

Dieses Kapitel zeigt zum einen, welche Umwelterfolge CIS-PV-Systeme durch Effizienzsteigerungen im Zeitraum von 2011 bis 2012 erzielt haben. Darüber hinaus wird betrachtet, welche Verbesserungen mittelfristig in den nächsten fünf Jahren für CIS-PV-Systeme zu erwarten sind (vergleiche

Tabelle 6). Das Szenario Effizienz beschreibt dabei beispielsweise die Einsparung von Rohstoffen bei der Herstellung von Modulen und dem BOS. Das Szenario Wirkungsgrad beschreibt die zu erwartenden Steigerungen des Wirkungsgrades der hergestellten Module. Die Entwicklung der betrachteten Technologien ist anhand des Anwendungsfalls Aufdach-Privat dargestellt. Entsprechende Daten zur Analyse der Entwicklung stehen nur für das PV-System CIS (1) zur Verfügung.

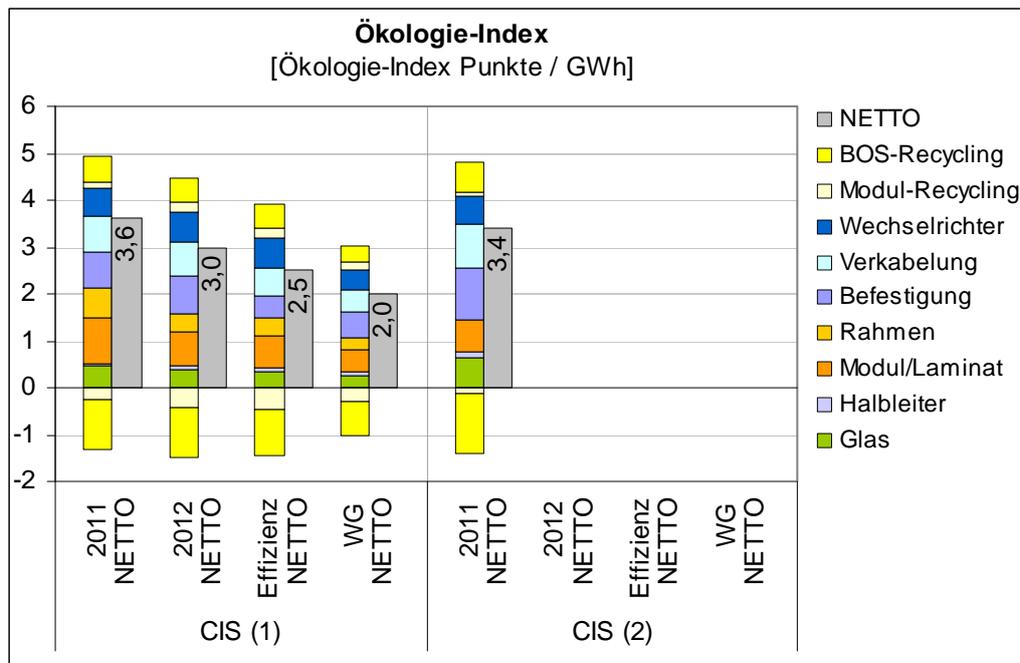


Abbildung 13: Beiträge der Sektoren zum Ökologie-Index der Szenarien 2011, 2012, Effizienz- und Wirkungsgrad für CIS (1)-Systeme und zum Szenario 2011 für CIS (2)-Systeme (Modultyp: CIS, Anwendungsfall: Aufdach-Privat)

Der Ökologie-Index im Szenario 2011 liegt für CIS (1) bei 3,6 Ökologie-Index Punkten und im Szenario 2012 bei 3,0. Durch die neue Produktgestaltung und eine höhere Energieeffizienz in der Produktion (Szenario 2012) konnten die Umweltbelastungen aus der Modulherstellung (Sektor Modul/Laminat), der Halbleiterherstellung und Glas deutlich reduziert werden.

Abbildung 13 zeigt, dass mittelfristig zu realisierende Entwicklungen die Möglichkeit bieten, die Umweltwirkungen von CIS (1) gegenüber dem Jahr 2012 um 30% (Szenario Effizienz) bzw. 44 % (Szenario Wirkungsgrad-Entwicklung) zu reduzieren. Die wesentlichen Potenziale liegen damit bei der erwarteten Erhöhung der Modulwirkungsgrade.

7.5.3 Anwendungsfälle

Abbildung 14 zeigt die Umweltwirkungen quantifiziert als Ökologie-Index von CIS-PV-Systemen in den Anwendungsfällen Aufdach-Privat und Großdach-Industriell.

Der Ökologie-Index 2012 für CIS (1) im Szenario Aufdach-Privat liegt bei 3,0 Ökologie-Index Punkten und für das Szenario Großdach-Industriell bei 2,3. Der Ökologie-Index 2011 für CIS (2) kommt zur gleichen Rangfolge der Szenarien.

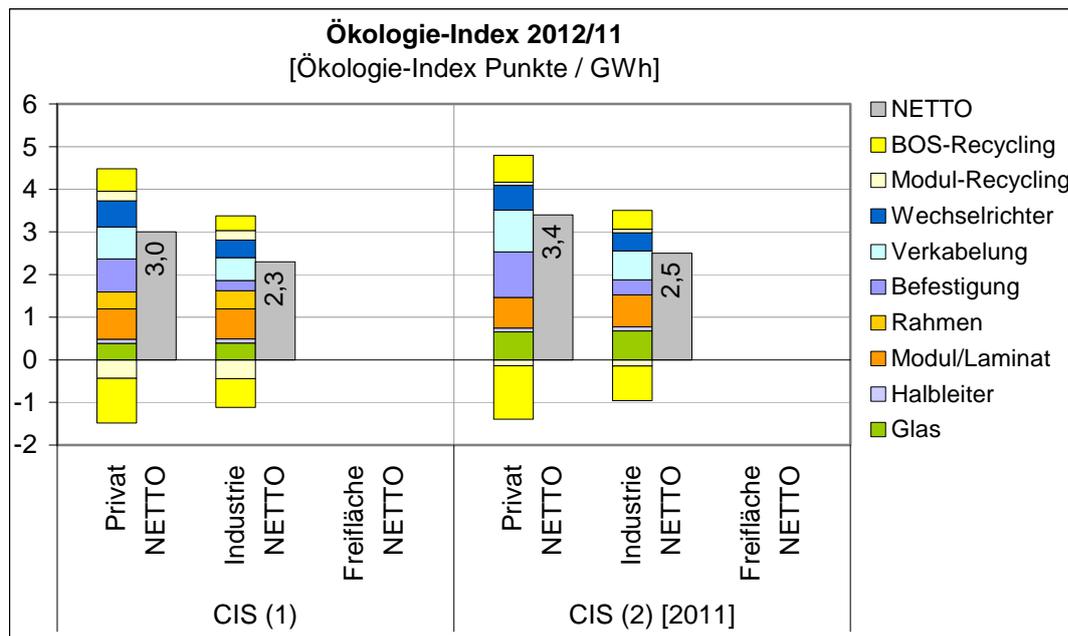


Abbildung 14: Beiträge der Sektoren zum Ökologie-Index der Szenarien; Vergleich der Technologie-Anwendungsfälle für CIS (1) und CIS (2) (Modultyp: CIS, Anwendungsfall: Aufdach-Privat und Großdach-Industriell)

Der Vergleich zeigt, dass das Szenario Großdach-Industriell für beide CIS-basierte Systeme den geringsten Ökologie-Index und damit die geringste Umweltbelastung aufweist. Das Szenario Aufdach-Privat ist mit höheren Umweltbelastungen verbunden, die aus höheren Beiträgen der Sektoren Befestigung, Wechselrichter und BOS-Recycling resultieren.

7.6 Gesamtschau der PV-Technologien

Die bisher für die PV-Technologien getrennt betrachteten Ergebnisse werden im Folgenden in einer Gesamtschau der Techniken dargestellt. Zur Relevanz der aufgezeigten Ergebnisunterschiede der einzelnen PV-Technologien zeigt Abbildung 15 eine Gegenüberstellung der Stromerzeugung mit PV-Systemen am Beispiel Aufdach-Privat im Vergleich zur Stromerzeugung aus fossilen Energieträgern (Abbildung 15).¹²

¹² Datengrundlage: jeweils Eco-Invent-Ergebnisdatensätze „Strom, ab Kraftwerk [DE]“ [ECOI 2010]

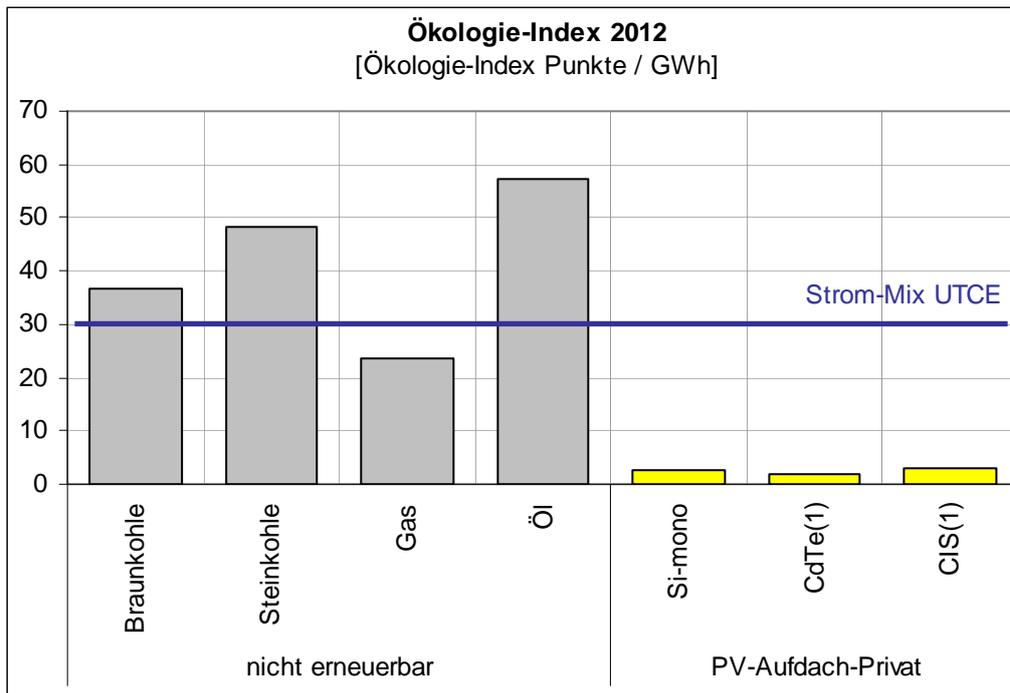


Abbildung 15: Ökologie-Index Punkte für die Stromerzeugung aus den drei PV-Technologien Si-mono, CdTe (1) und CIS (1) im Anwendungsfall Aufdach-Privat sowie prinzipielle Einordnung im Vergleich zur Stromerzeugung aus fossilen Quellen (Braunkohle, Steinkohle, Gas und Öl)

Betrachtet man alle Anwendungsfälle, ist die mit der Stromerzeugung aus Photovoltaik verbundene Gesamtumweltwirkung im Vergleich zur durchschnittlichen Stromerzeugung mit fossilen Energieträgern um den Faktor 10 bis 20 geringer. Die in den folgenden Kapiteln ausgewiesenen Unterschiede sind vor diesem Hintergrund zu interpretieren. Bezüglich der aufgezeigten Relation muss jedoch angemerkt werden, dass sich die verglichenen Produkte „Strom aus Photovoltaik“ und „Strom aus nicht regenerativen Energien“ abseits der ökobilanziellen Bewertung in einigen Merkmalen unterscheiden. Als Beispiel sei die mit derzeitigen Mitteln noch eingeschränkte Regelbarkeit der Photovoltaik angeführt.

7.6.1 Umweltwirkungen der PV-Technologien – 2012

Dieses Kapitel beschreibt die Gesamtumweltwirkung aller untersuchten PV-Technologien für das Szenario 2012 in Bezug auf Herstellung, Nutzung und Recycling. Für das Recycling am Ende des Lebenszyklus werden für die Darstellung sowohl die Option Status quo¹³ (Rec.SQ), als auch die Option eines hochwertigen Recycling (Rec.opt) gewählt. Die betrachteten Technologien werden anhand des Anwendungsfalls Aufdach-Privat dargestellt.

Die Höhe des Ökologie-Indexes für alle drei Technologien zeigt die Abbildung 16. Es sei angemerkt, dass die Zusammenschau der Technologien auf der Herstellung in Produktionsanlagen mit sehr unterschiedlicher Produktionskapazität (<25 MWp bis >500 MWp) und technologischer Reife beruht. Die unterschiedlichen Gesamtumweltwirkungen werden wesentlich durch die Skaleneffekte in der Produktion mit beeinflusst.

¹³ Ausnahme CdTe (1): da Modul-Recyclinganlage bereits in Betrieb, kann hier ein stofflich hochwertiges Recycling angenommen werden

Für die Recycling-Option Status quo (oberer Teil der Abbildung) liegt der Ökologie-Index für Silizium mono bzw. multi mit gut 2,5, für CdTe (1) und (2) zwischen 2,0 und 2,6 sowie für die CIS-Technologien zwischen 3,0 und 3,4 Ökologie-Index Punkten nahe beisammen.

Die Umweltbelastungen für Silizium mono bzw. multi sind im Wesentlichen auf den vergleichsweise höheren energetischen Aufwand für die Halbleiterproduktion und vor allem die Halbleiterverarbeitung in der Modulfertigung (Anteil des Sektors Modul: 30 %) zurückzuführen. Zusätzlich sind die Si-basierten Module Teil gerahmt. Insgesamt sind bei Si-basierten PV-Systemen ca. 49 % der Umweltbelastungen dem Sektor Modulherstellung (umfasst alle Schritte der Rohstoff-, Wafer-, Zell- und Modulherstellung inklusive deren Vorprodukte) zuzurechnen.

Beide Dünnschicht-Technologien – Szenarien CdTe und CIS – weisen dagegen bei wesentlich geringeren Belastungen für die Modulfertigung höhere Anteile für Glas und vor allem des BOS auf. Für die Szenarien CdTe (1) und (2) liegt der Anteil der PV-Module am Ökologie-Index bei rund 23 %. Die Belastungen durch das BOS nehmen ca. 60 % ein. Das CIS (1) Modul wird, ähnlich dem Befestigungsrahmen bei den Silizium-Modulen, mit rückseitig angebrachten Halteschienen geliefert (Sektor Rahmen). Die PV-Modul-Herstellung beansprucht für beide CIS-Technologien zwischen 30 und 35 % der Umweltbelastungen.

Für alle PV-Technologien reduzieren sich die Umweltbelastungen durch die Status quo Recycling-Option (Rec.SQ) um 0,8 bis 1,5 Ökologie-Index Punkte. Dies entspricht einer Reduktion der Umweltwirkungen durch das Recycling von etwa 25 % für Silizium mono und multi, von über 28 % für CdTe (2) und bis zu 29 und 33 % für CIS (2) und CIS (1). Durch bereits etabliertes, umfassend stoffliches CdTe-Recycling für CdTe (1) liegt der Anteil hier bei 38 %.

Die positive Umweltwirkung der Umsetzung eines hochwertigen Recyclings für alle PV-Technologien verdeutlicht der untere Teil der Abbildung 16. Bei der Recycling-Option optimal (Rec.opt) reduzieren sich die Umweltbelastungen um 31 % für Silizium mono und multi, um 38 % für CdTe (1) und (2) sowie um 43 bis 45 % für CIS (2) und CIS (1). Die Ergebnisse für den Ökologie-Index gleichen sich dementsprechend für die untersuchten PV-Technologien weiter an und liegen zwischen Werten von 2,0 bis 2,8.

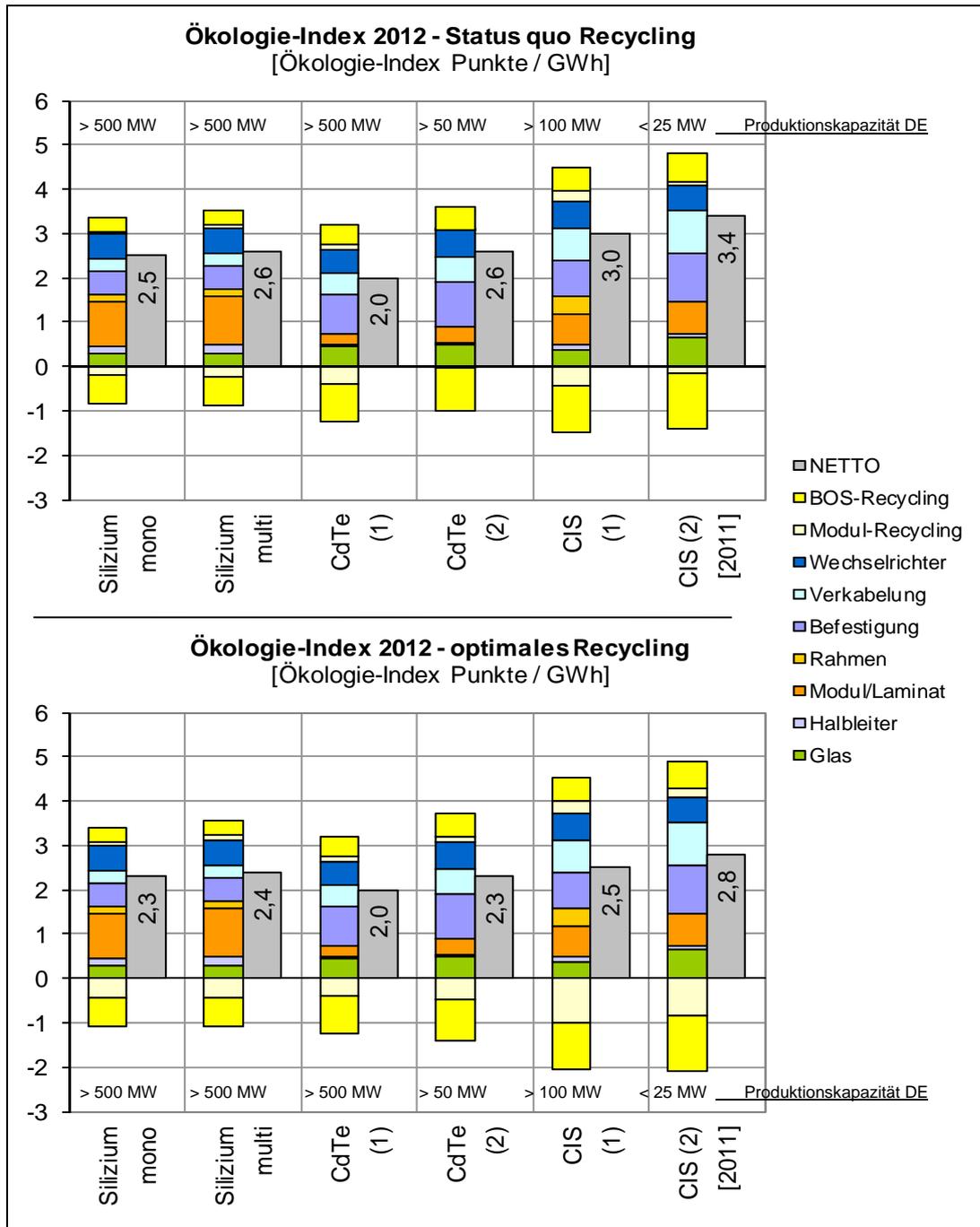


Abbildung 16: Beiträge der Sektoren zum Ökologie-Index der Szenarien 2012 Silizium mono und multi, CdTe (1) und (2) sowie CIS (1) und (2) (Anwendungsfall: Aufdach-Privat); oben: Recycling-Option Status quo; unten: Recycling-Option optimal

Bei der Gegenüberstellung der PV-Technologien im Anwendungsfall Aufdach-Privat zeigt sich:

- Die Unterschiede der Gesamtumweltwirkungen der untersuchten PV-Technologien fallen nur gering aus.
- Die Zusammensetzung des Ökologie-Indexes variiert dabei jedoch. Dies ist auf die grundlegend unterschiedliche Fertigung von Wafer-basierten (siehe Sektoren Halbleiter und Modul) und substratbeschichteten PV-Modulen/Laminaten (siehe Sektor Glas) zurückzuführen.
- Der Wirkungsgrad der PV-Module/Lamine (Leistung pro Fläche) nimmt deutlich Einfluss auf die Bewertung der BOS-Komponenten (Unterkonstruktion, Verkabelung, Wechselrichtergröße pro Fläche) (vgl. Sektoren Befestigung und Verkabelung).
- Zudem wirken sich die unterschiedlichen technischen Entwicklungsstände beim Vergleich zwischen etablierten Herstellern mit einer gefestigten Produktion und mittelständischen Herstellern mit relativ neuen Produktionslinien aus.
- Die deutlichen umweltbezogenen Ergebnisverbesserungen für ein stofflich hochwertiges Recycling weisen das Potenzial aus, das eine erfolgreiche Umsetzung eines integrierten und technologisch hochstehenden Rücknahme- und Recyclingsystems mit sich bringt.

7.6.2 Umweltwirkungen der PV- Technologien – mittelfristige Entwicklung

Analog der Darstellung in Kapitel 7.6.2 (Anlageninstallation in 2012) wird im Folgenden noch die Gesamtschau der PV-Technologien für die Szenarien mit mittelfristiger Wirkungsgrad-Entwicklung (bei gleichbleibenden Fertigungsaufwendungen) gezeigt (Abbildung 18). Im Vergleich zur Betrachtung der Anlageninstallation für 2012 nähern sich nun beinahe alle PV-Technologien einem Ökologie-Index von ca. 2 (Rec.SQ) bzw. 1,7 Ökologie-Index Punkten (Rec.opt) an. Für CdTe (1) ergibt sich für beide Recycling-Optionen ein Ökologie-Index von 1,5 Punkten, was wiederum durch den bereits in der Status quo-Betrachtung etablierten hochwertigen Recyclingprozess zu erklären ist.

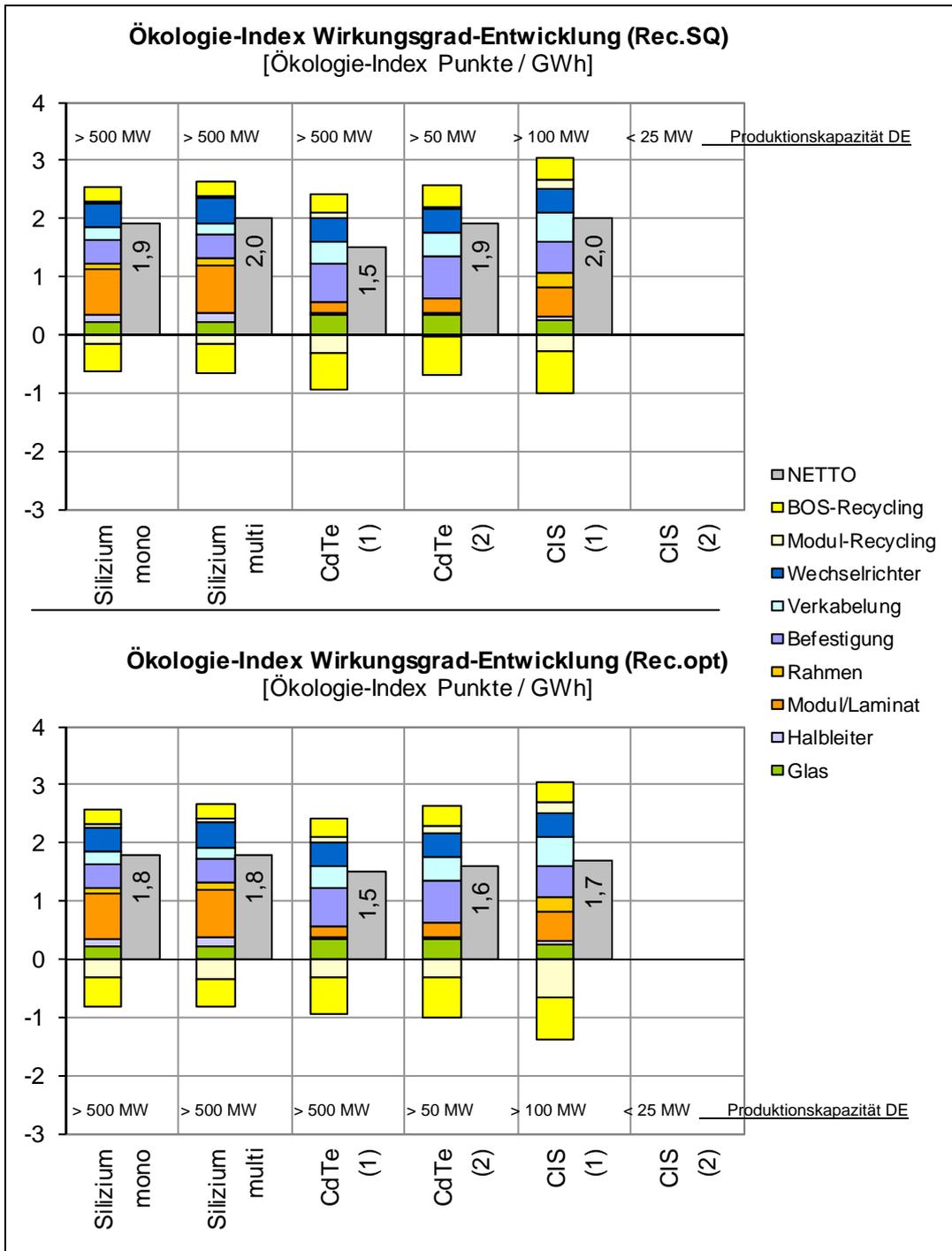


Abbildung 17: Beiträge der Sektoren zum Ökologie-Index der Szenarien Mittelfristige Entwicklung Modul-Wirkungsgrad Silizium mono und multi, CdTe (1) und (2) sowie CIS (1) (Anwendungsfall: Aufdach-Privat); oben: Recycling-Option Status quo; unten: Recycling-Option optimal

7.6.3 Ökoeffizienz der Technologien

Die Ökoeffizienzanalyse stellt das Ergebnis der ökobilanziellen Betrachtung für das Szenario 2012 den mit der Erzeugung von Strom aus Photovoltaikanlagen verbundenen Vergütungssätzen laut EEG (Stand: Dezember 2012) gegenüber. Die spezifischen EEG-Vergütungssätze sind in der Tabelle 4 zusammengefasst. Die umweltbezogene Bewertung (Ökologie-Index Punkte) der PV-Technologien im Portfolio entspricht den Ergebnissen aus den Kapiteln 7.3 ff.

