

Sabine Greßler,
Florian Part, Anna Pavlicek*,
Daniela Fuchs, Markus Scharber,
Niyazi Serdar Sarıçiftçi,
Valerie Rodin, Simon Moser,
Johannes Lindorfer,
Eva-Kathrin Ehmoser

Zusammenfassung

Um die ökologische Nachhaltigkeit von „Advanced Materials“ (AdMs) in innovativen Solarzelltechnologien (Emerging Photovoltaics, EPVs) abschätzen zu können, ist die Betrachtung des gesamten Lebenszyklus notwendig. Lebenszyklus-Analysen (Life Cycle Analysis, LCAs) können jene Materialien in einem Produkt identifizieren, die in Relation zu anderen eingesetzten Materialien am meisten zu Umweltbelastungen durch das Gesamtprodukt beitragen. Dies bietet die Möglichkeit, das Produkt im Sinne der Nachhaltigkeit zu optimieren. Bislang durchgeführte LCAs von EPVs sind aufgrund der unterschiedlichen Annahmen und Systemgrenzen kaum vergleichbar und haben Limitierungen, insbesondere aufgrund fehlender Daten. Generell zeigt sich jedoch, dass EPVs verglichen mit konventionellen PV-Technologien einen niedrigeren Energiebedarf und eine kürzere Energierücklaufzeit aufgrund der einfacheren Herstellungsmethoden und des geringeren Materialeinsatzes haben können. Die eingesetzten AdMs weisen in LCAs, etwa im Vergleich mit Solarglas, den für die Elektroden verwendeten (Edel)metallen oder „kritischen Rohstoffen“, nur geringe Umweltauswirkungen auf, vorrangig, weil sie in verhältnismäßig geringen Mengen eingesetzt werden. EPVs haben noch keine Marktreife erlangt, daher wurden bislang noch keine entsprechenden Recyclingtechnologien entwickelt. Die Verbundmaterialien aufzutrennen, stellt eine große Herausforderung beim Recycling dar. Idealerweise sollte bereits beim Design nicht nur die Umweltverträglichkeit („Safe by Design“), sondern auch die Recyclingfähigkeit („Design for Recycling“) berücksichtigt werden und auch darauf geachtet werden, einen geeigneten Kompromiss zwischen höchstem Wirkungsgrad, bester Stabilität, Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit zu finden („Sustainability by Design“).

* Korrespondenzautor

„Advanced Materials“ für innovative Solarzelltechnologien

Teil II: Nachhaltigkeitsbewertung und Bedeutung in der Kreislaufwirtschaft

Einleitung

Die Energieproduktion gehört zu jenen menschlichen Aktivitäten, die große Umweltbelastungen verursachen. Treibhausgasemissionen durch das Verbrennen von erschöpflichen fossilen Energieträgern führen zu Klimaerwärmung und Umweltverschmutzung, der Raubbau an Bodenschätzen und Rohstoffen zu Umweltzerstörung, Verlust an Biodiversität und zu politischen sowie sozialen Problemen. Eine der vielversprechendsten Alternativen zur Energiegewinnung aus fossilen Energieträgern ist die Photovoltaik. Die Sonne liefert im Jahr ein Vielfaches mehr an Energie, als insgesamt weltweit verbraucht wird.^{1;2} Photovoltaik-Anlagen emittieren kein CO₂ während ihrer Betriebsdauer und arbeiten geräuschlos. Trotz aller Vorteile kann jedoch nicht *a priori* davon ausgegangen werden, dass Solarzelltechnologien generell umweltfreundlich und nachhaltig sind. Das gilt auch für die innovativen Solarzelltechnologien (Emerging Photovoltaics, EPVs) auf Basis der sogenannten „Advanced Materials“ (AdMs), wie sie im ersten Teil des Dossiers vorgestellt wurden.³ Nach der konventionellen, siliziumbasierten Photovoltaik und den Dünnschichtsolarelementen (etwa auf Basis von Cadmiumtellurid), bieten diese Photovoltaiksysteme der dritten Generation aufgrund ihrer geringen Herstellungskosten sowie leichten und flexiblen Bauweise neue Anwendungsfelder z. B. im Bereich der gebäudeintegrierten Photovoltaik oder für tragbare Elektronik und andere Konsumgüter (siehe dazu³).

Zu diesen EPVs zählen die organischen Solarzellen, deren lichtabsorbierende Schichten aus halbleitenden Polymeren bestehen, weiters Farbstoffsolarelementen mit einer porösen Schicht aus nanoskaligem Titandioxid, die mit Farbstoff-Molekülen belegt ist, Perowskit-Solarelementen, deren aktive Schicht aus Bleihalogeniden besteht und Quantenpunkt-Solarelementen mit schwermetallhaltigen Halbleiterschichten. EPVs befinden sich weitestgehend noch in Entwicklung und es wird an einer Vielzahl unterschiedlicher Materialien und Materialkombinationen geforscht, um den besten Wirkungsgrad, die größtmögliche Stabilität unter den

vorherrschenden Umweltbedingungen bzw. eine lange Lebensdauer zu erreichen (siehe dazu³).

Um die Auswirkungen solcher innovativen Solarzelltechnologien auf die Umwelt feststellen zu können, ist eine Betrachtung des gesamten Lebenszyklus notwendig – von der Gewinnung der Rohstoffe, der Herstellung der Materialien und Komponenten für einzelne Zellen und kompletter Module, über die Nutzungsphase bis hin zu ihrer Entsorgung am Ende der Lebensdauer.

Ökologische Nachhaltigkeitsbewertung von EPVs

Die am häufigsten eingesetzte Methode, um die ökologische Nachhaltigkeit eines Produkts abzuschätzen, ist die **Lebenszyklus-Analyse (Life Cycle Analysis, LCA)**. Dabei handelt es sich um eine quantitative, produktbezogene Methode, die es erlaubt, sowohl den Energie- und Chemikalieneinsatz als auch die Umweltauswirkungen über den gesamten Lebenszyklus eines Produkts abzuschätzen und mit jenen anderer Produkte vergleichbar zu machen. LCAs sind nach der ISO 14000 Serie standardisiert und umfassen im Prinzip alle vier Stufen des Lebenszyklus: Anschaffung bzw. Gewinnung der Rohmaterialien, Materialverarbeitung und Herstellung, Anwendung und die Phase am Ende der Lebensdauer. Da es jedoch sehr aufwendig ist, Informationen zu Umweltauswirkungen in allen Stufen zu erhalten, wird der Geltungsbereich einer LCA üblicherweise reduziert, indem einzelne Stufen im Lebenszyklus eines Produkts ausgewählt werden. Auch