Links unten im Portfolio sind Verfahren mit niedriger Ökoeffizienz (hohe Preis- und hohe Ökologie-Indizes, also höhere Umweltbelastungen) zu finden, während Verfahren mit hoher Ökoeffizienz (niedrige Preis- und niedrigere Ökologie-Indizes, also geringere Umweltbelastungen) in Richtung rechts oben aufgetragen werden.

Abbildung 18 zeigt, beispielhaft am Anwendungsfall Aufdach-Privat, nochmals die Aussage der Abbildung 15 als Portfoliodarstellung. Mit Bezug auf die hohen Ökologie-Indizes der Stromerzeugung aus nicht-regenerativen Quellen erscheinen die Ergebnisunterschiede der einzelnen PV-Technologien untereinander marginal. Die Ermittlung der Ökologie-Index Punkte für die Stromerzeugung aus den fossilen Energieträgern Gas, Kohle, Öl erfolgte anhand der jeweiligen Eco-Invent-Ergebnisdatensätze „Strom, ab XYZ-Kraftwerk [DE]“ [ECOI 2010]. Die korrespondierende Einordnung der EEX-Preise¹⁴ lehnt sich an [FfE 2010] an. Die in Kapitel 7.5.3 genannten Einschränkungen bezüglich des Vergleichs der Stromerzeugungstechnologien gelten auch hier. Die Einordnung auf der Preisachse zeigt dabei nur eine Momentaufnahme, da die Einspeisevergütung für PV-Anlagen seit 01.04.2012 monatlich nach unten angepasst wird. Die Angebotspreise für Strom aus nicht erneuerbaren Energien hängen von den jeweilig geltenden Primärenergiepreisen sowie den Preisen für benötigte CO₂-Zertifikate ab.

¹⁴ „Die European Energy Exchange (EEX) [mit Sitz in Leipzig] ist ein Marktplatz für Energie und energienahe Produkte. Die EEX ist mit über 200 Börsenteilnehmern aus derzeit 22 Ländern die führende Energiebörse in Kontinentaleuropa.“ [WIKI 2013]

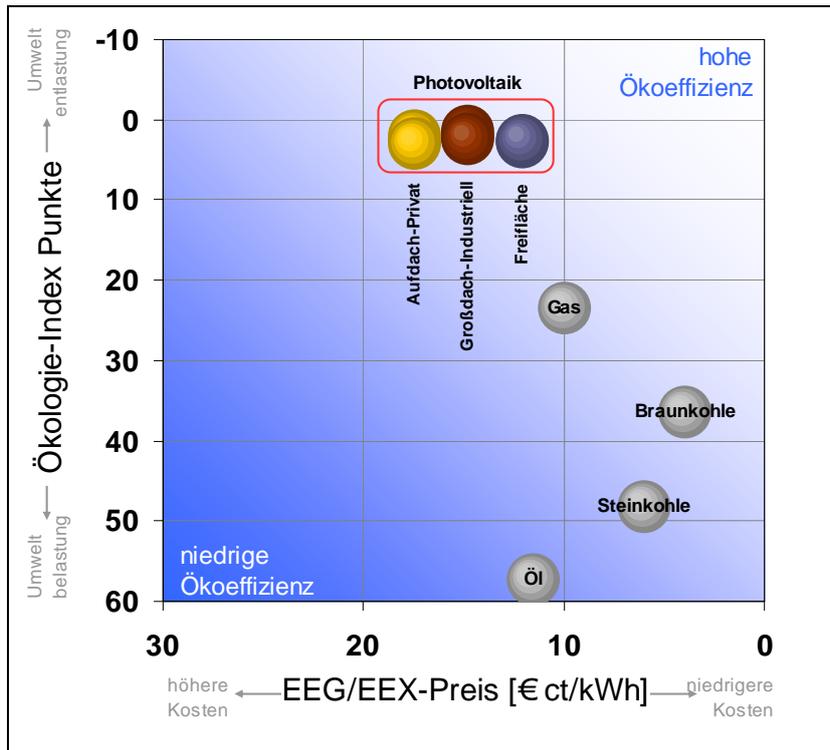


Abbildung 18: Ökoeffizienz-Portfolio für die drei PV-Anwendungsfälle Aufdach-Privat, Großdach-Industriell und Freifläche und prinzipielle Einordnung der Stromerzeugung aus nicht regenerativen Quellen (niedriger Ökologie-Index bedeutet niedrige Umweltbelastungen; hoher Ökologie-Index bedeutet hohe Umweltbelastungen; Kosten-Index: Vergütung von PV-Anlagen nach EEG (12.2012) und EEX-Preise für nicht erneuerbare Energien nach [FFE 2010]). Bezugsinheit: Erzeugung von 1 GWh Strom.

Abbildung 19 veranschaulicht die Detaillergebnisse (siehe rote Umrandung Abbildung 18) für die untersuchten PV-Technologien in allen drei Anwendungsfällen.

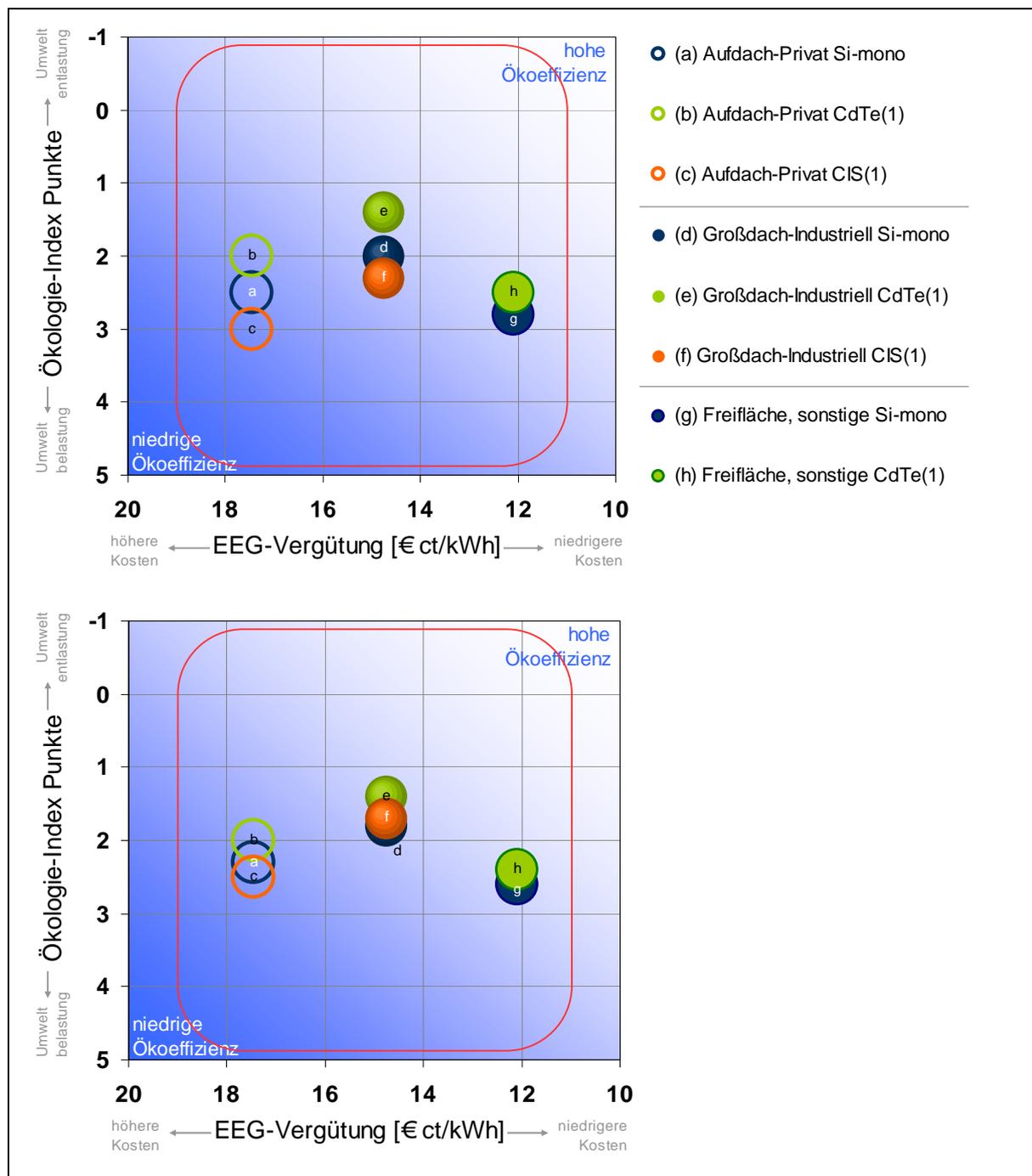


Abbildung 19: Ökoeffizienz-Portfolio für die drei PV-Technologien Si-mono, CdTe (1) und CIS (1) für die Anwendungsfälle Aufdach-Privat, Großdach-Industriell und Freifläche; oben: mit Recycling-Option Status quo; unten: mit Recycling-Option optimal (niedriger Ökologie-Index bedeutet niedrige Umweltbelastungen; hoher Ökologie-Index bedeutet hohe Umweltbelastungen; Kosten-Index: Vergütung von PV-Anlagen nach EEG, Stand: 12.2012). Bezugseinheit: Erzeugung von 1 GWh Strom.

Der Anwendungsfall Großdach-Industriell weist die beste Ökologie-Index Bewertung bei vergleichsweise niedrigen Vergütungssätzen auf. Innerhalb dieser Anwendung haben CdTe (1)-Module die geringsten Gesamtwirkungen, dicht gefolgt von monokristallinen Siliziummodule und CIS (1)-Modulen.

Freiflächenanlagen stellen für die regenerative Stromerzeugung mit Photovoltaik zwar die kostengünstigste Anwendung dar (niedrigste EEG-Vergütung), die Gesamtumweltwirkung ist allerdings höher als bei Anwendungen auf Industriedächern. Der umweltbezogene Unterschied der Anwendung monokristalliner Silizium-Module verkleinert sich im Vergleich zu CdTe (1)-Modulen für die Freifläche. Der auf die Fläche bezogene Aufwand für das BOS ist für die Silizium-Technologien geringer. Im Vergleich zur Freiflächenanwendung führen fast alle anderen PV-Anwendungsfälle zu niedrigeren Belastungen der Umwelt. Für den Bereich privater Kleindachanlagen ergeben sich bei höherer EEG-Vergütung ähnliche geringe Unterschiede in der Gesamtumweltwirkung wie für den Anwendungsfall Aufdach-Industriell.

Eine unmittelbare Kosteninformation für die PV-Technologien ist, wie in Kapitel 5.4 erörtert, für die einzelnen Technologien aus dem Ökoeffizienzportfolio nicht ableitbar. Die ökonomische Einordnung folgt, für alle Technologien identisch, der vorgegebenen Einordnung der Anwendungsfälle im EEG in die Kategorien „Gebäude bis 30 kWp“, „Gebäude ab 100 kWp“ und „sonstige Freiflächen“.

7.6.4 Sensitivitätsbetrachtung für den spezifischer Jahresertrag

Der je Anwendungsfall und PV-Technologie angenommene spezifische Jahresertrag in kWh/kWp hat einen wesentlichen Einfluss auf die umweltbezogene Bewertung. Neben den unterschiedlichen PV-Technologien selbst wird dieser Wert mitbestimmt z. B. durch Streuungen in der Fertigung und Spezifika der jeweiligen Auslegung der Gesamt-PV-Systeme, z. B. der Auswahl der Wechselrichter in Anzahl und Größe oder der Stringverteilung (Tabelle 3). Die ausgewiesenen Umweltwirkungen würden, insbesondere für die jüngeren Dünnschichttechnologien kleinerer Hersteller, durch eine auf die PV-Technologien bezogene, noch spezifischere Auslegung der Gesamtsysteme voraussichtlich verringert werden. Um diesen Einfluss abzuschätzen, wird in folgender sensitiver Betrachtung unabhängig von der PV-Technologie für den Anwendungsfall Aufdach-Privat, ein spezifischer Jahresertrag in Höhe von 1.050 kWh/kWp (vgl. Tabelle 3 für RTR CdTe (1)) angenommen. Abbildung 20 zeigt die Ergebnisse für diese Grenzbetrachtung, die annimmt, dass durch eine verbesserte Anlagenauslegung auch für junge Technologien gleich hohe Jahreserträge erzielt werden können.

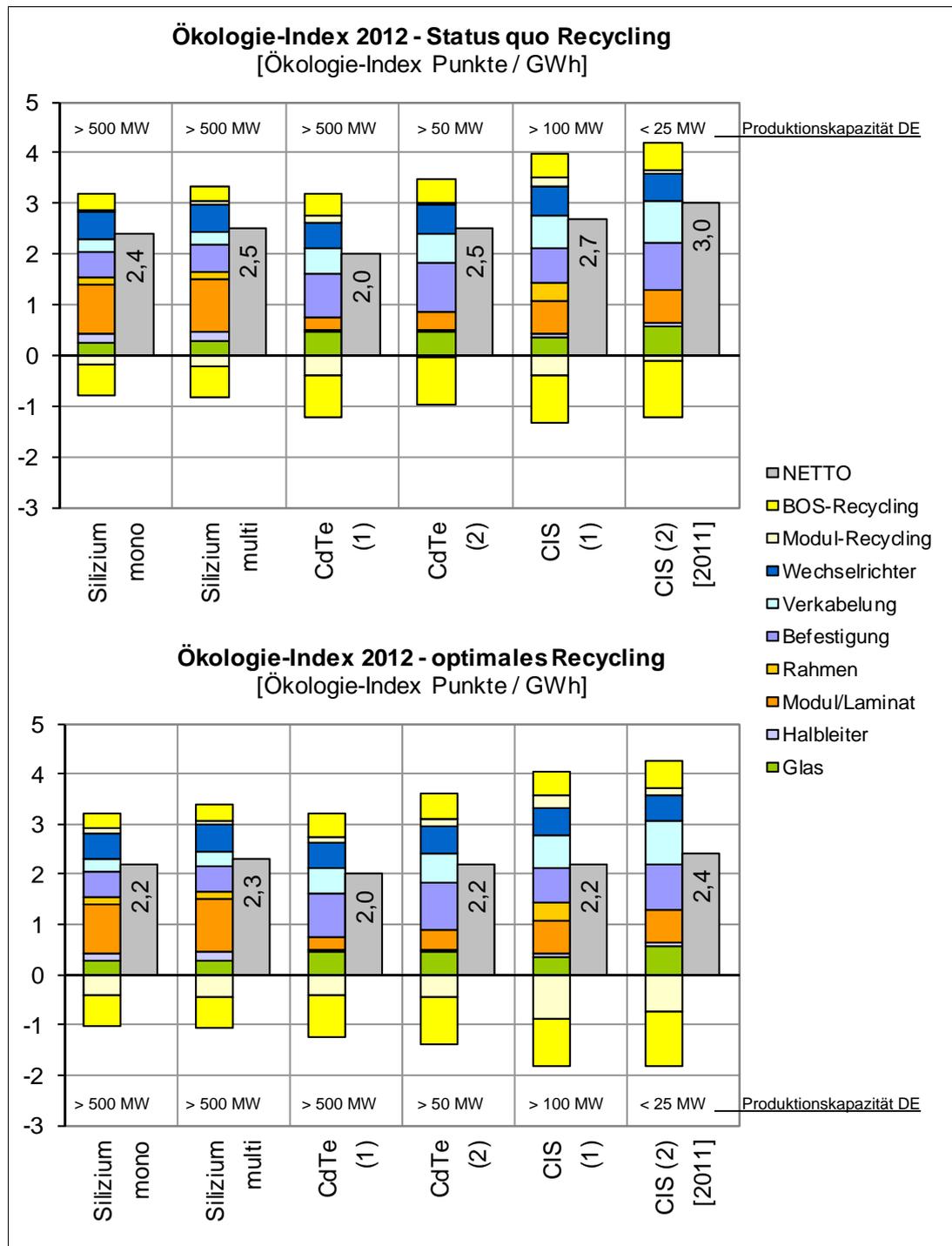


Abbildung 20: Sensitivitätsbetrachtung für den spezifischen Jahresertrag. Beiträge der Sektoren zum Ökologie-Index mit 1.050 kWh/kWp Ertrag für Silizium mono und multi, CdTe (1) und (2) sowie CIS (1) und (2) (Anwendungsfall: Aufdach-Privat); oben: Recycling-Option: Status quo; unten Recycling-Option optimal

8 Fazit

8.1 Untersuchungsmethodik

Die Methodik der lebenswegbezogenen Analyse der Stromerzeugung durch Photovoltaikanlagen und die Auswertung anhand von sieben umweltbezogenen Wirkungskategorien inklusive der Berücksichtigung der Ressourcenschonung von fossilen Energieträgern und Metallen ermöglicht eine umfassende und ausgewogene Bewertung. Eine umweltbezogene Bewertung der Photovoltaikanlagen, die sich nur auf den häufig isoliert diskutierten Beitrag zum Klimaschutz beziehen würde, wäre nicht zielführend. Zwar ist der Treibhauseffekt ein wichtiger Faktor zur Beschreibung umweltbezogener Wirkungen, allerdings würde ein Vergleich nur anhand des Klimaschutzes, beispielsweise bei der umweltbezogenen Bewertung des BOS, zu Fehlinterpretationen führen. Als Methode zur Bewertung von Human- und Ökotoxizität werden relevante Emissionen an Schwermetallen mit den Faktoren des aktuellen USEtox Toxizitätsmodells (UNEP-SETAC) verrechnet. Es gilt zu beachten, dass sich das Modell noch in Entwicklung befindet. Davon sind auch die Charakterisierungsfaktoren für Metalle betroffen. Diese Untersuchung kann somit nur eine Bewertung anhand des aktuellen Stands der Methodenentwicklung vornehmen. Eine hinreichend genaue und aktuelle Abbildung der metallurgischen Prozesse in Eco-Invent musste generell als Voraussetzung angenommen werden¹⁵.

Zu den von bifa analysierten Umweltwirkungen gehört auch der Beitrag zur Schonung von Ressourcen. Der dafür von bifa entwickelte Indikator Ressourcenschonung führt Verbrauch bzw. Schonung fossiler Energieträger und der metallischen Ressourcen durch die Analyse von Knappheit, Substituierbarkeit und Art der Nutzung dieser Rohstoffe zusammen. Die Kostenanalyse beruht auf der im Zeitraum gültigen Vergütung nach Erneuerbare Energien Gesetz (EEG). Die ökonomische Einschätzung wird somit technologieunabhängig für die zu bewertenden Anwendungsfälle vorgenommen.

8.2 Neue Ansätze und Vergleichbarkeit

Ziel der vorliegenden Studie war es, unterschiedliche Photovoltaiktechnologien umweltbezogen zu bewerten. Die Analyse wurde nicht nur auf PV-Modulebene realisiert, sondern erstreckt sich über das gesamte PV-System inklusive der Komponenten des BOS mit dem Ziel, die Beiträge aller PV-System-Komponenten zu ermitteln.

Die Bewertung der PV-Systeme wurde nicht nur als Momentaufnahme durchgeführt, sondern beinhaltet auch die Technologieentwicklung innerhalb eines Jahres (Stand 2011 und 2012) sowie erstmals auch die Potenziale der mittelfristigen Entwicklung bezüglich der angestrebten Fertigungs-Effizienz-Steigerungen und der Wirkungsgrad-Entwicklung.

Als weiteres wurde in dieser Studie zum ersten Mal eine ökologische Bewertung von PV-Anlagen mit Hilfe der USEtox-Methodik durchgeführt. Es gibt eine Reihe an PV-Ökobilanzen, die eine Bewertung anhand der Wirkungskategorien Treibhauspotenzial, Abbau stratosphärischen Ozons, Bildung von Pho-

¹⁵ Aufgrund des dominierenden Einflusses der Zink-Emissionen auf die Wirkungskategorien Human- und Ökotoxizität wurden die in Eco-Invent vorliegenden Prozessdaten der Zink- und Elektrostahlherstellung sowie des Feuerverzinkens anhand neuerer Quellen geprüft und teilaktualisiert. Durch eine Teil-Allokation von Aufwendungen bei der Zinkherstellung war auch der Datensatz für Indium betroffen.

tooxidantien, Versauerung sowie Eutrophierung durchführen. Eine Bewertung der Humantoxizität sowie Ökotoxizität fand bisher nicht statt. [WILD 2012], [MASO 2006]

Beim Vergleich verschiedener Studienergebnisse ist es wichtig, die Anlagenparameter jeweils korrekt einzuordnen. Es gilt z. B. zu beachten,

- welcher Bezugspunkt für die Studie gewählt wurde (Modul, Fläche, Ertrag),
- für welche Einstrahlung die Ergebnisse gelten (Standardbedingungen, Südeuropa, Bayern),
- Wie groß die bilanzierten Anlagen sind (Kleinanlagen, Kraftwerke) und
- wie die Umgebungstemperatur der Module zu bewerten ist (Standort, integriert, hinterlüftet, freistehend).

Die Verschiedenheit der möglichen Konstellationen macht einen direkten Vergleich oftmals schwierig.

8.3 Vergleich konventionelle Stromerzeugung mit PV-Technologien

Um die im Rahmen dieser Untersuchungen erzielten umweltbezogenen Ergebnisse zu PV-Systemen in ihrer Bedeutung besser einordnen zu können, wurde ein genereller Vergleich zu den Umweltlasten aus der konventionellen Stromerzeugung gezogen. Es zeigte sich, dass sich die Unterschiede zwischen den PV-Technologien dadurch stark relativieren. Die Gesamtumweltwirkungen, beispielsweise für die PV-Anwendungen Aufdach-Privat, liegen zwischen 2,0 und 3,0 Ökologie-Index Punkten (Recycling-Option Status quo). Somit ist die mit der Stromerzeugung aus Photovoltaik verbundene Gesamtumweltwirkung im Vergleich zum durchschnittlichen europäischen Strom-Mix¹⁶ mit fossilen Energieträgern um den Faktor 10 bis 20 geringer.

Zu der aufgezeigten Relation muss angemerkt werden, dass sich die verglichenen Produkte „Strom aus Photovoltaik“ und „Strom aus nicht regenerativen Energien“ abseits der ökobilanziellen Bewertung in einigen Merkmalen des erzeugten Stroms unterscheiden. Als Beispiel sei die eingeschränkte Verfügbarkeit oder Spitzenlastfähigkeit regenerativer Stromquellen angeführt.

8.4 Gesamtschau PV-Systeme

8.4.1 Ökoeffizienz für PV-Systeme

Vor dem Hintergrund der aufgezeigten Relation zur Stromerzeugung aus nicht regenerierbaren Quellen kommt die vorliegende Studie zu folgenden Ergebnissen:

Die Ergebnisunterschiede zwischen den einzelnen PV-Technologien erscheinen gering.

Im Rahmen der Untersuchung wurden PV-Technologien anhand von Produktionsanlagen zur Modulherstellung mit sehr unterschiedlicher Produktionskapazität und technologischer Reife abgebildet. Die unterschiedlichen Gesamtumweltwirkungen werden wesentlich durch die Skaleneffekte in der Produktion mitbeeinflusst.

Der Anwendungsfall Großdach-Industriell weist die beste Ökologie-Index Bewertung bei vergleichsweise niedrigen Vergütungssätzen auf. Innerhalb dieser Anwendung haben CdTe (1)-Module den gerings-

¹⁶ Union for the Co-ordination of Transmission of Electricity, Datensatz Eco-Invent v.2.2 [ECOI 2010]

ten Umweltaufwand, dicht gefolgt von Anwendungen monokristalliner Siliziummodule und CIS (1)-Module.

Freiflächenanlagen stellen für die regenerative Stromerzeugung mit Photovoltaik zwar die günstigste Anwendung dar (niedrigste EEG-Vergütung), der Gesamtumweltwirkung ist allerdings höher als bei Anwendungen auf Industriedächern. Der umweltbezogene Unterschied der Anwendung monokristalliner Silizium-Module verkleinert sich im Vergleich zu CdTe (1)-Modulen für die Freifläche. Der auf die Fläche bezogene Aufwand für das BOS ist für die Silizium-Technologien geringer. Für den Bereich privater Kleindachanlagen ergeben sich bei höherer EEG-Vergütung ähnliche geringe Unterschiede in der Gesamtumweltwirkung wie für den Anwendungsfall Aufdach-Industriell.

Eine Aussage bezüglich der Kosteneffizienz ist für die Technologien aus den Studienergebnissen nicht ableitbar, da quasi technologieunabhängige Stromgestehungskosten angeboten werden, deren Zielrendite sich als Differenz aus den fixen Einspeisegebühren und den Stromgestehungskosten ergibt. Der Wettbewerb findet dementsprechend nicht bezüglich der Modulpreise, sondern bezüglich der LCOE statt. Preislich sind die Silizium-Technologien und die beiden Dünnschicht-Technologien auf der Modul-Ebene demnach zwar unterschiedlich zu bewerten. Relevant ist für die Betrachtung aber nur das Gesamtsystem der Photovoltaik-Stromerzeugung. Es stehen somit nicht die PV-Technologien als solche im Vordergrund, sondern deren Anwendung in den verschiedenen Marktkategorien. Die Einordnung erfolgt, für alle Technologien identisch, anhand der vorgegebenen Klassifizierung der Anwendungsfälle im EEG in die Kategorien „Gebäude bis 30 kWp“, „Gebäude ab 100 kWp“ und „sonstige Freiflächen“.

8.4.2 Verhältnis von PV-Module zum BOS

Aus Umweltgesichtspunkten spielt das BOS je nach Technologie und vor allem Marktkategorie eine bedeutende Rolle. Die Tatsache, dass die Modultechnologien in der Vergangenheit immer effizienter wurden, führt dazu, dass der umweltbezogene Beitrag des BOS zum Gesamtergebnis immer deutlicher hervortritt.

Für die Szenarien Aufdach-Privat 2012 liegen die Anteile des BOS, inklusive der Belastungen für das BOS-Recycling, an den Umweltwirkungen zwischen ca. 51 % (Silizium) und 77 % (CdTe). Für die Freiflächenanlagen liegen die Anteile dagegen bereits zwischen 68 % (Silizium) und 86 % (CdTe). Der hohe Aufwand für Befestigung und Verkabelung wirkt sich letzten Endes negativ auf die Gesamtumweltwirkung für Freiflächenanlagen aus.

Dementsprechend ist die Nutzung bestehender Infrastruktur wie beispielsweise die Befestigung auf bestehenden Schrägdachflächen oder die Eingliederung von PV-Anlagen in bestehende Elektroniksysteme (Nutzung freier Transformatorkapazitäten) durch die Vermeidung von BOS-Bauteilen positiv bewertet.

Auch aus Kostensicht nimmt die Relevanz von BOS-Komponenten durch den Preisverfall der PV-Module weiter zu. Nach EEG erhalten die Freiflächenanlagen die geringsten Vergütungssätze. Verschiedene Anlagenkonzeptionen bedürfen jedoch unterschiedlichster technischer Ausführungen und können letztlich nur im Einzelfall bewertet werden. Die im Rahmen dieser Untersuchung erforderliche Anlehnung der „Systemkosten“ an die EEG-Vergütung kann nur der Orientierung dienen.

8.4.3 Energierücklaufzeiten

Die Energierücklaufzeit (Energetische Amortisation) ist die Zeitspanne, die eine Solaranlage benötigt, um so viel Energie zu erzeugen, wie für ihre Herstellung benötigt wurde. [SOVI 2013].

Dieser Wert liegt für die in der Studie betrachteten Systeme zwischen 0,55 Jahren für CdTe (1) im Szenario Großdach-Industriell und 1,30 Jahren für Silizium multi im Szenario Aufdach-Privat. Alle Modultypen erzeugen demnach im Laufe ihrer Lebensdauer ein Mehrfaches der für ihre Produktion eingesetzten Energie. Diese Werte gelten mit dem gewählten Installationsort Nürnberg für einen mitteleuropäischen Standort mit guten Einstrahlungswerten. Für Südeuropa würden sich noch bessere Werte ergeben. In Anbetracht dessen, dass die PV-Systeme immer effizienter hergestellt werden, werden zukünftige Energierücklaufzeiten noch geringer ausfallen. Eine Darstellung von Energierücklaufzeiten für alle Systeme ist der Tabelle 7 zu entnehmen.

Tabelle 7: Energierücklaufzeiten in Jahren, bezogen auf den KEA gesamt für das Szenario 2012

| Anwendungsfall Technologie | Aufdach-Privat | Großdach-Industriell | Freifläche |
|--|----------------|----------------------|-----------------|
| Si-multi | 1,29 | 1,20 | 1,15 |
| Si-mono | 1,30 | 1,24 | 1,18 |
| CdTe (1) | 0,61 | 0,55 | 0,60 |
| CdTe (2) | 0,89 | 0,80 | 0,79 |
| CIS (1) | 1,01 | 0,92 | nicht ermittelt |
| CIS (2) Datenbasis 2011 | 1,13 | 1,06 | nicht ermittelt |
| Angenommene Effizienz der Energieversorgung: 9,8 MJ _{prim} /kWh | | | |

8.5 Stellschrauben zur Verbesserung der Ökoeffizienz und Identifikation künftiger Ökoeffizienzpotenziale

8.5.1 Potenzial des hochwertigen stofflichen Recyclings

Das Potenzial des hochwertigen stofflichen Recyclings von PV-Modulen hat sich aus Umweltsicht als bedeutsam erwiesen.

Der Vergleich eines hochwertigen Recyclings zu einem Status quo-Recycling drückt sich, beispielhaft für Siliziummodule und den Anwendungsfall Aufdach-Privat, in gut doppelt so hohen Gutschriften aus dem Modulrecycling aus. Mit einem stofflich hochwertigen Recycling können durch die Gutschriften aus der Modulverwertung 10 % (CdTe), 12 % (Silizium) bzw. 20 % (CIS) der mit der Herstellung der Module verbundenen Umweltbelastungen eingespart werden.

Trotz des hohen Potenzials zur Reduzierung von Umweltlasten durch das hochwertige Recycling, stößt die Realisierung auf Schwierigkeiten. Größere Rücklaufmengen an End of Life-Modulen werden im Wesentlichen erst in den kommenden Jahren zu erwarten sein. Bis dato wurde nur von einem Hersteller eine eigene Recyclinganlage in Betrieb genommen und damit die Schließung von Stoffkreisläufen für eigene PV-Module garantiert. Der Aufbau solch einer Recyclinglinie ist mit hohen Kosten verbunden. Die Rohstoffpreise sind dagegen noch relativ niedrig. Auf der anderen Seite fehlen weitere Anreize

seitens der Gesetzgebung. Die von der WEEE vorgeschriebenen Recyclingquoten sind allein durch den hohen Glasanteil am Gesamtgewicht heute bereits zu erfüllen. Somit erweist sich ein hochwertiges Recycling als momentan wirtschaftlich schwer realisierbar, wäre jedoch ökologisch sehr vorteilhaft.

8.5.2 Kurzfristige Effizienz im Zeitraum 2011 bis 2012

Für die Betrachtung der Effizienzsteigerung wurden Änderungen innerhalb eines Jahres für alle Technologien verfolgt. In allen Fällen konnte innerhalb dieser kurzen Zeitspanne eine Effizienzsteigerung festgestellt werden. Als Hebel der Entwicklung hat sich besonders die Wirkungsgradsteigerung erwiesen. Durch die verbesserte Prozessführung steigt die Durchsatzleistung der Produktionslinien. Damit ist es möglich, bessere Wirkungsgrade der Module zu erreichen. Bezogen auf den Ökologie-Index wurden Einsparungen i.H.v. etwa 9 bis 17 % realisiert.

8.5.3 Mittelfristige Entwicklungen

Bezüglich der mittelfristigen Entwicklung ergaben sich durch die angestrebte Fertigungs-Effizienzsteigerung (u.a. Optimierung der Gläser in Dicke und Eigenschaften und 5 % Reduktion von Kunststoffmaterialien) weitere Verbesserungen in der gleichen Größenordnung wie für die kurzfristige Effizienz. Für CdTe lagen die Steigerungen sogar bei bis zu 25 %. Für die prognostizierte, alleinige Wirkungsgrad-Entwicklung bei gleichbleibenden Fertigungsaufwendungen, steht ein Verbesserungspotenzial i.H.v. 23 bis zu 33 % in Aussicht.

9 Literatur

- [BGR 2007] Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe: Rohstoffwirtschaftliche Steckbriefe für Metall- und Nichtmetallrohstoffe. Stand 1/2007.
- [BNA 2013a] Bundesnetzagentur: Archivierte Datenmeldungen – Degressions- und Vergütungssätze bis Januar 2012. www.bundesnetzagentur.de, März 2013.
- [BNA 2013b] Bundesnetzagentur: Photovoltaikanlagen: Datenmeldungen sowie EEG-Vergütungs-sätze – EEG-Vergütungssätze für PV-Anlagen. www.bundesnetzagentur.de, März 2013.
- [CALY 2010] calyx GmbH: FAQ Calyx CdTe Photovoltaik – Faktenkatalog zur Produkt- und Technologiekommunikation, unveröffentlicht. Rev. 4.0; 2010.
- [DERA 2011] Deutsche Rohstoffagentur. Reserven, Ressourcen und Verfügbarkeit von Energierohstoffen 2011. Kurzstudie. Hannover 2011.
- [ECEI 2010] European Commission: Critical raw materials for the EU. European Commission, Enterprise and Industry (Hrsg.), Juni 2010
- [ECOI 2010] Swiss Centre for Life Cycle Inventories: Eco-Invent Datenbank, Datenbestand: V2.2 (2010). ETH Zürich, St. Gallen 2010.
- [FFE 2010] von Roon S., Huck M.: Merit Order des Kraftwerkparcs. Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V. (Hrsg.), München 2010.
- [FIRS 2009] First Solar Inc.: First Solars Recycling Technology, Vortrag, 2009.
- [JLCA 2011] Laurent A., Lautier A., Rosenbaum R.K. et al.: Normalization references for Europe and North America for application with USEtox characterization factors. In: The International Journal of Life Cycle Assessment 16 (8), Seiten 728-738. 2011.
- [LOSE 2013] Loser Chemie. End-of-life Solutions for PV Modules. Processing of PV Modules: Chemical Baths. 3th International Conference on PV Module Recycling, Rom, Februar 2013.
- [MARE 2011] Wittmer D., Lucas R., Steger S. et al.: Metallische Rohstoffe, weltweite Wiedergewinnung von PGM und Materialien für Infrastrukturen – Abschlussbericht des Arbeitspakets 2 des Projekts „Materialeffizienz und Ressourcenschonung“ (MaRes). Wuppertal Institut für Klima, Umwelt (Hrsg.), Dezember 2011.
- [MASO 2006] Mason J. M., Fthenakis V. M., Hansen T. et al.: Energy Pay-Back and Life Cycle CO₂ Emissions of the BOS in an Optimized 3.5 MW PV Installation. In: Progress in Photovoltaics: Research and Applications. Nr. 14, Seiten 179-190. 2006.
- [PHOR 2013a] Photovoltaik.org: Wissen zur Planung & Realisierung einer PV-Anlage – Degradation von Solarmodulen. www.photovoltaik.org, April 2013.
- [PROZ 2009] ProZ.com – the translation workplace: Diskussion "Balance of System (BOS)". www.proz.com, Juli 2012.
- [PVM 2011] photovoltaik: Ökologie mit Gewinn. Photovoltaik 10/2011. www.photovoltaik.eu
- [SINH 2012] Sinha P., de Wild-Scholten M.: Life Cycle Assessment of utility-scale CdTe PV Balance of Systems. 2012.
- [SOCY 2012] SolarCycle – Das SolarWorld-Recycling. Broschüre, 2012.
- [SONN 2012] Nachhaltige Recyclingkonzepte der Photovoltaikindustrie. Sonnenenergie 2-2012.
- [SOVI 2013] Solarville AG: Photovoltaik Wiki – Amortisation, energetische. www.solarville.ch. Juli 2013.
- [USGS 2012] U.S. Geological Survey: Mineral Commodity Summaries – Statistics and Information. <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity>, August 2012.
- [WILD 2012] de Wild-Scholten, M.J.: Carbon- and environmental footprinting of photovoltaic modules. 2012.

A Anhang: Methodische Grundlagen

A.1 Ökobilanzielle Betrachtung

A.1.1 Erstellung Sachbilanz

Um die Vergleichbarkeit der Behandlungsverfahren zu gewährleisten, müssen neben der Festlegung der funktionellen Einheit auch die Grenzen der Betrachtung für die zu vergleichenden Szenarien konsistent definiert sein.

Die Normen zur Ökobilanzierung legen die Prozesse fest, die in das zu modellierende System aufgenommen werden. Im Idealfall sollte das System so modelliert werden, dass In- und Outputs an ihren Systemgrenzen Elementarflüsse sind. Da in vielen Fällen nicht ausreichend Zeit, Daten und Mittel zur Verfügung stehen, um eine derart umfassende Studie durchzuführen, müssen Entscheidungen darüber getroffen werden, welche Prozesse in die Untersuchung einbezogen beziehungsweise welche Emissionen in die Umwelt berücksichtigt werden und mit welcher Detailgenauigkeit die Prozesse untersucht beziehungsweise die Emissionen erfasst werden sollen.

A.1.1.1 Prozesse

Folgende Prozesse sind innerhalb der Systemgrenzen zu berücksichtigen:

- Alle Prozesse über den gesamten Lebensweg des PV-Systems; von den jeweiligen Produktionsverfahren über die verschiedenen Einsatzbereiche sowie bis zu den Entsorgungs- und Recyclingschritten.
- Alle mit den genannten Prozessen verbundenen relevanten Stoff- und Energieflüsse von der Gewinnung und Aufbereitung von Rohstoffen bis zu der Bereitstellung von Betriebsmitteln und, soweit als möglich, der Entsorgung von Reststoffen. Im Idealfall umfassen die Systemgrenzen die Gewinnung der Rohstoffe aus den natürlichen Lagerstätten und deren Bereitstellung für technische Prozesse und die Abgabe von Elementarflüssen an die Umweltmedien Wasser, Luft und Boden.

Outputseitig wird die Systemgrenze für die untersuchten Verfahren dort gezogen, wo entweder Elementarflüsse wieder an die Umwelt abgegeben werden oder ein marktgängiger Zusatznutzen des Systems durch möglicherweise entstehende Stoffe oder frei werdende Energie zu berücksichtigen ist.

Die Bereitstellung und der Unterhalt der Infrastruktur (der Bau, die Wartung und Reparatur von Gebäuden, Maschinen, Industrieanlagen, Transportmitteln und Verkehrswegen) werden nicht berücksichtigt, da kein wesentlicher Einfluss zu erwarten ist.

A.1.1.2 Äquivalenzprozesse und Allokationen

Neben der Entsorgung von Produktionsabfällen resultieren aus den Recyclingverfahren zusätzliche Nutzen, wie z. B. Strom und Wärme aus der thermischen Verwertung von Kunststoffen oder Sekundärmetalle sowie Halbleitermaterialien aus der stofflichen Verwertung. Als Folge müssen die entsprechenden Energiemengen beziehungsweise Produkte nicht auf konventionellem Weg aus Primärrohstoffen hergestellt werden (eine gleichbleibende Nachfrage wird unterstellt). Die Umweltauswirkungen, die mit der konventionellen Herstellung jedes einzelnen Zusatznutzens verbunden sind, werden somit „ein-

gespart“ beziehungsweise „vermieden“. Um den Vergleich der Entsorgungssysteme zu vervollständigen, werden diese „vermiedenen“ Umweltauswirkungen bilanziert und den Umweltauswirkungen des Entsorgungssystems gutgeschrieben¹⁷.

Der konventionelle Herstellungs- beziehungsweise Produktionsprozess eines Zusatznutzens wird als Äquivalenzprozess oder Äquivalenzsystem bezeichnet. Für jeden quantifizierbaren Zusatznutzen wird ein spezifisches Äquivalenzsystem modelliert, das den gleichen beziehungsweise einen vergleichbaren funktionsäquivalenten Nutzen erzeugt.

A.1.2 Quantifizierung Umweltwirkungen

Im Rahmen der Wirkungsabschätzung werden die umfangreichen, ökologischen Ergebnisse der Sachbilanz in folgenden Schritten komprimiert und für die Auswertung vorbereitet:

- Auswahl der zu betrachtenden Wirkungskategorien
- Zuordnung der Sachbilanzergebnisse zu den Wirkungskategorien (Klassifizierung)
- Modellierung der Sachbilanzdaten innerhalb der Wirkungskategorien (Charakterisierung)

Die Auswahl der im Rahmen der ökobilanziellen Betrachtungen dieses Vorhabens ausgewählten Wirkungskategorien orientiert sich an den aktuellen umweltbezogenen Kenntnissen sowie an projektspezifischen Erkenntnisinteressen.

Den einzelnen Wirkungskategorien sind jeweils Sachbilanzparameter zuzuordnen. Die entsprechenden Sachbilanzergebnisse werden anschließend zu einem beziehungsweise mehreren Wirkungsindikatorergebnissen verrechnet oder direkt als Wirkungsindikatorergebnis verwendet.

Eine ausführliche Beschreibung zur Berücksichtigung stofflicher und energetischer Ressourcen in der Wirkungskategorie Ressourcenbeanspruchung findet sich in Kapitel A.2.

A.1.3 Aggregation Einzelergebnisse zum Ökologie-Index

Die Aggregation der Einzelergebnisse zum Gesamtergebnis Ökologie-Index erfolgt in drei Schritten:

1. Normierung:
Die Einzelergebnisse werden auf die gemeinsame Bezugseinheit „Einwohnerwerte“ umgerechnet
2. Gewichtung:
Die einzelnen Wirkungskategorien werden in Anlehnung an eine Empfehlung des UBA mit Hilfe folgender Kriterien anhand ihrer „ökologischen Priorität“ gewichtet:
 - Ökologische Gefährdung (wie schwerwiegend sind potenzielle Schäden?)
 - Distance-to-Target (Abstand der derzeitigen Umweltsituation von der Zielsituation)
3. Zusammenführung:
Die gewichteten Ergebnisse werden zum Ökologie-Index zusammengeführt.

¹⁷ Die mit die Bilanzierung der konventionellen Herstellung der Zusatznutzen erhaltenen Elementarflüsse (Gutschriften) werden von den Umweltauswirkungen des jeweiligen Entsorgungssystems (Bruttoergebnis) rechnerisch abgezogen, was zu einem Nettoergebnis führt. Damit können auch negative Nettoergebnisse auftreten.

A.1.3.1 Normierung: Berechnung der Einwohnerwerte

Ausgangspunkt für die Aggregation der einzelnen Wirkungsindikator-/Sachbilanzergebnisse sind die Einwohnerwerte (EW), die sich aus den jeweiligen Wirkungsindikator-/Sachbilanzergebnissen und den entsprechenden Gesamtemissionen in der Bundesrepublik errechnen. Positive Einwohnerwerte repräsentieren eine Umweltbelastung, während negative Einwohnerwerte Umweltentlastungen bedeuten.

Die im Rahmen der Normierung für jede Wirkungskategorie berechneten Einwohnerwerte erlauben einen größenordnungsbezogenen Vergleich der verschiedenen Wirkungsindikatoregebnisse. Je größer die Anzahl der Einwohnerwerte ist, desto bedeutender ist diese Wirkungskategorie für die ökologieorientierte Beurteilung der betrachteten Verfahren beziehungsweise Szenarien hinsichtlich ihres Beitrages zur Umweltbelastung. Den Einwohnerwert, als Parameter zur Bestimmung der Relevanz eines Wirkungsindikatoregebnisses erhält man über folgenden Ansatz:

$$\text{Einwohnerwert (EW)} = \frac{\text{Wirkungsindikatorergebnis}}{\text{Referenzwert}} \cdot \text{Einwohnerzahl BRD}$$

Die für die Normierung der Ergebnisse dieses Vorhabens verwendeten Referenzwerte sind in folgender Tabelle dargestellt.

Tabelle A-1: Grundlagen zur Ermittlung des spezifischen Beitrags – Gesamtemissionen und -verbräuche in Deutschland und mittlere Belastung durch einen Einwohner pro Jahr. Basis: 81.859.000 Einwohner nach Angabe des statischen Bundesamtes zum Stand 31.12.2011

| Wirkungsindikator | Referenzwert (Deutschland) | Belastung je Einwohner |
|---|--------------------------------------|--|
| Treibhauspotenzial | 930.287.431 t CO ₂ -Äq./a | 11,3 t CO ₂ -Äq./a |
| Versauerungspotenzial | 2.771.501 t SO ₂ -Äq./a | 33,8 kg SO ₂ -Äq./a |
| Eutrophierungspotenzial terrestrisch | 435.403 t PO ₄ -Äq./a | 5,3 kg PO ₄ -Äq./a |
| Photooxidantienbildung | 1.291.900 t Ethen-Äq./a | 15,75 kg Ethen-Äq./a |
| Humantoxizität ¹⁾ | k.a. [cases/kg _{emitted}] | 0,00085 [cases/kg _{emitted}] |
| Ökotoxizität ¹⁾ | k.a. [PAF-m ³ -day/kg] | 8.720 [PAF-m ³ -day/kg] |
| Ressourcenverknappungspotenzial ³⁾ | 453.718.015 t Eisen-Äq./a | 5,54 t Eisen-Äq./a |

¹⁾ Bezug Europa, Jahr 2004 [JLCA 2011]

²⁾ Der Referenzwert für das Ressourcenverknappungspotenzial errechnet sich aus dem Verbrauch in Deutschland für die fossilen Energieträger und Metalle unter Berücksichtigung des zu jeder Ressource gehörenden Ressourcenverknappungspotenzials (siehe Tabelle A-6)

A.1.3.2 Gewichtung

Die folgende Tabelle zeigt die Beurteilung der einzelnen Kategorien nach den Kriterien „Ökologische Gefährdung“ und „Distance-to-Target“ durch das Umweltbundesamt.

Ökologische Gefährdung: Welche Bedeutung ist den einzelnen Kriterien nach Stand der Wissenschaft wie auch der Sensibilität der Bevölkerung oder der Politik zuzumessen?

Abstand zum Schutzziel („Distance-to-Target“): Wie weit entfernt ist die derzeitige Umweltsituation gegenüber den von umweltpolitischer Seite gesetzten Zielvorgaben (Umweltziele, Umweltqualitätsziele, Reduktionsziele u.ä.)?

Tabelle A-2: Hierarchisierung von Wirkungskategorien nach „Ökologischer Gefährdung“ und „Distance-to-Target“ durch das Umweltbundesamt [UBA 1999].

| Wirkungskategorie | Ökologische Gefährdung | Distance-to-Target |
|--|------------------------|--------------------|
| Treibhauseffekt | A | A |
| Versauerung | B | B |
| Terrestrische Eutrophierung | B | B |
| Aquatische Eutrophierung | B | C |
| Ressourcenbeanspruchung | C | B |
| Photochemische Oxidantienbildung | D | B |
| Naturraumbeanspruchung | A | B |
| Stratosphärischer Ozonabbau | A | D |
| Humantoxizität ¹⁾ | B | B |
| Öko-Toxizität ¹⁾ | B | B |
| A = höchste Priorität | | |
| D = niedrigste Priorität | | |
| ¹⁾ Keine Vorgaben nach [UBA 1999]. Hierarchisierung deshalb nach [bifa 2003]. | | |

Im Rahmen dieses Vorhabens werden den Prioritäten der projektunabhängigen Kriterien ebenfalls feste Punktzahlen zugeordnet (vergleiche Tabelle A-3). Dies ermöglicht die anschließend durchzuführende Zusammenführung mit den normierten spezifischen Beiträgen.

Tabelle A-3: Punktevergabe bei den projektunabhängigen Kriterien ökologische Gefährdung (ÖkG) und Distance-to-Target (DtT).

| Priorität | ÖkG beziehungsweise DtT | Punktzahl |
|-----------|-------------------------|-----------|
| A | | 10 |
| B | | 8 |
| C | | 6 |
| D | | 4 |
| E | | 2 |

A.1.3.3 Zusammenführung

Die Zusammenführung der vom bilanzierten System abhängigen Einwohnerwerte mit den beiden systemunabhängigen Kriterien „ökologische Gefährdung“ (ÖkG) und „Distance-to-Target“ (DtT) für jede Wirkungskategorie erfolgt durch die Multiplikation der ermittelten Einwohnerwerte mit der Summe der festgelegten Punktzahlen von ÖkG und DtT. Durch Summation aller so erhaltenen Teilsummen für jede betrachtete Wirkungskategorie beziehungsweise jeden Sachbilanzparameter eines Verfahrens beziehungsweise Szenarios erhält man den Ökologie-Index.

A.2 Wirkungskategorie Ressourcennutzung

A.2.1 Bewertung Ressourcennutzung – Ressourcenverknappungspotenzial

Für die Beurteilung der Ressourcennutzung sind grundsätzlich die folgenden Aspekte zu berücksichtigen:

- die langfristige Verfügbarkeit für die menschliche Nutzung (Schutzgut „Ressourcen“)
- die mit der Gewinnung und Nutzung von Ressourcen verbundene Umweltbelastung und die mit abnehmender Verfügbarkeit drohende Zunahme der Umweltbelastung (Schutzgüter „Struktur und Funktion von Ökosystemen“ und „Menschliche Gesundheit“)

Die Bewertung der realen und potenziellen Umweltbelastungen bezogen auf die Schutzgüter „Ökosysteme“ und „Menschliche Gesundheit“ kann prinzipiell anhand etablierter Indikatoren zur Beschreibung von Umweltwirkungen erfolgen. Dagegen existieren für die Bewertung der Verfügbarkeit zwar Ansätze, die allerdings einer integrierten, das heißt über die ausschließliche Betrachtung von Reichweiten hinausgehenden Bewertung der Ressourcennutzung, nur bedingt gerecht werden oder nicht als geschlossener Indikator angewendet werden können. Aus diesen Gründen entwickelte bifa ein Raster zur Bewertung der Verfügbarkeit energetischer und abiotischer Rohstoffe. Die Bewertung der Verfügbarkeit eines Rohstoffs erhält man im Rahmen einer Nutzwertanalyse für die folgenden drei Zielkriterien:

4. Reichweite
5. Überwiegende Art der Nutzung
6. Substituierbarkeit

Zweifellos ist es notwendig, neben der Bewertung von Reichweiten von Rohstoffen auf die Optionen der „Streckung“ der Verfügbarkeit von Primärrohstoffen durch effizientere Nutzung, Substitution durch weniger knappe Rohstoffe, Recycling und generell auf technische Innovationen hinzuweisen¹⁸. Nicht die Rohstoffknappheit ist die einzige Herausforderung, sondern der Umgang mit Rohstoffen. Für die im Rahmen dieser Untersuchung relevanten Rohstoffe und Energieträger sind die Zielgrößen für jedes der genannten Kriterien dargestellt.

Tabelle A-4: Charakterisierung von Rohstoffen und Energieträgern anhand der Zielkriterien.

| Ressource | Statische Reichweite [a] [DERA 2011; BGR 2007; MARE 2011 bzw. USGS 2012] | Überwiegende Art der Nutzung [bifa Einschätzungen; ECEI 2010] | Substituierbarkeit [bifa Einschätzungen; ECEI 2010] | Reserve [Mio. t] [DERA 2011; BGR 2007; USGS 2012] |
|------------|---|--|--|--|
| Steinkohle | 95 | Destruktive Nutzung | 0,30 | 605.000 |
| Erdgas | 58 | Destruktive Nutzung | 0,70 | 158.760 |
| Erdöl | 43 | Destruktive Nutzung | 0,50 | 169.000 |

¹⁸ Vergleiche [MARE 2011; S.17]

| Ressource | Statische Reichweite [a] [DERA 2011; BGR 2007; MARE 2011 bzw. USGS 2012] | Überwiegende Art der Nutzung [bifa Einschätzungen; ECEI 2010] | Substituierbarkeit [bifa Einschätzungen; ECEI 2010] | Reserve [Mio. t] [DERA 2011; BGR 2007; USGS 2012] |
|-----------|---|--|--|--|
| Aluminium | 142 | Recycling etabliert | 0,51 | 6.250 |
| Eisen | 61 | Recycling etabliert | 0,70 | 79.000 |
| Kupfer | 43 | Recycling etabliert | 0,56 | 690 |
| Blei | 19 | Recycling etabliert | 0,91 | 85 |
| Nickel | 44 | Recycling etabliert | 0,90 | 62 |
| Cadmium | 30 | kaum Recycling/Dissipation | 0,50 | 0,6 |
| Zink | 20 | kaum Recycling/Dissipation | 0,30 | 250 |
| Indium | 25 | kaum Recycling/Dissipation | 0,90 | 0,10 |
| Molybdän | 40 | kaum Recycling/Dissipation | 0,71 | 10 |
| Gallium | 200 | kaum Recycling/Dissipation | 0,74 | 0,1 |
| Tellur | 178 | kaum Recycling/Dissipation | 0,32 | 0,1 |

Anschließend werden die Zielgrößen klassiert und mit Punkten bewertet. Man erhält so die Zielwerte. Die Bewertung innerhalb der Punkte-Skala der Zielgrößen erfolgt dergestalt, dass Zielgrößen-Ausprägungen, die eine Verschärfung der Ressourcenverknappung beschreiben, einer höheren Punktzahl zugeordnet werden. Für die gewichtete Summation der Zielwerte nimmt bifa an, dass alle Zielkriterien gleichen Einfluss auf die Bewertung der langfristigen Verfügbarkeit haben und dementsprechend gleich zu gewichten sind. Die folgende Tabelle veranschaulicht die Zuordnung der Zielgrößen zur Punkteskala.

Tabelle A-5: Bewertung der langfristigen Verfügbarkeit von Rohstoffen und Energieträgern. Ermittlung der Zielwerte aus Zielgrößen und Zuordnung Punkteskala.

| Statische Reichweite | Überwiegende Art der Nutzung | Substituierbarkeit (Substitutability Index SI) | Punkteskala |
|------------------------------|--------------------------------------|--|-------------|
| Nahezu erschöpft (<25 Jahre) | Destruktive Nutzung | Keine, mit gravierenden Folgen für Befriedigung der Grundbedürfnisse zukünftiger Generationen (SI=3) | 10 |
| Sehr gering (<50 Jahre) | Dissipative Nutzung / kaum Recycling | | 8 |

| Statische Reichweite | Überwiegende Art der Nutzung | Substituierbarkeit (Substitutability Index SI) | Punkteskala |
|------------------------|--|---|-------------|
| Gering (<75 Jahre) | | Keine, mit deutlichen Folgen für Befriedigung der Grundbedürfnisse zukünftiger Generationen (SI=2) | 6 |
| Mittel (<100 Jahre) | | | 4 |
| hoch (< 125 Jahre) | EOL-Recycling etabliert (EU-Quote größer 20 %) | Keine, ohne gravierenden Folgen für Befriedigung der Grundbedürfnisse zukünftiger Generationen (SI=1) | 2 |
| Sehr hoch (>125 Jahre) | | Grundsätzlich substituierbar (SI<1) | 0 |
| 25 % | 25 % | 50 % | Gewichtung |

Für jeden Rohstoff und Energieträger erfolgt anschließend eine gewichtete Summierung der Zielwerte zu einer dimensionslosen Kennzahl für die Bewertung der langfristigen Verfügbarkeit. Je höher die gewichtete Summe der drei Zielwerte ist, desto höher ist die resultierende Knappheit mit Blick auf die langfristige Verfügbarkeit dieses Rohstoffs beim Abbau einer Masseneinheit aus der Lagerstätte.

Die Summe aus den gewichteten Beiträgen der 3 Zielkriterien wird im Folgenden als Ressourcenverknappungspotenzial bezeichnet. Die dimensionslose Formulierung des Ressourcenverknappungspotenzials lässt die absolut verfügbare Menge einer Ressource außer Acht. bifa berücksichtigt deshalb, in Analogie zum Vorgehen in [Guineé 1995, S.97], zusätzlich als reziproke Gewichtung den Vorrat eines Rohstoffs beziehungsweise Energieträgers, quantifiziert als Tonnage der jeweiligen Reserve. Die jeweiligen Reserve gehen dabei nicht direkt in die Bewertung mit ein, sondern gewichtet mit dem Exponentenfaktor 0,5. Die Gewichtung des Ressourcenverknappungspotenzials mit der vorhandenen Reserve ist in der folgenden Tabelle dargestellt. Durch die Normierung der gewichteten Ressourcenverknappungspotenziale am gewichteten Ressourcenverknappungspotenzial für Eisen erhält man als Einheit für das Ressourcenverknappungspotenzial Eisen-Äquivalente.

Tabelle A-6: Gewichtung des Ressourcenverknappungspotenzials mit der vorhandenen Reserve.

| | Ressourcenverknappung | Reserve [Mio. t] [DERA 2011, USGS 2012; MARE 2011] | Gewichtetes Ressourcenverknappungspotenzial | Gewichtetes Ressourcenverknappungspotenzial, normiert auf Eisen |
|------------|-----------------------|--|---|---|
| Ressource | a | b | $a \cdot (1/b^{0.5})$ | [Fe-Äq.] |
| Steinkohle | 3,5 | 605.000 | 0,004 | 0,63 |
| Erdgas | 4,0 | 158.760 | 0,010 | 1,4 |
| Erdöl | 4,5 | 169.000 | 0,01 | 1,5 |
| Aluminium | 0,5 | 6.250 | 0,006 | 0,9 |
| Eisen | 2,0 | 79.000 | 0,007 | 1,0 |

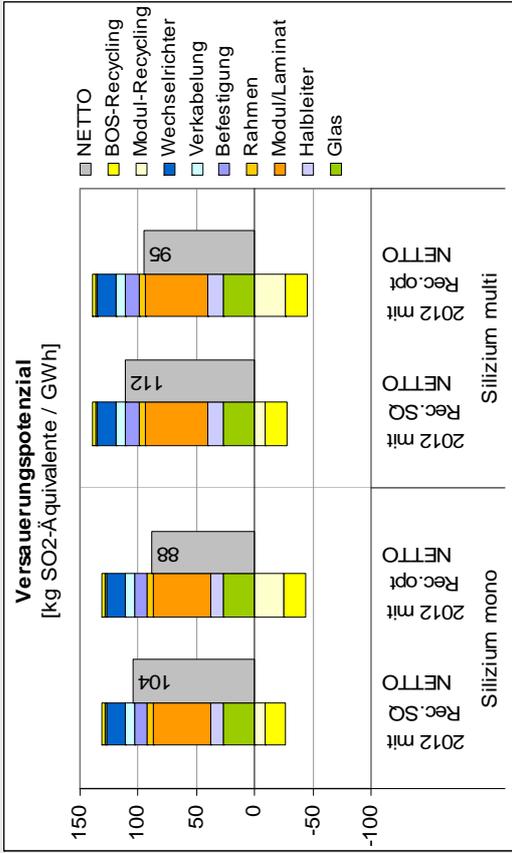
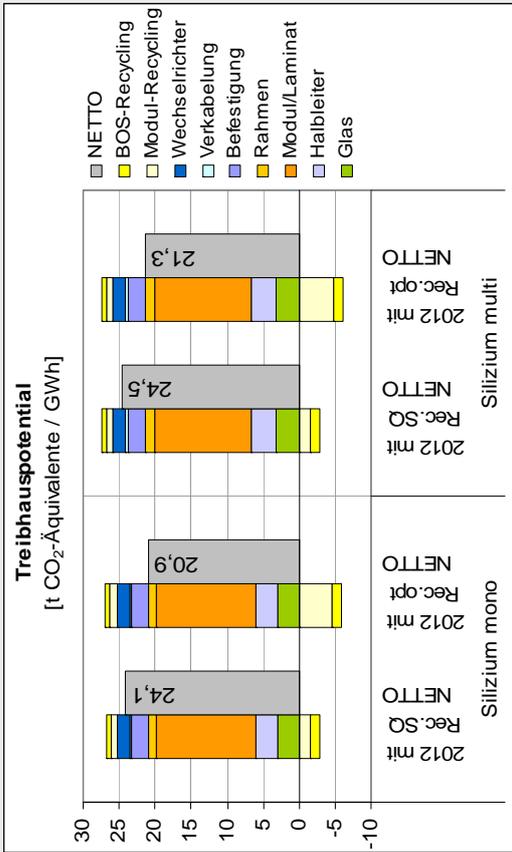
| | Ressourcenverknappung | Reserve [Mio. t] [DERA 2011, USGS 2012; MARE 2011] | Gewichtetes Ressourcenverknappungspotenzial | Gewichtetes Ressourcenverknappungspotenzial, normiert auf Eisen |
|-----------|-----------------------|---|---|---|
| Ressource | a | b | $a \cdot (1/b^{0.5})$ | [Fe-Äq.] |
| Kupfer | 2,5 | 690 | 0,095 | 13 |
| Blei | 3,0 | 85 | 0,325 | 46 |
| Nickel | 2,5 | 62 | 0,317 | 45 |
| Cadmium | 4,0 | 0,6 | 5,0 | 703 |
| Zink | 4,5 | 250 | 0,284 | 40 |
| Indium | 4,5 | 0,10 | 14,23 | 2.000 |
| Molybdän | 4,0 | 10 | 1,26 | 178 |
| Gallium | 2,0 | 0,1 | 6,32 | 889 |
| Tellur | 2,0 | 0,1 | 6,32 | 889 |

B Anhang: Ergebnisse Wirkungskategorien

Die den Ökologie-Indizes zu Grunde liegenden Einzelergebnisse aller Wirkungskategorien sind den folgenden Abbildungen zu entnehmen – aufgeteilt in die Bereiche Si-basierte PV-Anlagen, CdTe PV-Anlagen und CIS PV-Anlagen.

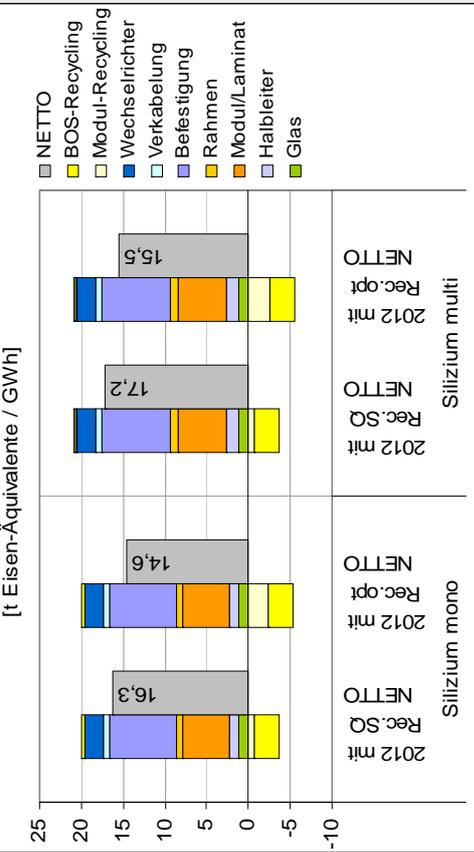
Herstellung, Nutzung und Recycling von PV-Anlagen

Herstellung in 2012 mit jeweils minimaler (Rec.SQ) und stofflich hochwertiger Recycling-Option (Rec.opt) in 2042

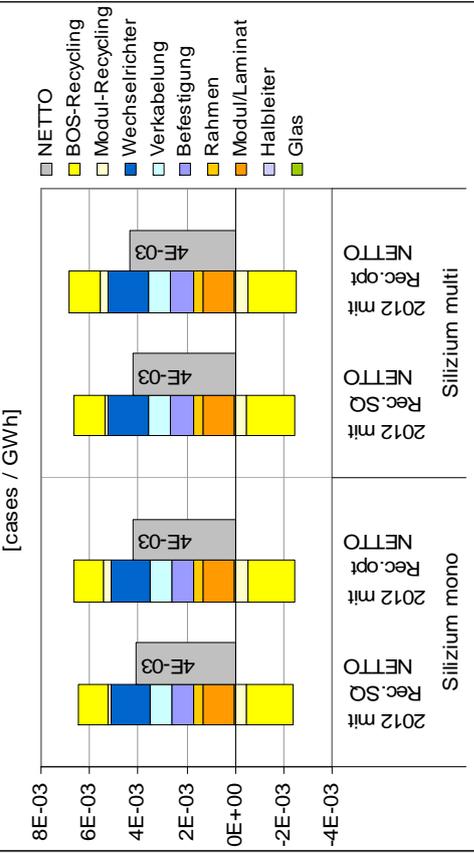


Modultyp: **Silizium**
Anwendungsfall: **Aufdach-Privat**

Ressourcenbeanspruchung

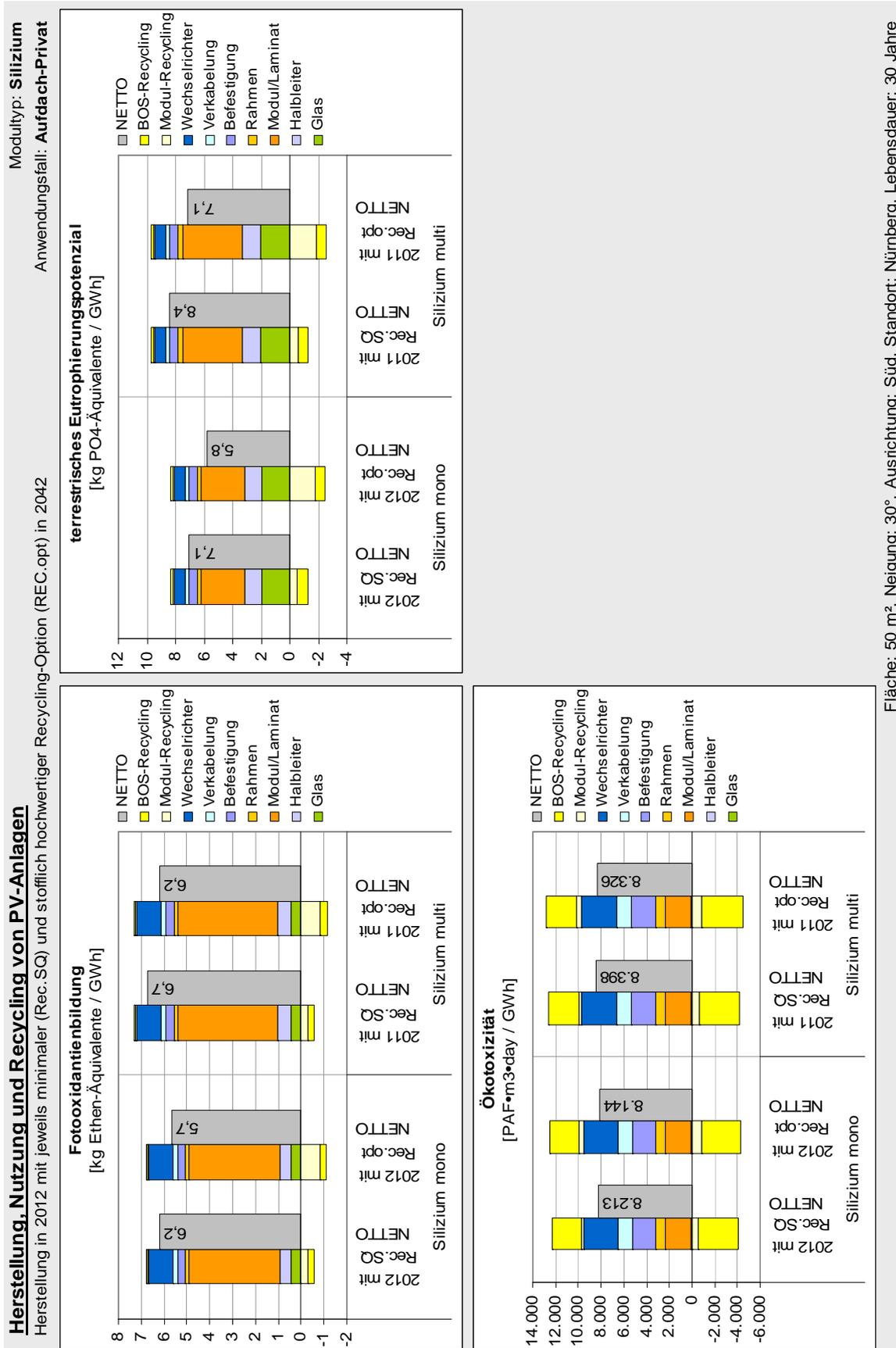


Humantoxizität



Fläche: 50 m², Neigung: 30°, Ausrichtung: Süd, Standort: Nürnberg, Lebensdauer: 30 Jahre

Abbildung A-1: Ergebnisse ausgewählter Wirkungskategorien für Silizium-basierte PV-Anlagen und den Anwendungsfall Aufdach-Privat – Lebensweg ab 2012 mit minimaler (Rec.SQ) und stofflich hochwertiger Recycling-Option (Rec.opt).

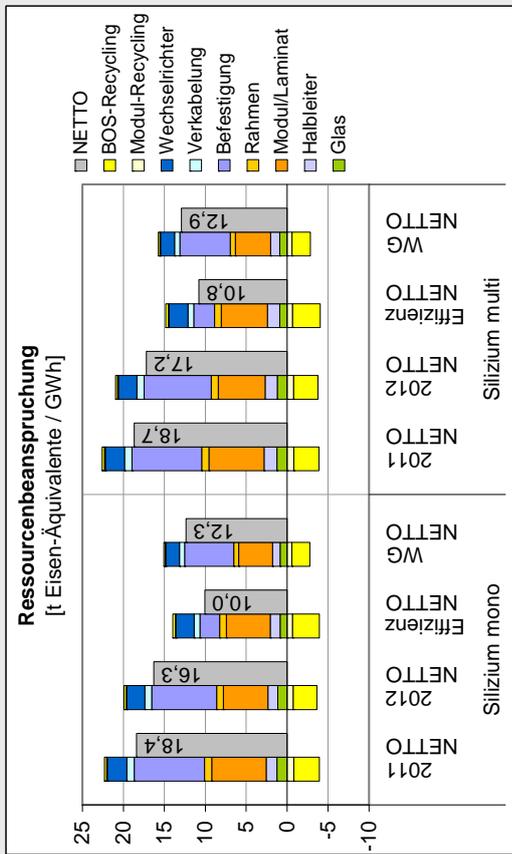
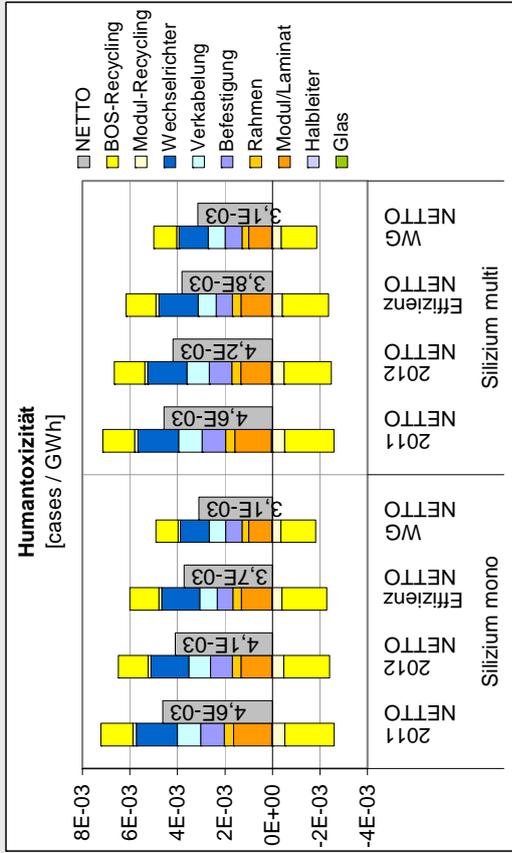
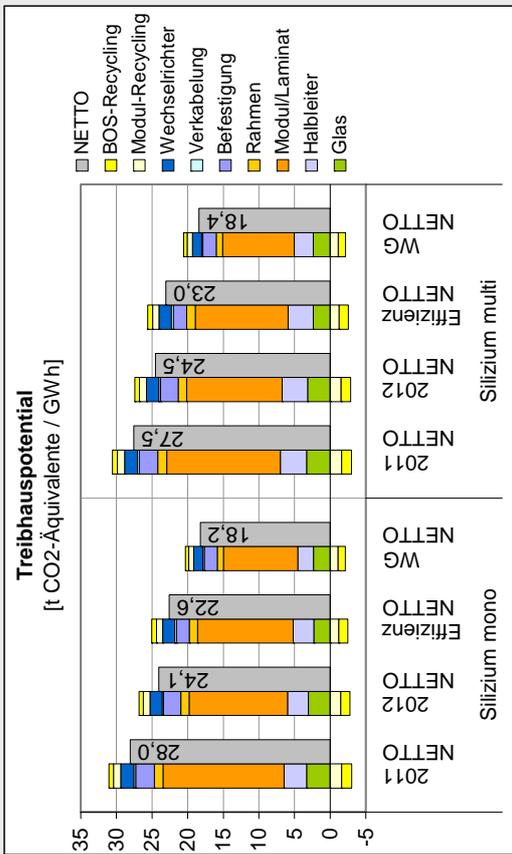
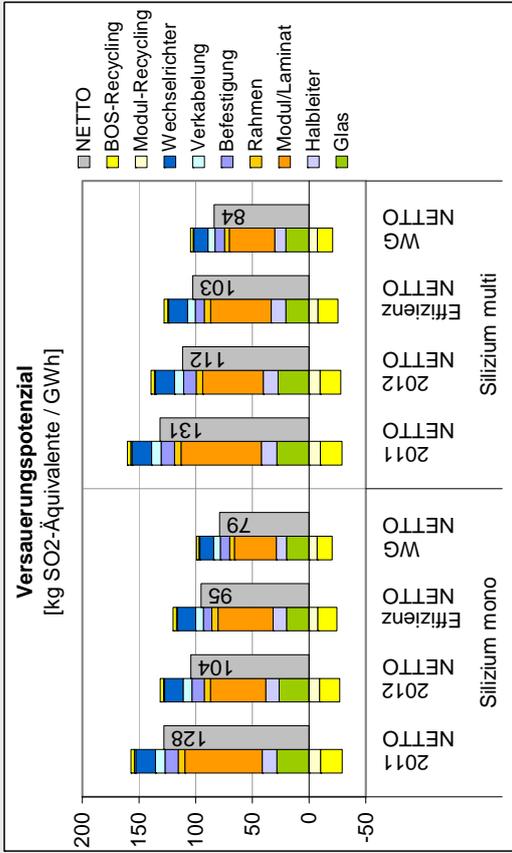


Fläche: 50 m², Neigung: 30°, Ausrichtung: Süd, Standort: Nürnberg, Lebensdauer: 30 Jahre

Abbildung A-2: Ergebnisse ausgewählter Wirkungskategorien für Silizium-basierte PV-Anlagen und den Anwendungsfall Aufdach-Privat – Lebensweg ab 2012 mit minimaler (Rec.SQ) und stofflich hochwertiger Recycling-Option (Rec.opt).

Technologieentwicklung von PV-Anlagen

Herstellung in 2011, 2012 sowie mittelfristig zu erwartende Entwicklungen im Bereich gesteigerte Produktionseffizienz und Modul-Wirkungsgrade (Status quo Recycling)

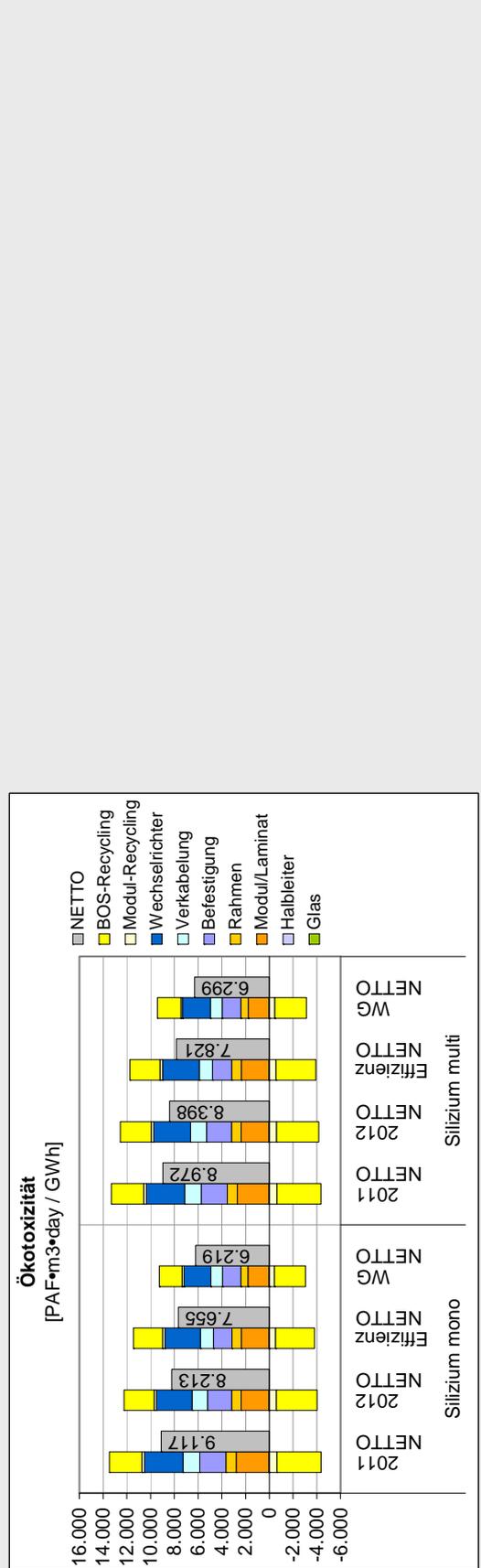
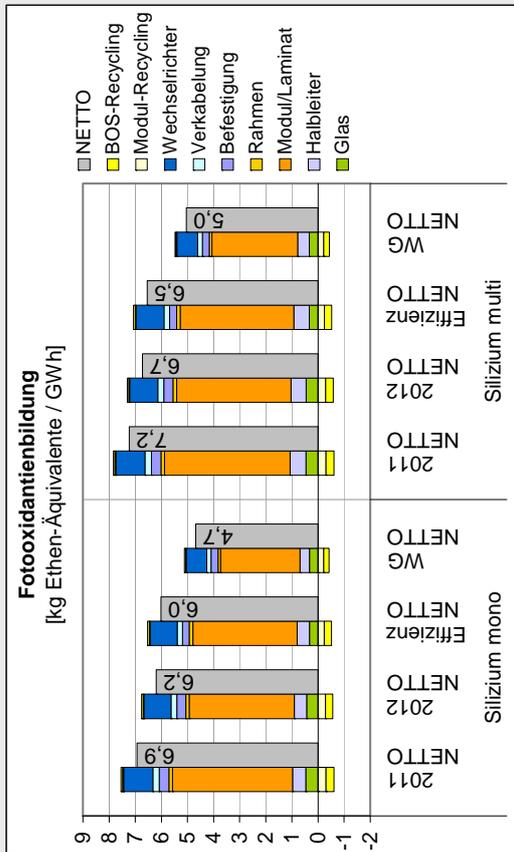
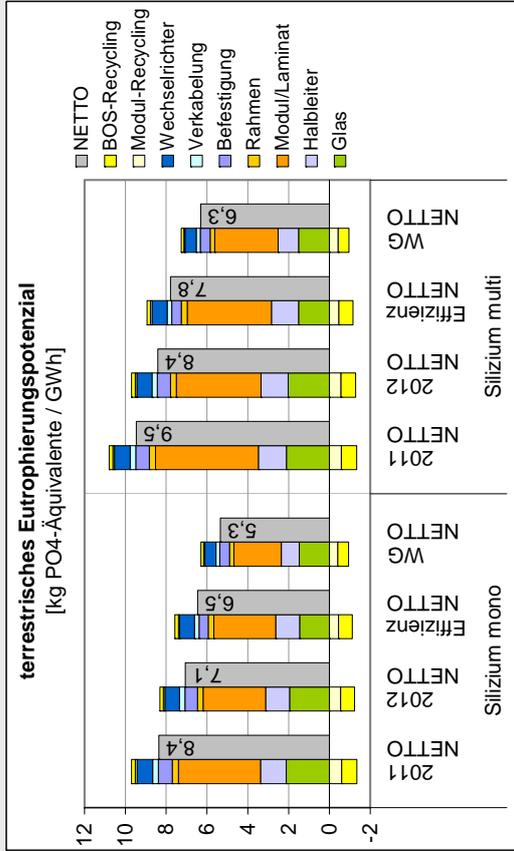


Fläche: 50 m², Neigung: 30°, Ausrichtung: Süd, Standort: Nürnberg, Lebensdauer: 30 Jahre

Abbildung A-3: Ergebnisse ausgewählter Wirkungskategorien für Silizium-basierte PV-Anlagen und den Anwendungsfall Aufdach-Privat – Technologieentwicklung für 30 jährigen Lebensweg ab Herstellung sowie mittelfristig zu erwartende Entwicklungen in den Bereichen gesteigerte Produktionseffizienz und Modul-Wirkungsgrade (jeweils Recycling-Option Status quo).

Technologieentwicklung von PV-Anlagen

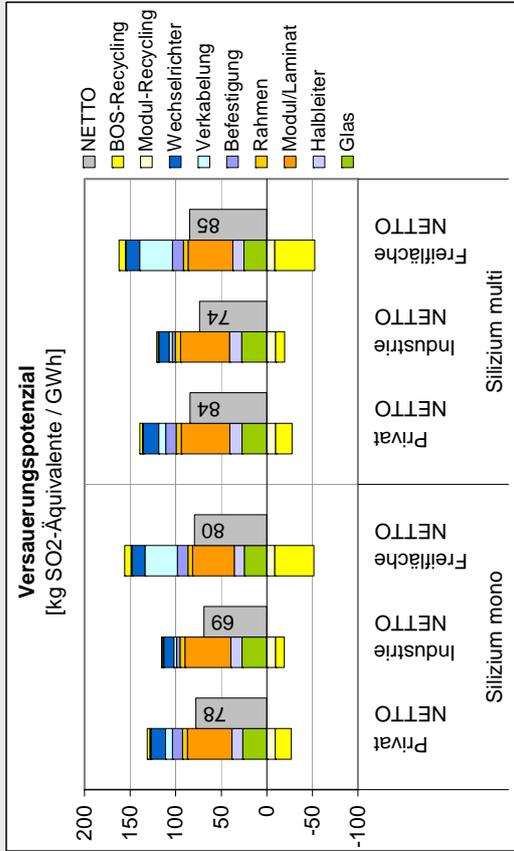
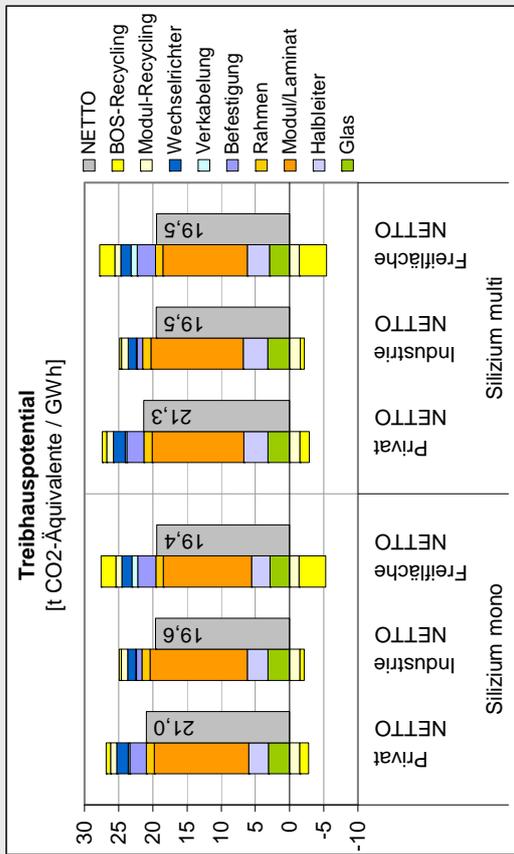
Herstellung in 2011, 2012 sowie mittelfristig zu erwartende Entwicklungen im Bereich gesteigerte Produktionseffizienz und Modul-Wirkungsgrade (Status quo Recycling)



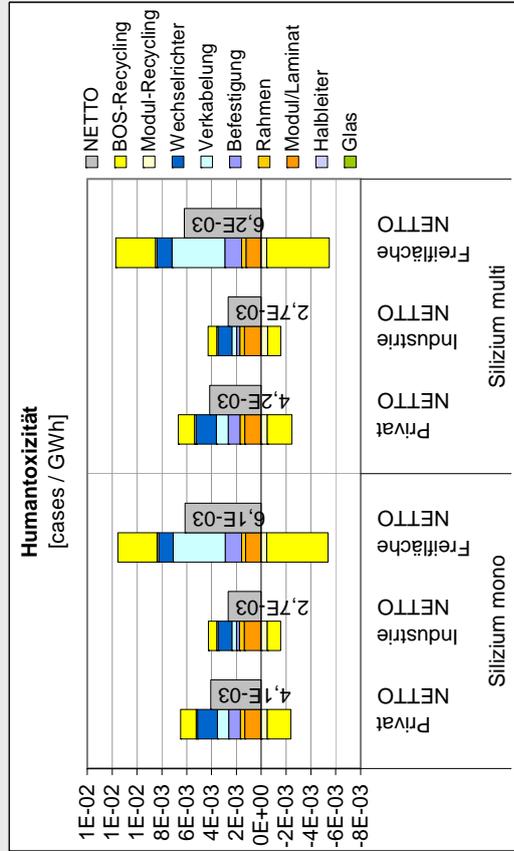
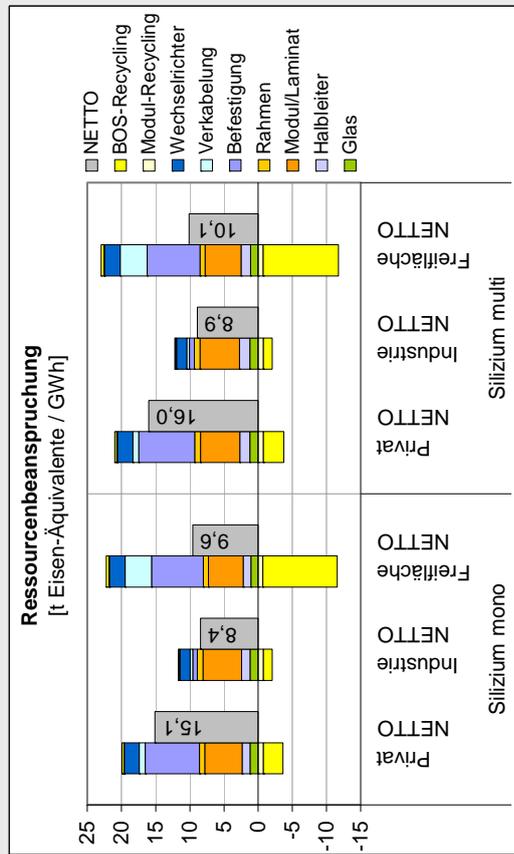
Fläche: 50 m², Neigung: 30°, Ausrichtung: Süd, Standort: Nürnberg, Lebensdauer: 30 Jahre

Abbildung A-4: Ergebnisse ausgewählter Wirkungskategorien für Silizium-basierte PV-Anlagen und den Anwendungsfall Aufdach-Privat – Technologieentwicklung für 30 jährigen Lebensweg ab Herstellung sowie mittelfristig zu erwartende Entwicklungen in den Bereichen gesteigerte Produktionseffizienz und Modul-Wirkungsgrade (jeweils Recycling-Option Status quo).

Anwendungsfälle von PV-Anlagen
Herstellung in 2012 mit minimaler Recycling-Option (Rec.SQ) in 2042



Anwendungsfälle: Aufdach-Privat, Großdach-Industriell und Freiflächenanlage
Modultyp: Silizium

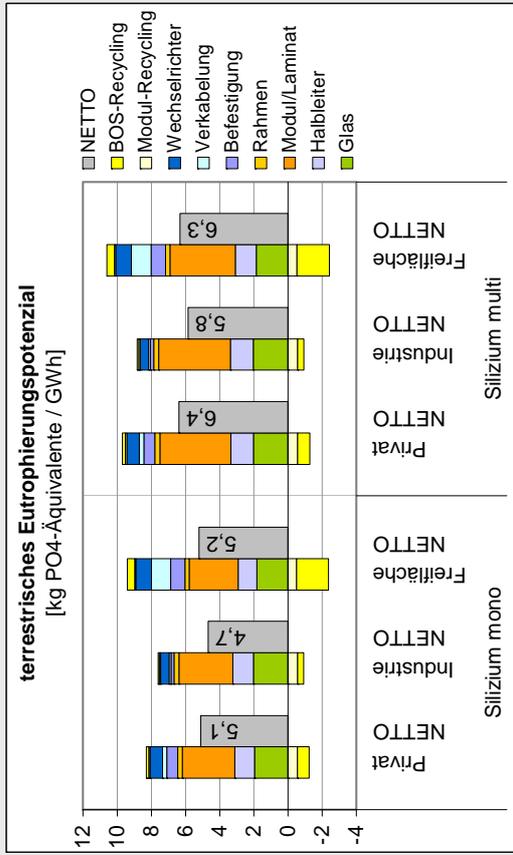


Privat: 50 m², 30°; Industriell: 1.500 m², 15°; Freifläche: 5 MWp, 30°; Ausrichtung: Süd, Standort: Nürnberg, Lebensdauer: 30 Jahre

Abbildung A-5: Ergebnisse ausgewählter Wirkungskategorien für Silizium-basierte PV-Anlagen – Vergleich der Anwendungsfälle Aufdach-Privat, Großdach-Industriell und Freiflächenanlage für 30 jährigen Lebensweg ab 2012 mit Recycling-Option min.

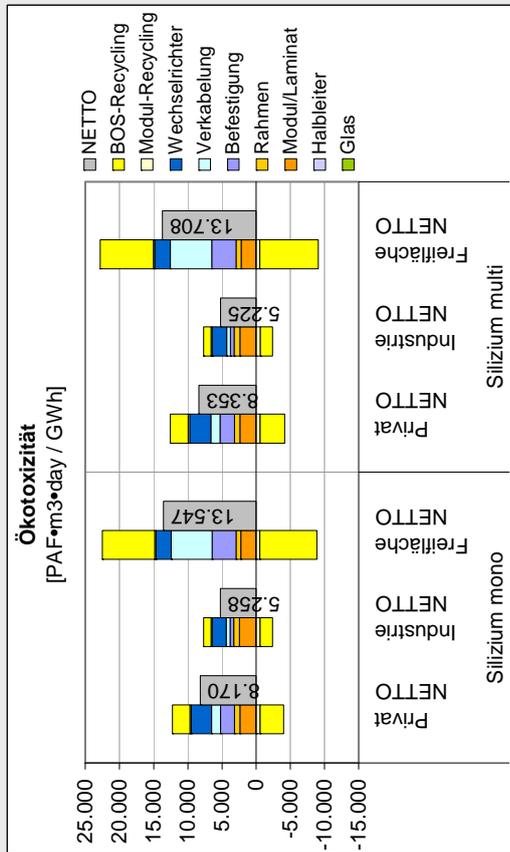
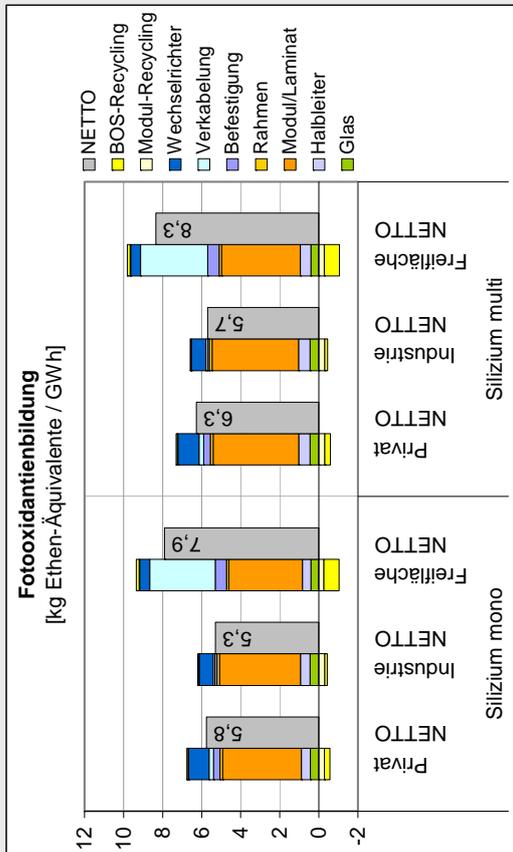
Modultyp: Silizium

Anwendungsfälle: Aufdach-Privat, Großdach-Industriell und Freiflächenanlage



Anwendungsfälle von PV-Anlagen

Herstellung in 2012 mit minimaler Recycling-Option (Rec.SQ) in 2042



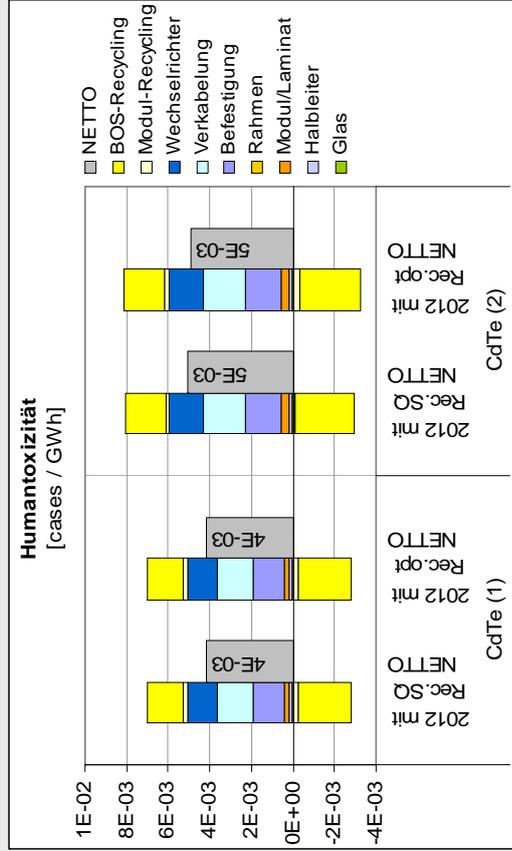
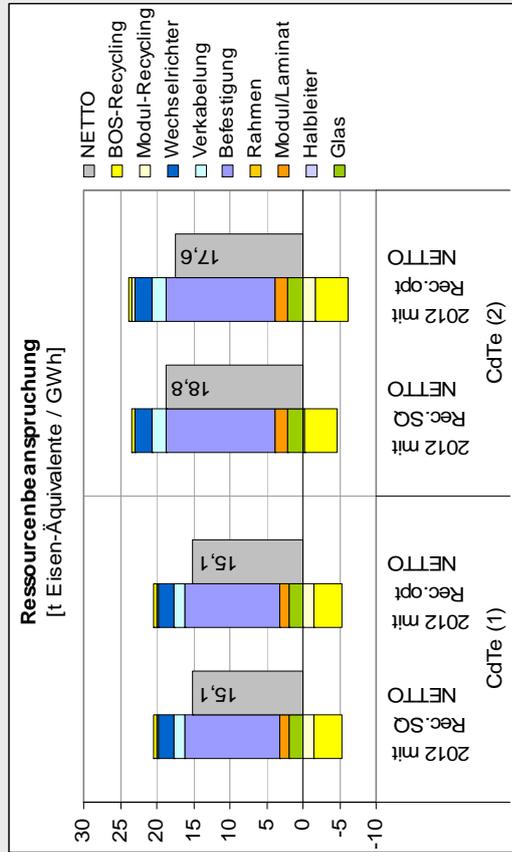
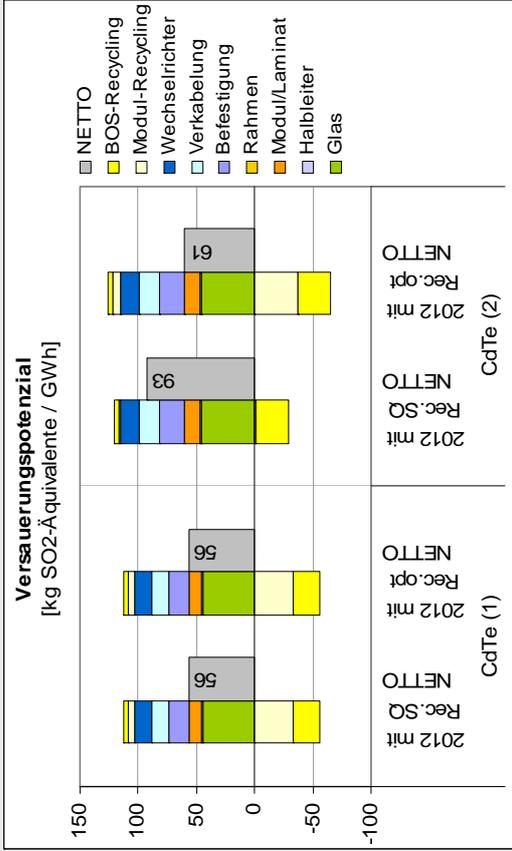
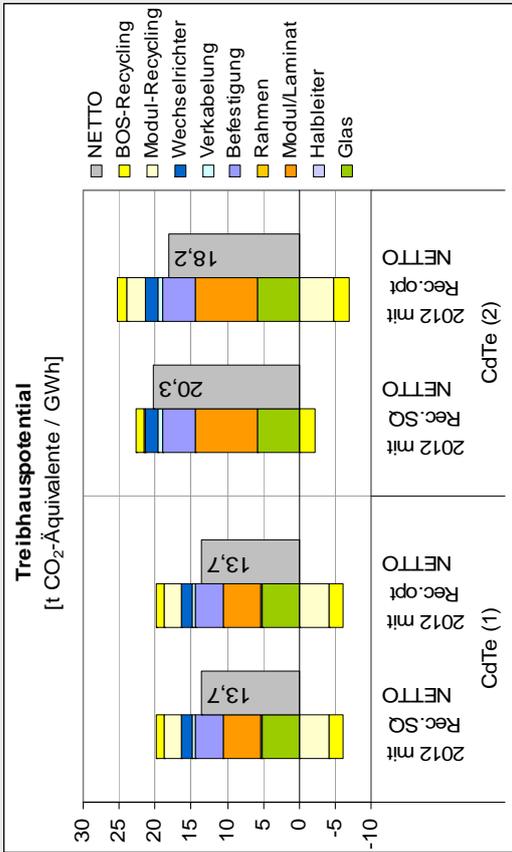
Privat: 50 m², 30°; Industriell: 1.500 m², 15°; Freifläche: 5 MWp, 30°; Ausrichtung: Süd, Standort: Nürnberg, Lebensdauer: 30 Jahre

Abbildung A-6: Ergebnisse ausgewählter Wirkungskategorien für Silizium-basierte PV-Anlagen – Vergleich der Anwendungsfälle Aufdach-Privat, Großdach-Industriell und Freiflächenanlage für 30 jährigen Lebensweg ab 2012 mit Recycling-Option min.

Herstellung, Nutzung und Recycling von PV-Anlagen

Herstellung in 2012 mit jeweils minimaler (Rec.SQ) und stofflich hochwertiger Recycling-Option (Rec.opt) in 2042

Modultyp: CdTe
Anwendungsfall: **Aufdach-Privat**



Fläche: 50 m², Neigung: 30°, Ausrichtung: Süd, Standort: Nürnberg, Lebensdauer: 30 Jahre

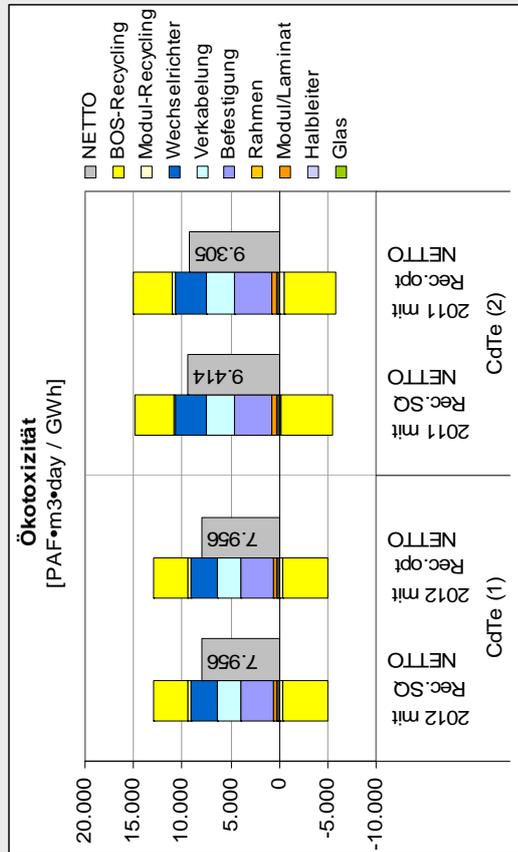
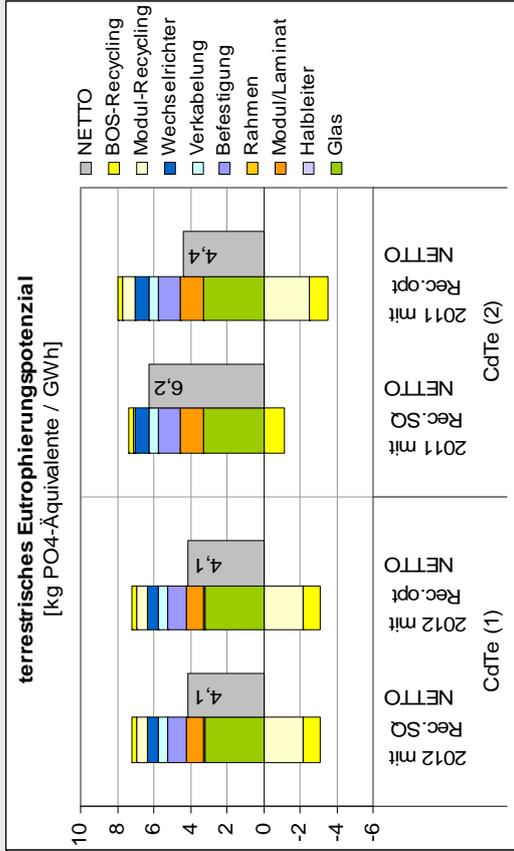
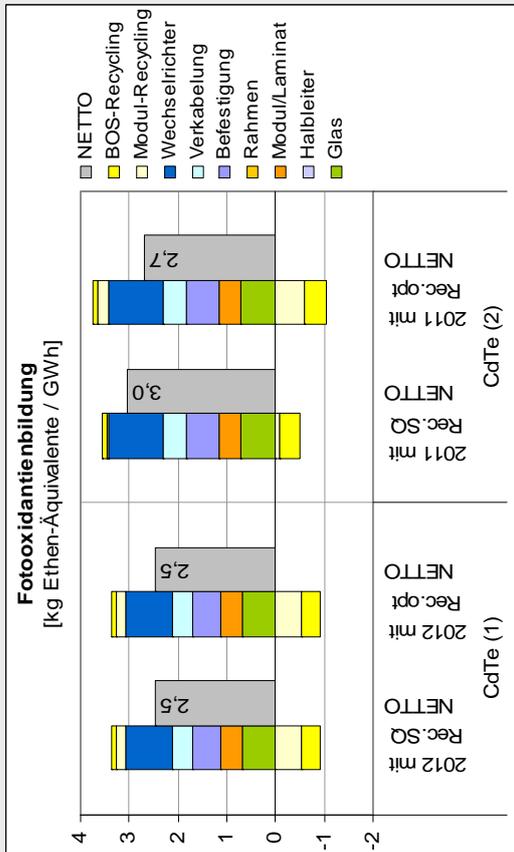
* Rec.SQ bei CdTe (1) bereits hochwertiges Recycling

Abbildung A-7: Ergebnisse ausgewählter Wirkungskategorien für CdTe-PV-Anlagen und den Anwendungsfall Aufdach-Privat – Lebensweg ab 2012 mit WEEE-konformer (Rec.SQ) und stofflich hochwertiger Recycling-Option (Rec.opt).

Herstellung, Nutzung und Recycling von PV-Anlagen

Herstellung in 2012 mit jeweils minimaler (Rec.SQ) und stofflich hochwertiger Recycling-Option (Rec.opt) in 2042

Modultyp: CdTe
Anwendungsfall: **Aufdach-Privat**



Fläche: 50 m², Neigung: 30°, Ausrichtung: Süd, Standort: Nürnberg, Lebensdauer: 30 Jahre

* Res.SQ bei CdTe (1) bereits hochwertiges Recycling

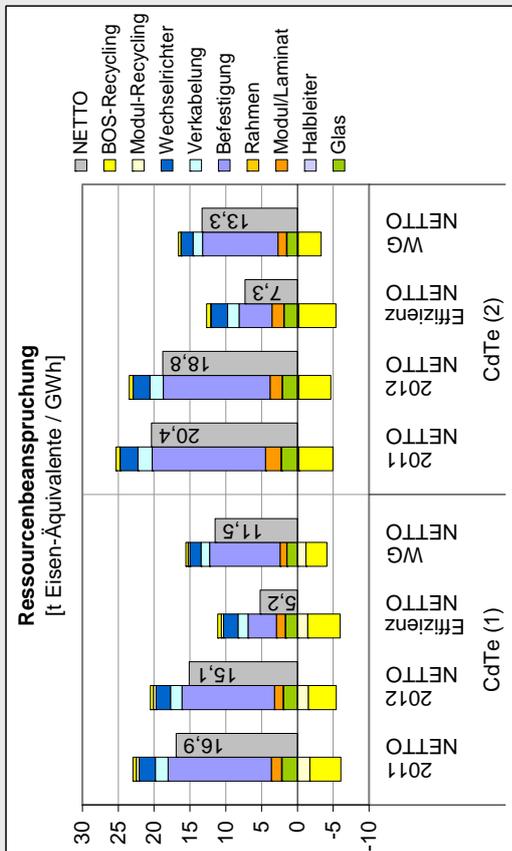
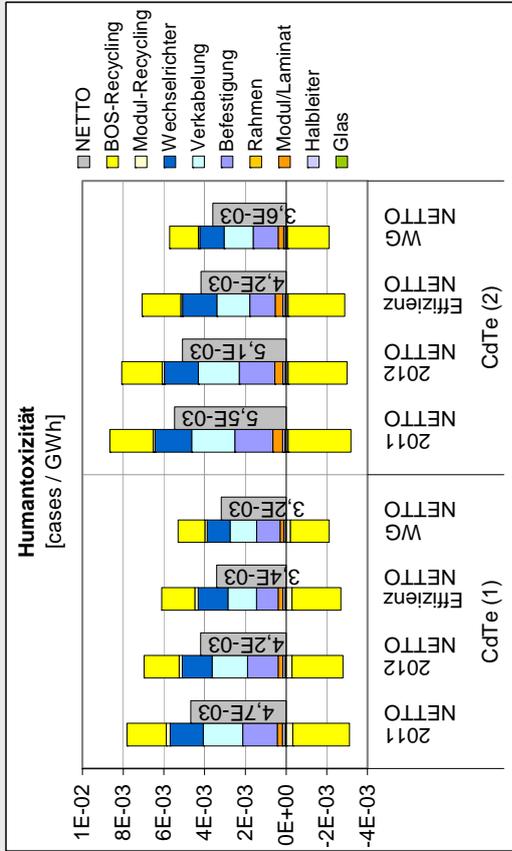
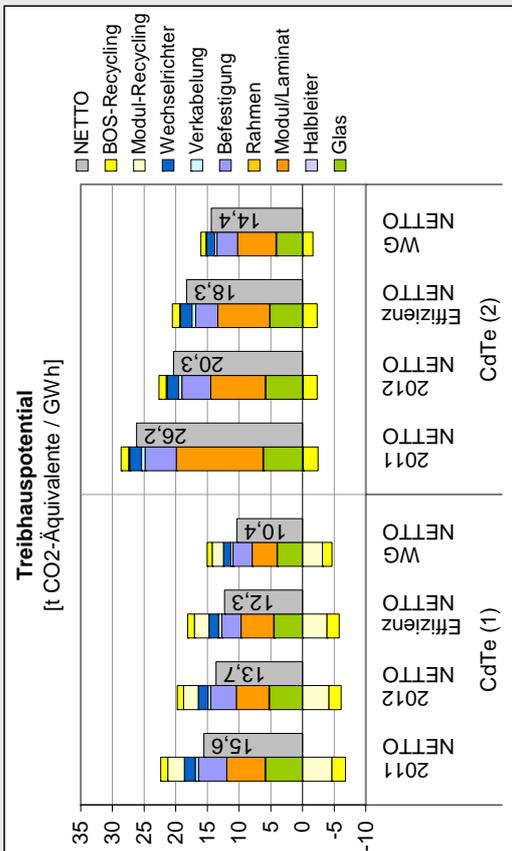
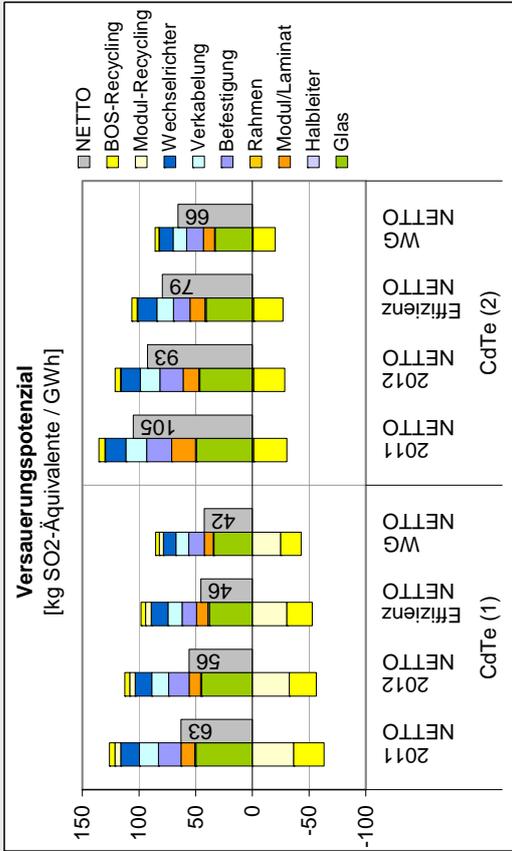
Abbildung A-8: Ergebnisse ausgewählter Wirkungskategorien für CdTe-PV-Anlagen und den Anwendungsfall Aufdach-Privat – Lebensweg ab 2012 mit WEEE-konformer (Rec.SQ) und stofflich hochwertiger Recycling-Option (Rec.opt).

Technologieentwicklung von PV-Anlagen

Herstellung in 2011, 2012 sowie mittelfristig zu erwartende Entwicklungen im Bereich gesteigerte Produktionseffizienz und Modul-Wirkungsgrade (Status quo Recycling)

Technologieentwicklung von PV-Anlagen

Herstellung in 2011, 2012 sowie mittelfristig zu erwartende Entwicklungen im Bereich gesteigerte Produktionseffizienz und Modul-Wirkungsgrade (Status quo Recycling)



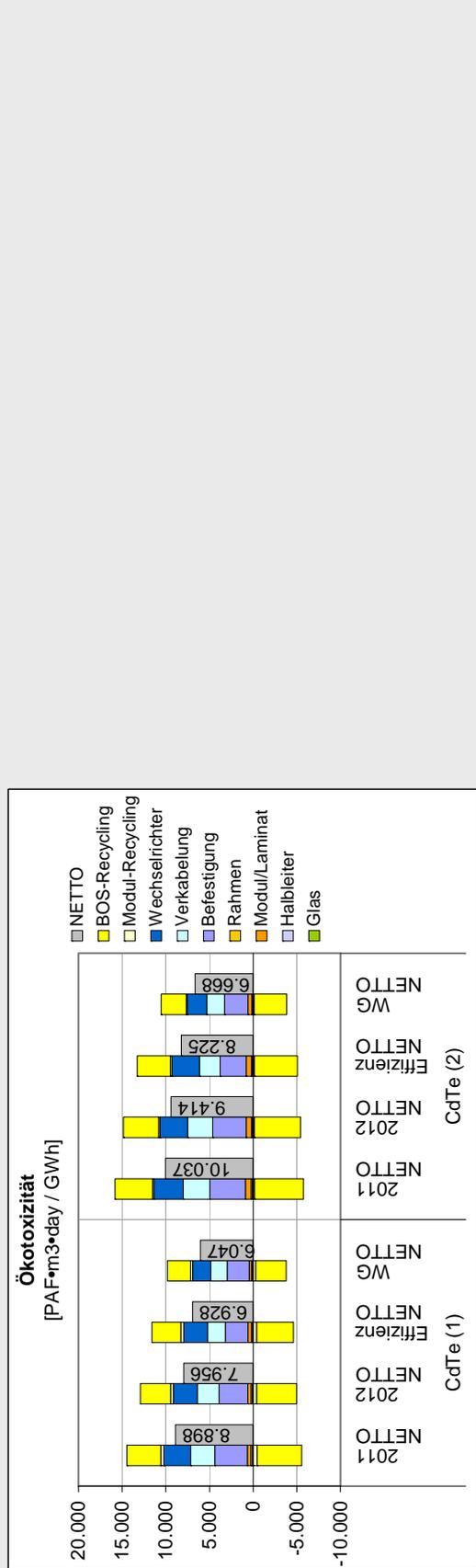
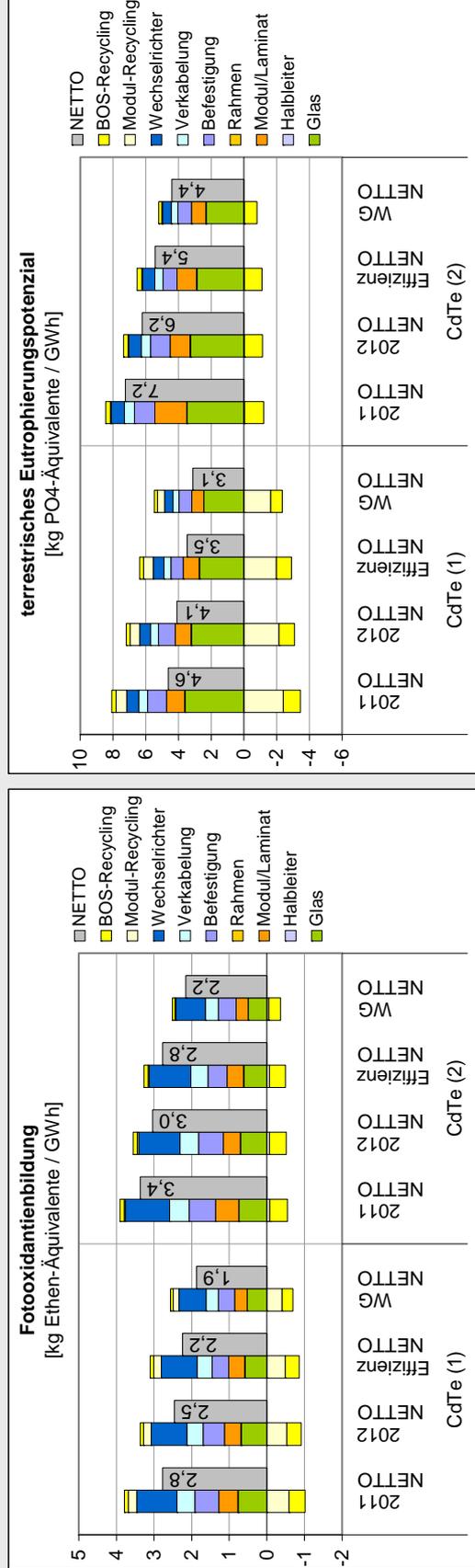
* Rec.SQ bei CdTe (1) bereits hochwertiges Recycling

Abbildung A-9: Ergebnisse ausgewählter Wirkungskategorien für CdTe-PV-Anlagen und den Anwendungsfall Aufdach-Privat – Technologieentwicklung für 30 jährigen Lebensweg ab Herstellung sowie mittelfristig zu erwartende Entwicklungen in den Bereichen gesteigerte Produktionseffizienz und Modul-Wirkungsgrade (jeweils WEEE-konformes Recycling).

Fläche: 50 m², Neigung: 30°, Ausrichtung: Süd, Standort: Nürnberg, Lebensdauer: 30 Jahre

Technologieentwicklung von PV-Anlagen

Herstellung in 2011, 2012 sowie mittelfristig zu erwartende Entwicklungen im Bereich gesteigerte Produktionseffizienz und Modul-Wirkungsgrade (Status quo Recycling)

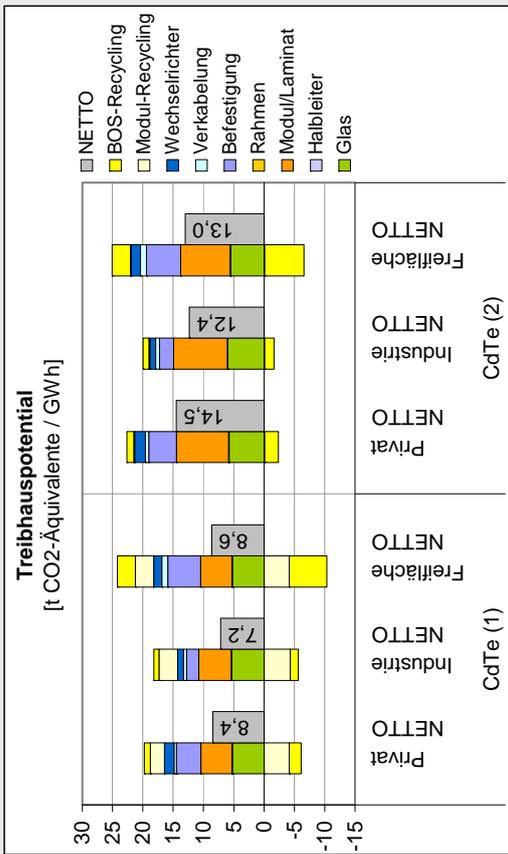


* Rec.SQ bei CdTe (1) bereits hochwertiges Recycling

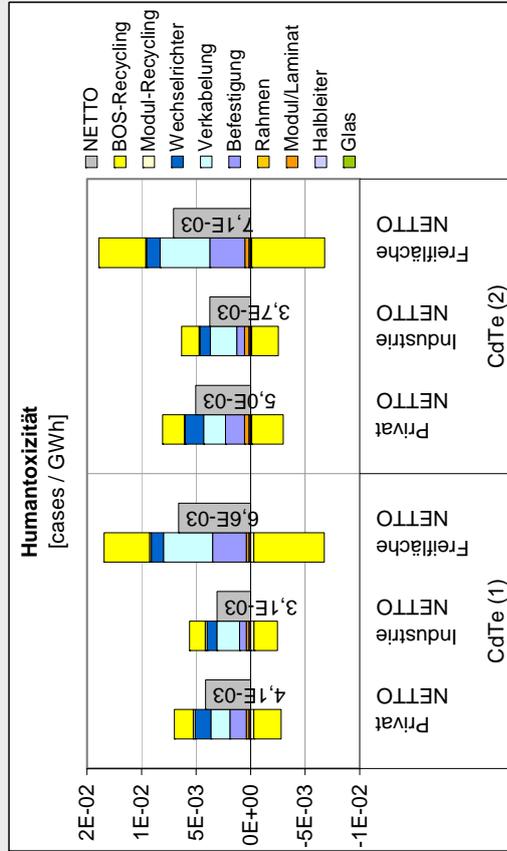
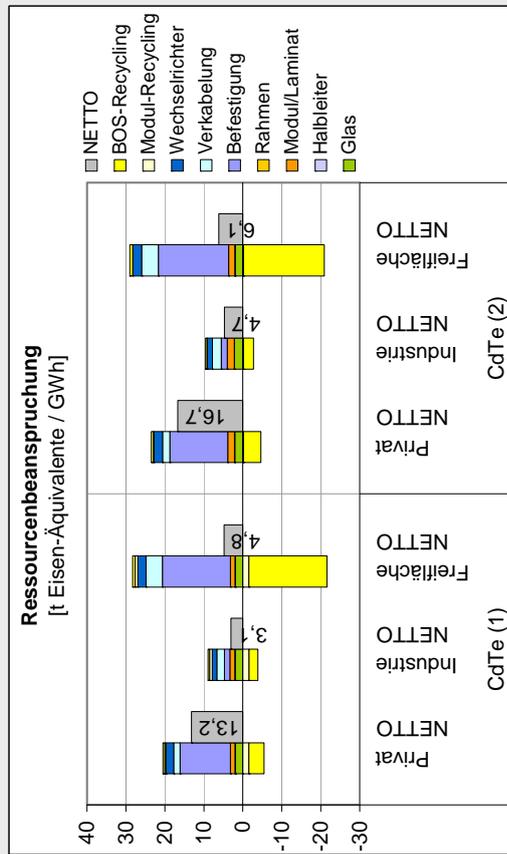
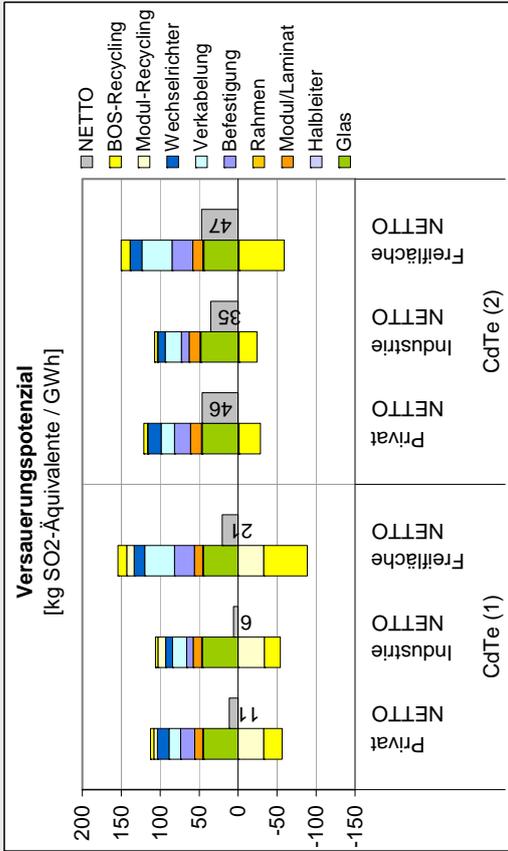
Abbildung A-10: Ergebnisse ausgewählter Wirkungskategorien für CdTe-PV-Anlagen und den Anwendungsfall Aufdach-Privat – Technologieentwicklung für 30 jährigen Lebensweg ab Herstellung sowie mittelfristig zu erwartende Entwicklungen in den Bereichen gesteigerte Produktionseffizienz und Modul-Wirkungsgrade (jeweils WEEE-konformes Recycling).

Fläche: 50 m², Neigung: 30°, Ausrichtung: Süd, Standort: Nürnberg, Lebensdauer: 30 Jahre

Anwendungsfälle von PV-Anlagen
 Herstellung in 2012 mit minimaler Recycling-Option (Rec.SQ) in 2042



Anwendungsfälle: Aufdach-Privat, Großdach-Industriell und Freiflächenanlage
 Modultyp: CdTe

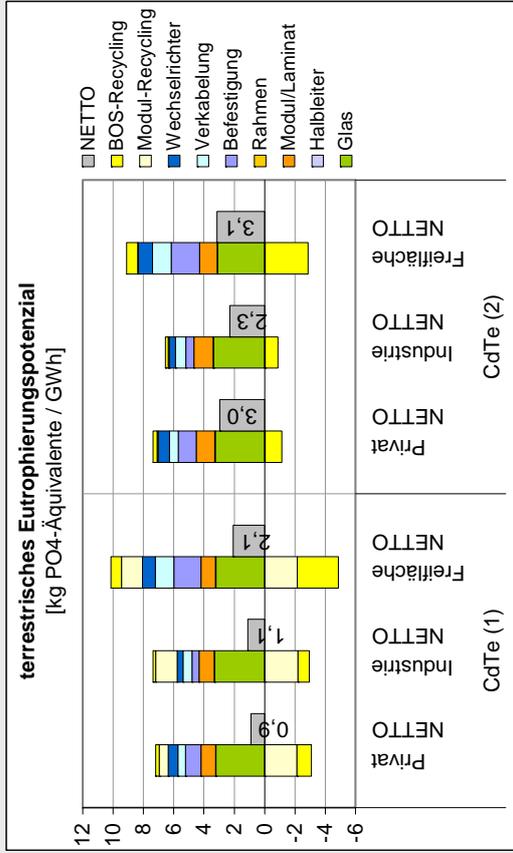


* Rec.SQ bei CdTe (1) bereits Rec.opt Privat: 50 m², 30°; Industriell: 1.500 m², 15°; Freifläche: 5 MWp, 30°; Ausrichtung: Süd, Standort: Nürnberg, Lebensdauer: 30 Jahre

Abbildung A-11: Ergebnisse ausgewählter Wirkungskategorien für CdTe-PV-Anlagen – Vergleich der Anwendungsfälle Aufdach-Privat, Großdach-Industriell und Freiflächenanlage für 30 jährigen Lebensweg ab 2012 mit Recycling-Option min.

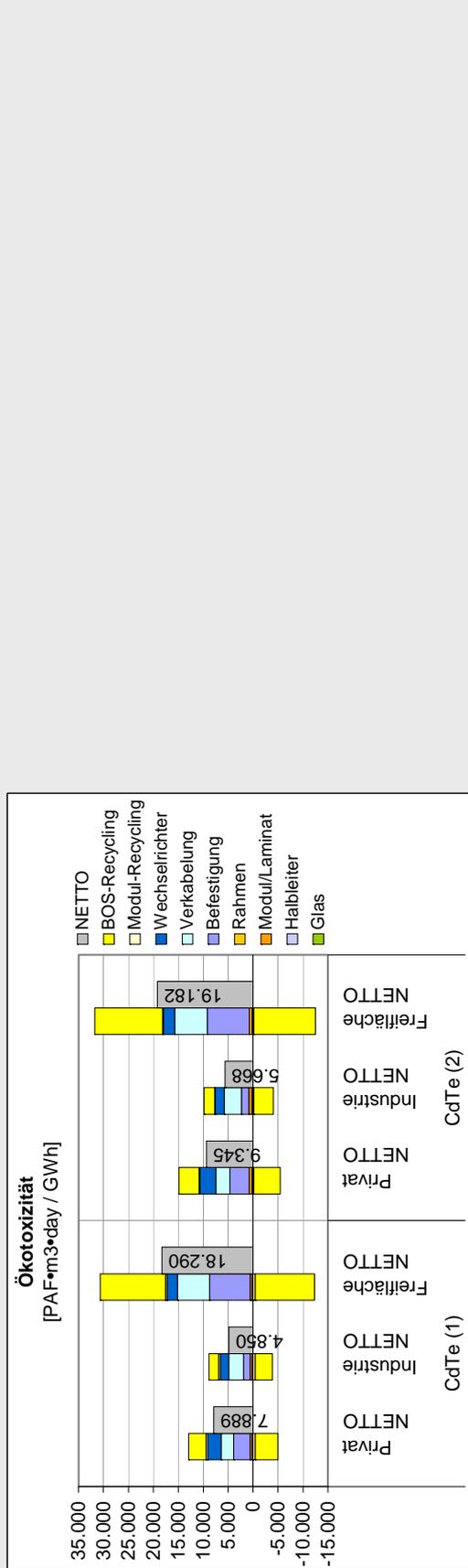
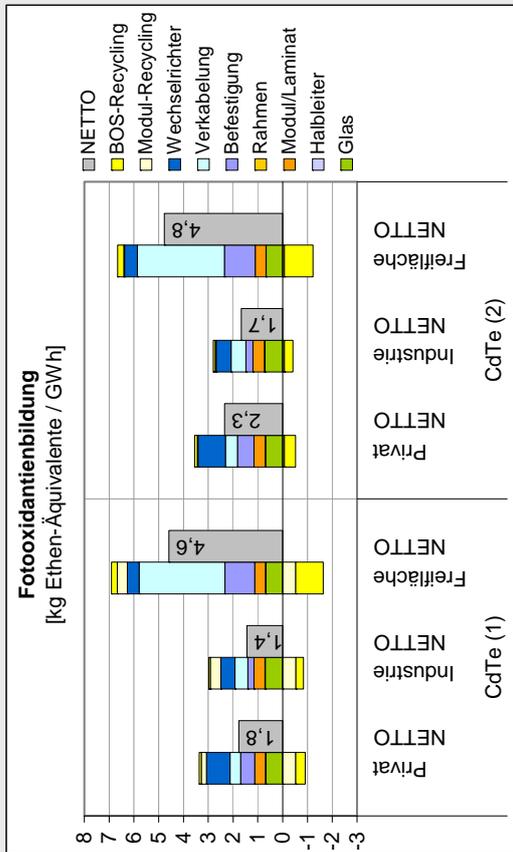
Modultyp: CdTe

Anwendungsfälle: Aufdach-Privat, Großdach-Industriell und Freiflächenanlage



Anwendungsfälle von PV-Anlagen

Herstellung in 2012 mit minimaler Recycling-Option (Rec.SQ) in 2042



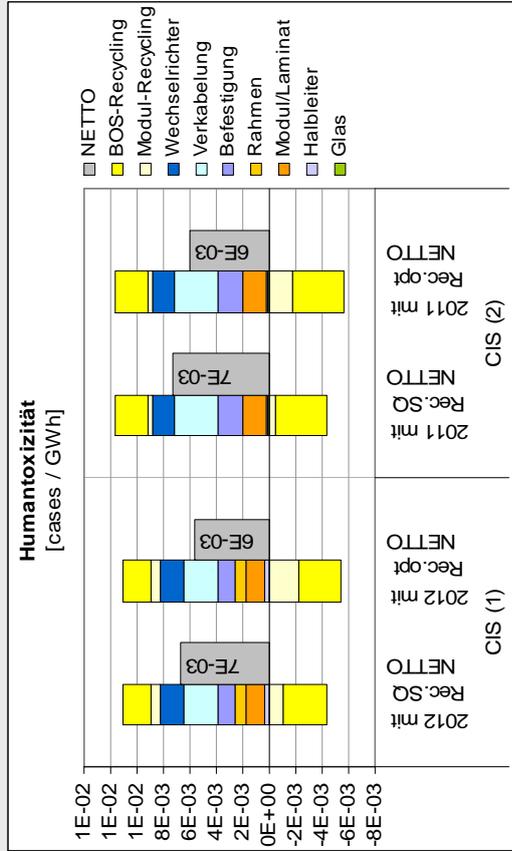
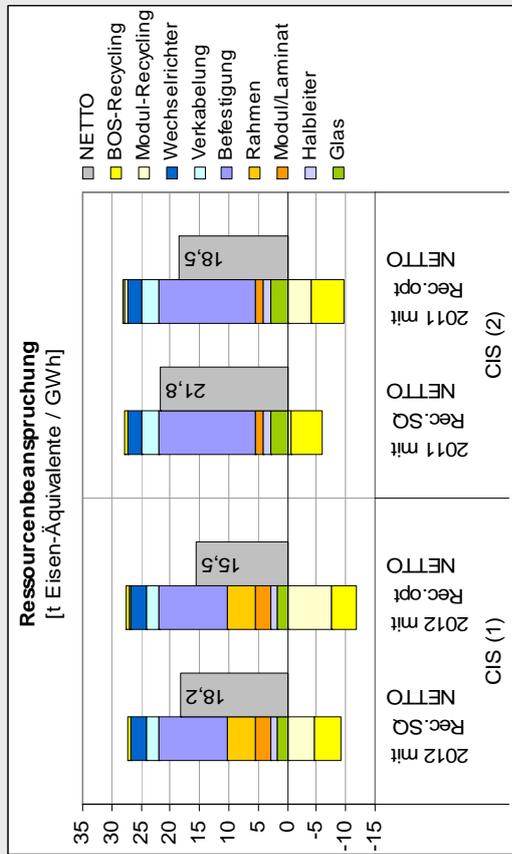
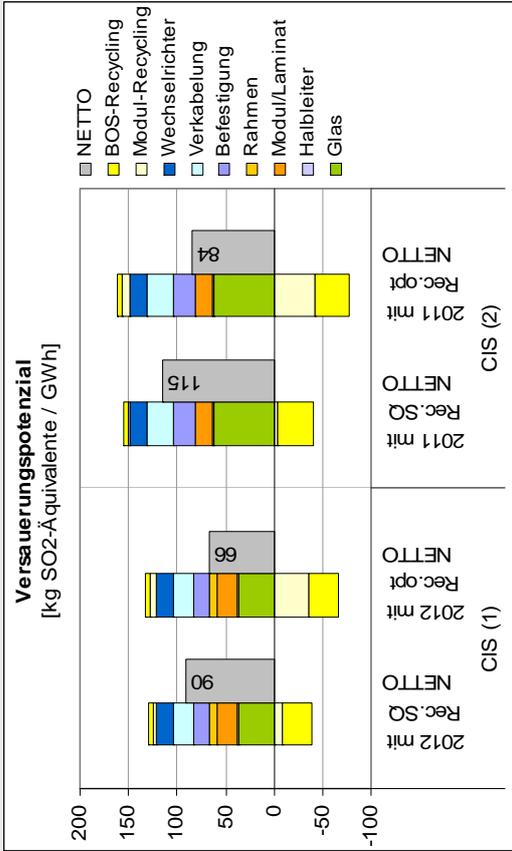
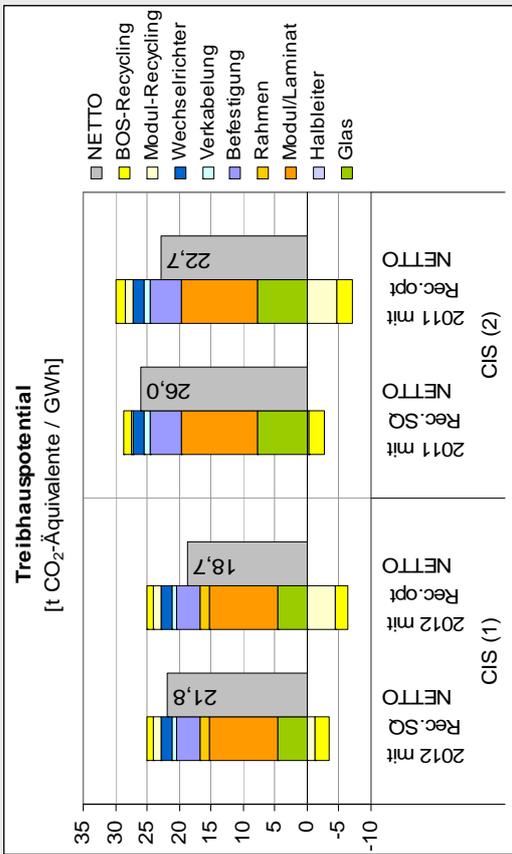
* Rec.SQ bei CdTe (1) bereits Rec.opt Privat: 50 m², 30°; Industriell: 1.500 m², 15°; Freifläche: 5 MWp, 30°; Ausrichtung: Süd, Standort: Nürnberg, Lebensdauer: 30 Jahre

Abbildung A-12: Ergebnisse ausgewählter Wirkungskategorien für CdTe-PV-Anlagen – Vergleich der Anwendungsfälle Aufdach-Privat, Großdach-Industriell und Freiflächenanlage für 30 jährigen Lebensweg ab 2012 mit Recycling-Option min.

Herstellung, Nutzung und Recycling von PV-Anlagen

Herstellung in 2012/11 mit jeweils minimaler (Rec.SQ) und stofflich hochwertiger Recycling-Option (Rec.opt) in 2042/41

Modultyp: CIS
Anwendungsfall: **Aufdach-Privat**

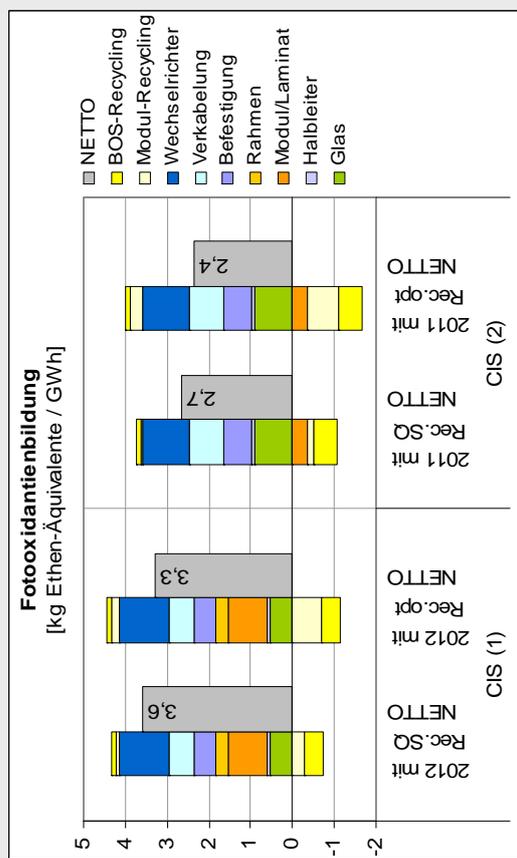


Fläche: 50 m², Neigung: 30°, Ausrichtung: Süd, Standort: Nürnberg, Lebensdauer: 30 Jahre

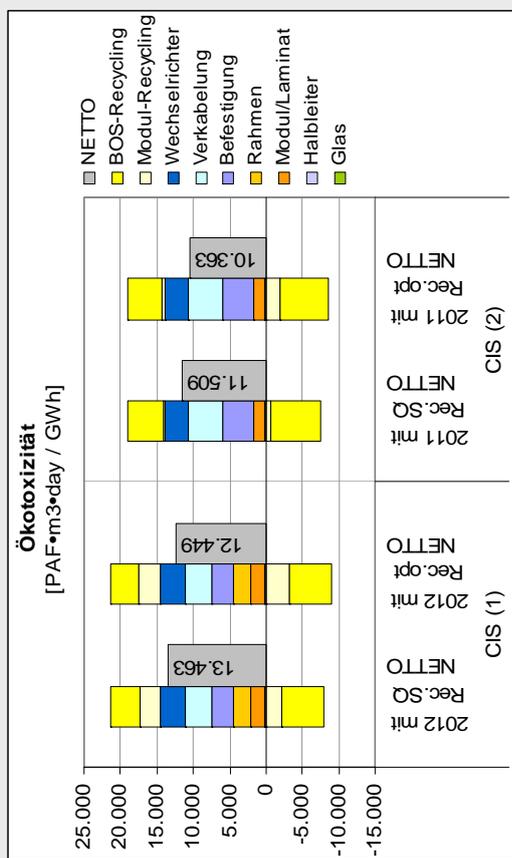
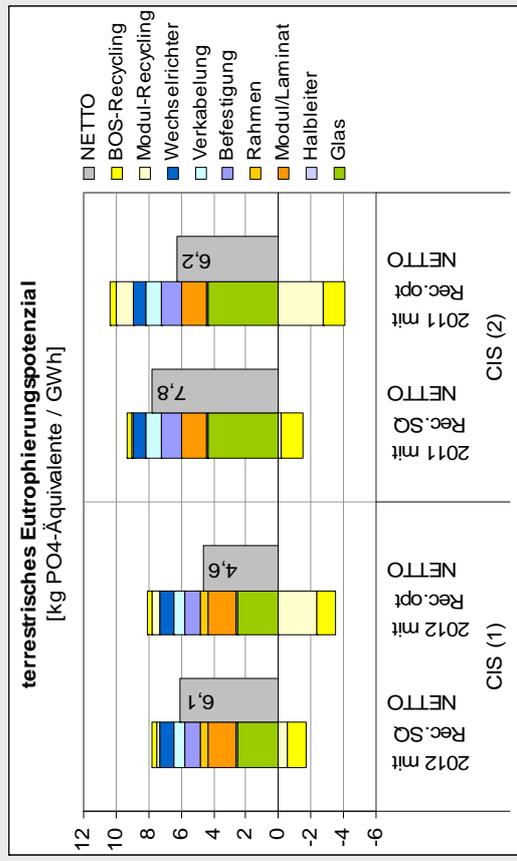
Abbildung A-13: Ergebnisse ausgewählter Wirkungskategorien für CIS-PV-Anlagen und den Anwendungsfall Aufdach-Privat – Lebensweg ab 2012 mit WEEE-konformer (Rec.SQ) und stofflich hochwertiger Recycling-Option (Rec.opt).

Herstellung, Nutzung und Recycling von PV-Anlagen

Herstellung in 2012 mit jeweils minimaler (Rec.SQ) und stofflich hochwertiger Recycling-Option (Rec.opt) in 2042



Modultyp: CIS
Anwendungsfall: **Aufdach-Privat**



Fläche: 50 m², Neigung: 30°, Ausrichtung: Süd, Standort: Nürnberg, Lebensdauer: 30 Jahre

Abbildung A-14: Ergebnisse ausgewählter Wirkungskategorien für CIS-PV-Anlagen und den Anwendungsfall Aufdach-Privat – Lebensweg ab 2012 mit WEEE-konformer (Rec.SQ) und stofflich hochwertiger Recycling-Option (Rec.opt).

Technologieentwicklung von PV-Anlagen

Herstellung in 2011, 2012 sowie mittelfristig zu erwartende Entwicklungen im Bereich gesteigerte Produktionseffizienz und Modul-Wirkungsgrade (Status quo Recycling)

Technologieentwicklung von PV-Anlagen

Herstellung in 2011, 2012 sowie mittelfristig zu erwartende Entwicklungen im Bereich gesteigerte Produktionseffizienz und Modul-Wirkungsgrade (Status quo Recycling)

Technologieentwicklung von PV-Anlagen

Herstellung in 2011, 2012 sowie mittelfristig zu erwartende Entwicklungen im Bereich gesteigerte Produktionseffizienz und Modul-Wirkungsgrade (Status quo Recycling)

Technologieentwicklung von PV-Anlagen

Herstellung in 2011, 2012 sowie mittelfristig zu erwartende Entwicklungen im Bereich gesteigerte Produktionseffizienz und Modul-Wirkungsgrade (Status quo Recycling)

Technologieentwicklung von PV-Anlagen

Herstellung in 2011, 2012 sowie mittelfristig zu erwartende Entwicklungen im Bereich gesteigerte Produktionseffizienz und Modul-Wirkungsgrade (Status quo Recycling)

Technologieentwicklung von PV-Anlagen

Herstellung in 2011, 2012 sowie mittelfristig zu erwartende Entwicklungen im Bereich gesteigerte Produktionseffizienz und Modul-Wirkungsgrade (Status quo Recycling)

Technologieentwicklung von PV-Anlagen

Herstellung in 2011, 2012 sowie mittelfristig zu erwartende Entwicklungen im Bereich gesteigerte Produktionseffizienz und Modul-Wirkungsgrade (Status quo Recycling)

Technologieentwicklung von PV-Anlagen

Herstellung in 2011, 2012 sowie mittelfristig zu erwartende Entwicklungen im Bereich gesteigerte Produktionseffizienz und Modul-Wirkungsgrade (Status quo Recycling)

Technologieentwicklung von PV-Anlagen

Herstellung in 2011, 2012 sowie mittelfristig zu erwartende Entwicklungen im Bereich gesteigerte Produktionseffizienz und Modul-Wirkungsgrade (Status quo Recycling)

Technologieentwicklung von PV-Anlagen

Herstellung in 2011, 2012 sowie mittelfristig zu erwartende Entwicklungen im Bereich gesteigerte Produktionseffizienz und Modul-Wirkungsgrade (Status quo Recycling)

Technologieentwicklung von PV-Anlagen

Herstellung in 2011, 2012 sowie mittelfristig zu erwartende Entwicklungen im Bereich gesteigerte Produktionseffizienz und Modul-Wirkungsgrade (Status quo Recycling)

Technologieentwicklung von PV-Anlagen

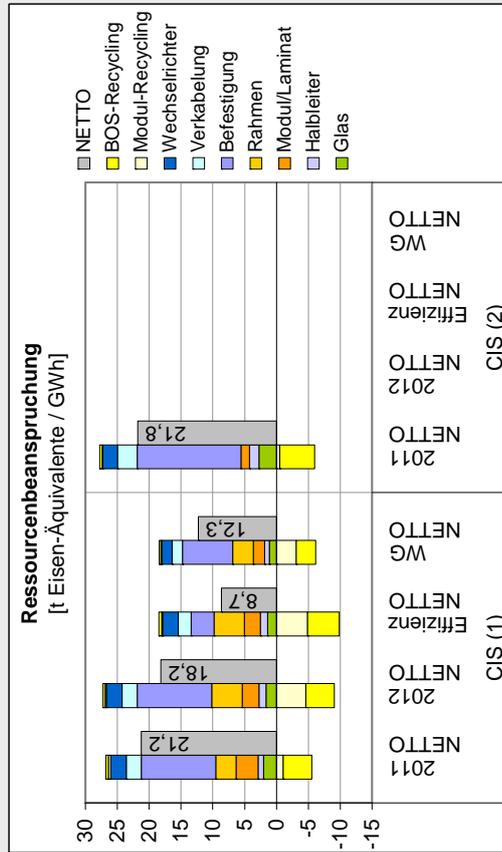
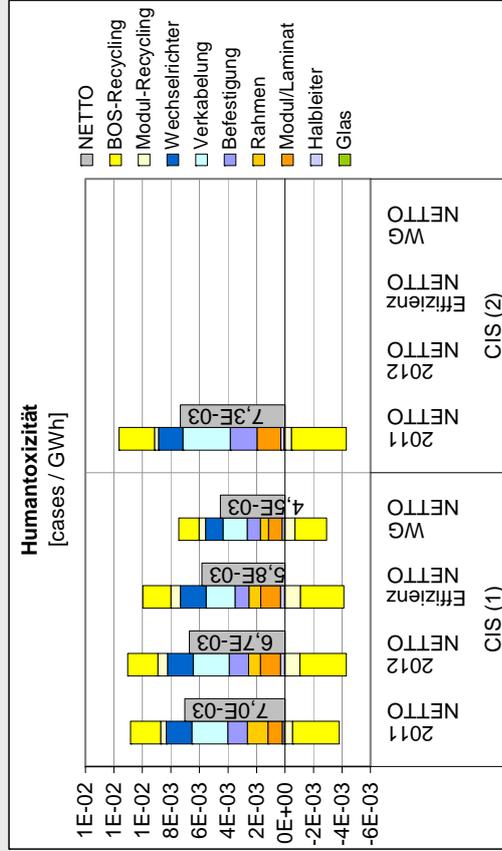
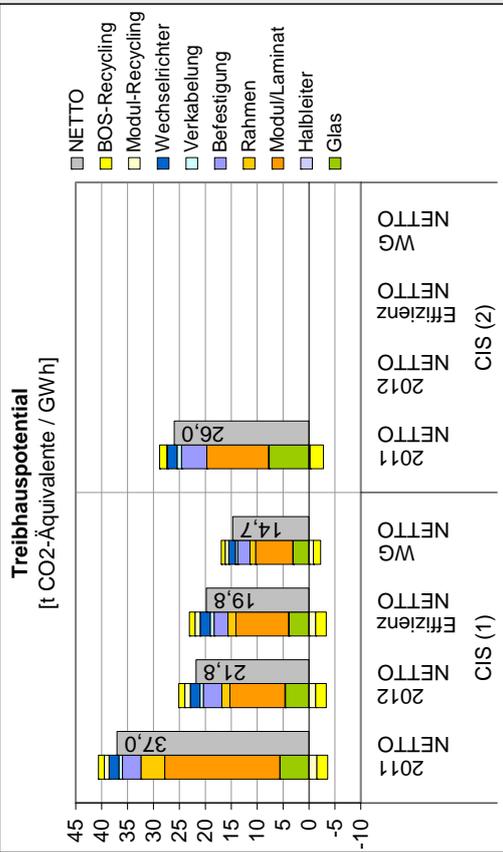
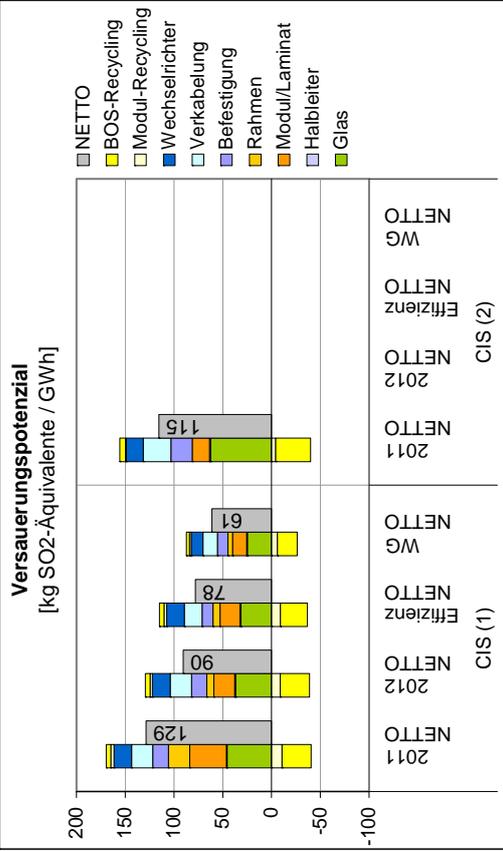
Herstellung in 2011, 2012 sowie mittelfristig zu erwartende Entwicklungen im Bereich gesteigerte Produktionseffizienz und Modul-Wirkungsgrade (Status quo Recycling)

Technologieentwicklung von PV-Anlagen

Herstellung in 2011, 2012 sowie mittelfristig zu erwartende Entwicklungen im Bereich gesteigerte Produktionseffizienz und Modul-Wirkungsgrade (Status quo Recycling)

Technologieentwicklung von PV-Anlagen

Herstellung in 2011, 2012 sowie mittelfristig zu erwartende Entwicklungen im Bereich gesteigerte Produktionseffizienz und Modul-Wirkungsgrade (Status quo Recycling)



Fläche: 50 m², Neigung: 30°, Ausrichtung: Süd, Standort: Nürnberg, Lebensdauer: 30 Jahre

Abbildung A-15: Ergebnisse ausgewählter Wirkungskategorien für CIS-PV-Anlagen und den Anwendungsfall Aufdach-Privat – Technologieentwicklung für 30 jährigen Lebensweg ab Herstellung sowie mittelfristig zu erwartende Entwicklungen in den Bereichen gesteigerte Produktionseffizienz und Modul-Wirkungsgrade (jeweils WEEE-konformes Recycling).

Technologieentwicklung von PV-Anlagen

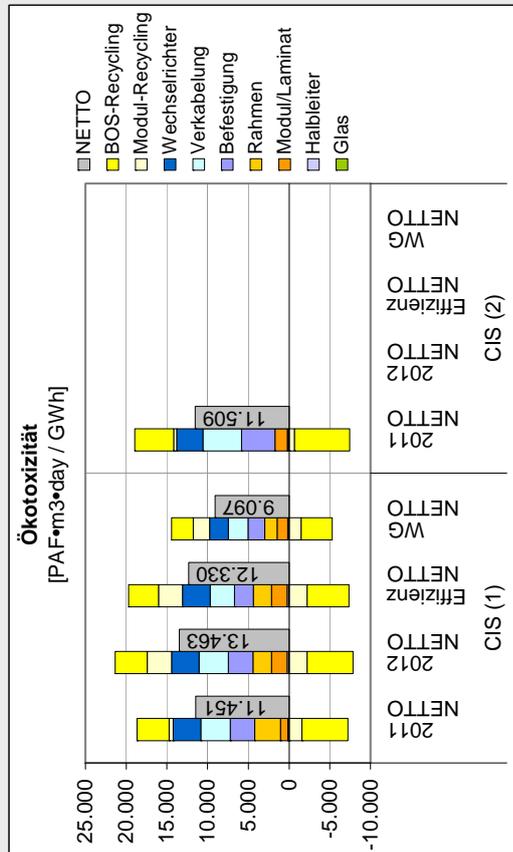
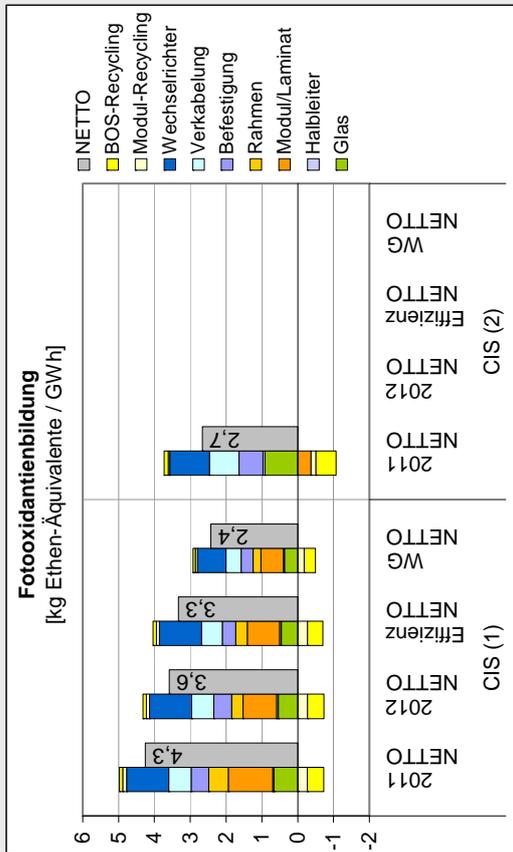
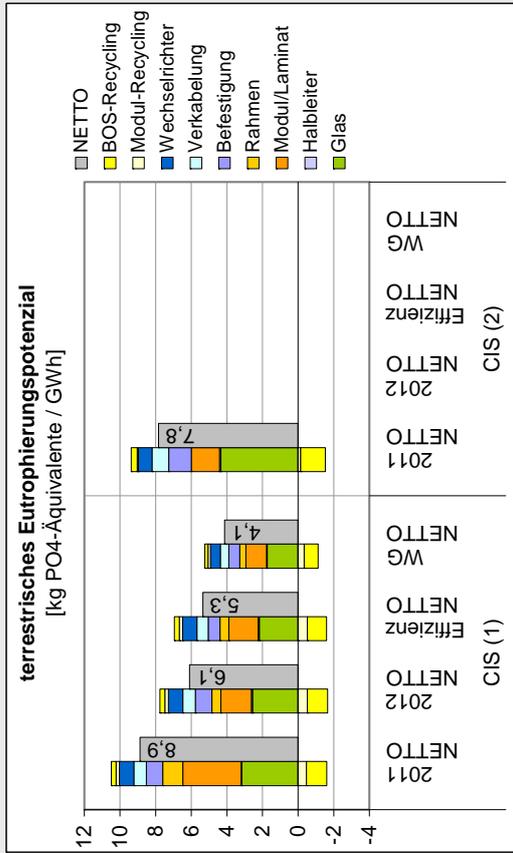
Herstellung in 2011, 2012 sowie mittelfristig zu erwartende Entwicklungen im Bereich gesteigerte Produktionseffizienz und Modul-Wirkungsgrade (Status quo Recycling)

Technologieentwicklung von PV-Anlagen

Herstellung in 2011, 2012 sowie mittelfristig zu erwartende Entwicklungen im Bereich gesteigerte Produktionseffizienz und Modul-Wirkungsgrade (Status quo Recycling)

Modultyp: CIS / Anwendungsfall: Aufdach-Privat

Modultyp: CIS / Anwendungsfall: Aufdach-Privat



Fläche: 50 m², Neigung: 30°, Ausrichtung: Süd, Standort: Nürnberg, Lebensdauer: 30 Jahre

Abbildung A-16: Ergebnisse ausgewählter Wirkungskategorien für CIS-PV-Anlagen und den Anwendungsfall Aufdach-Privat – Technologieentwicklung für 30 jährigen Lebensweg ab Herstellung sowie mittelfristig zu erwartende Entwicklungen in den Bereichen gesteigerte Produktionseffizienz und Modul-Wirkungsgrade (jeweils WEEE-konformes Recycling).

Anwendungsfälle von PV-Anlagen
 Modultyp: CIS
 Herstellung in 2012/2011 mit minimaler Recycling-Option (Rec.SQ) in 2041/2042
 Anwendungsfälle: Aufdach-Privat, Großdach-Industriell und Freiflächenanlage

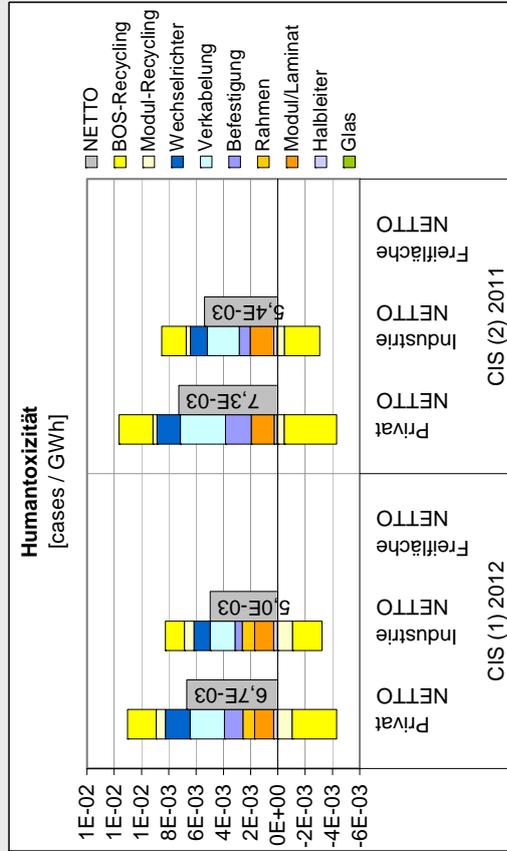
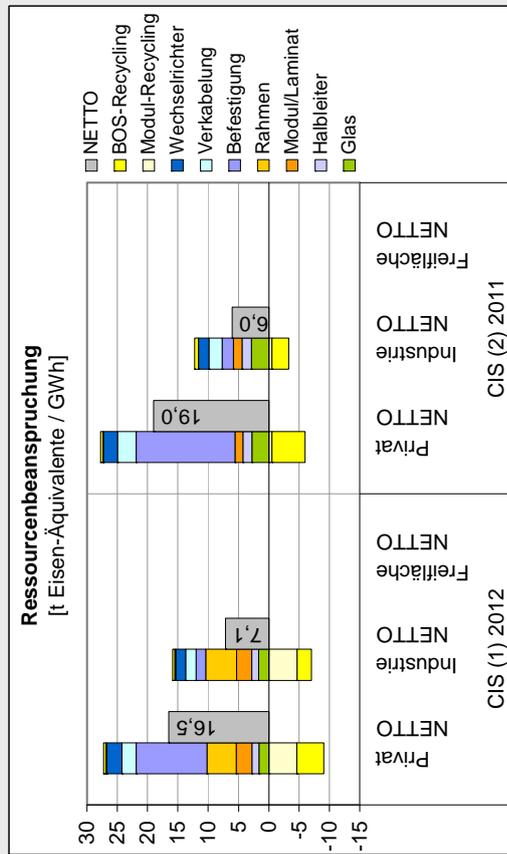
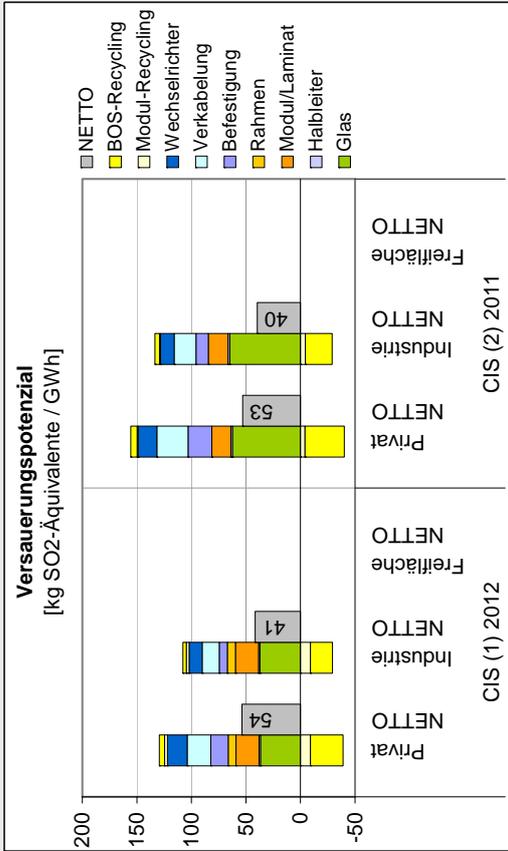
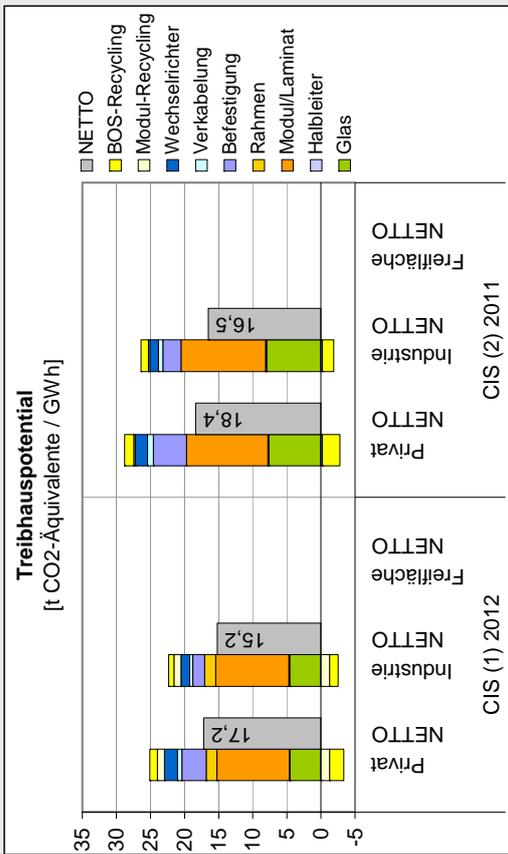
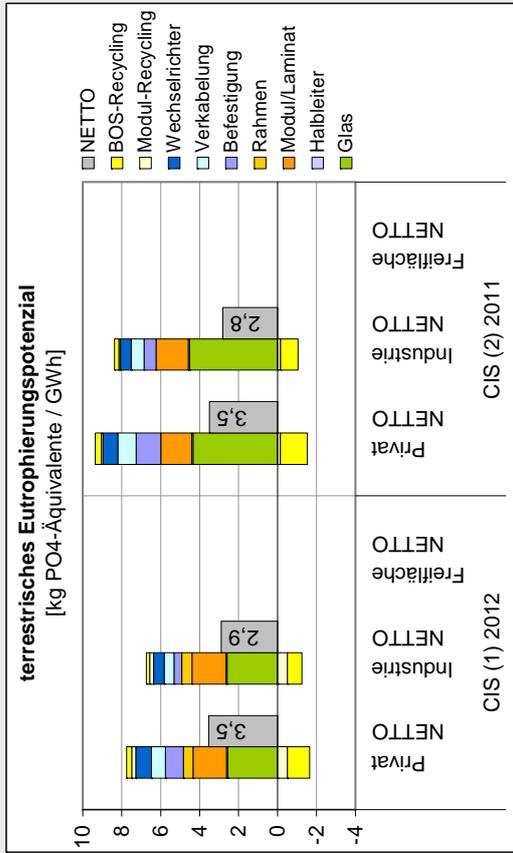


Abbildung A-17: Ergebnisse ausgewählter Wirkungskategorien für CIS-PV-Anlagen – Vergleich der Anwendungsfälle Aufdach-Privat, Großdach-Industriell und Freiflächenanlage für 30-jährigen Lebensweg ab 2012/2011 mit Recycling-Option min.
 Privat: 50 m², 30°, Industriell: 1.500 m², 15°, Freifläche: 5 MWp, 30°, Ausrichtung: Süd, Standort: Nürnberg, Lebensdauer: 30 Jahre

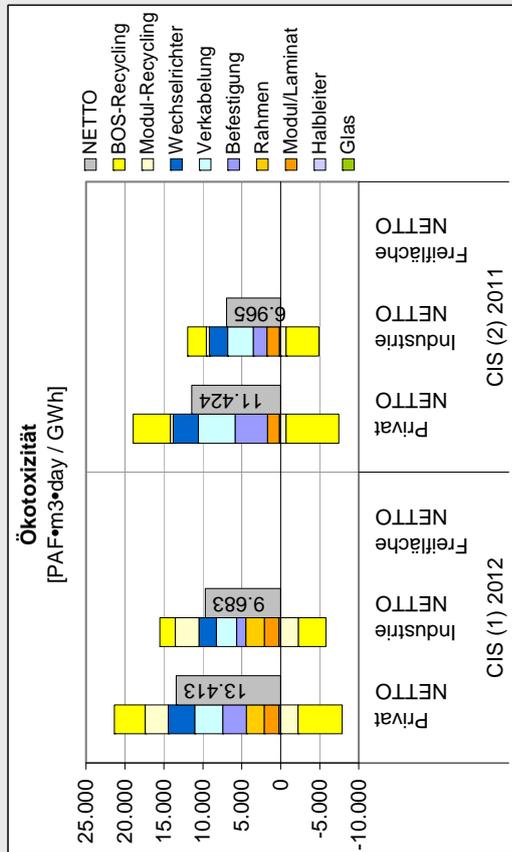
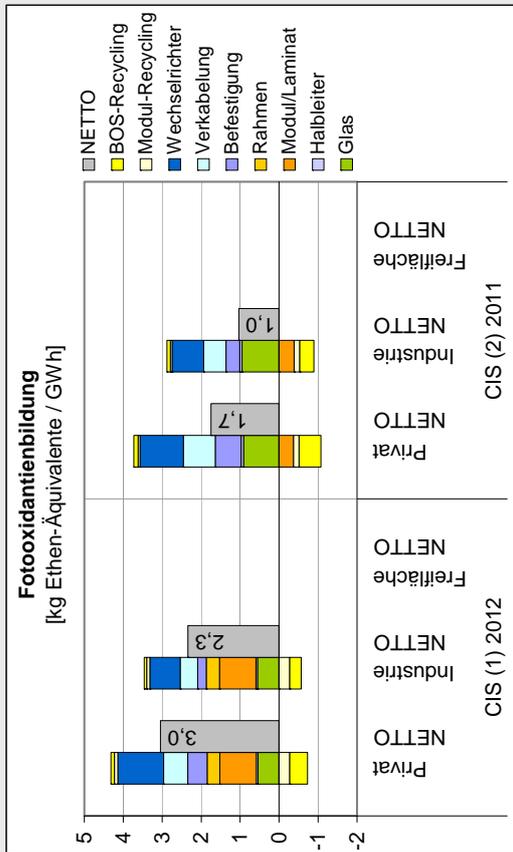
Modultyp: CIS

Anwendungsfälle: **Aufdach-Privat, Großdach-Industriell und Freiflächenanlage**



Anwendungsfälle von PV-Anlagen

Herstellung in 2012/2011 mit minimaler Recycling-Option (Rec.SQ) in 2041/2042



Privat: 50 m², 30°; Industriell: 1.500 m², 15°; Freifläche: 5 MWp, 30°; Ausrichtung: Süd, Standort: Nürnberg, Lebensdauer: 30 Jahre

Abbildung A-18: Ergebnisse ausgewählter Wirkungskategorien für CIS-PV-Anlagen – Vergleich der Anwendungsfälle Aufdach-Privat, Großdach-Industriell und Freiflächenanlage für 30 jährigen Lebensweg ab 2012/2011 mit Recycling-Option min.

bifa Umweltinstitut GmbH

Am Mittleren Moos 46

86167 Augsburg

Tel. +49 821 7000-0

Fax. +49 821 7000-100

www.bifa.de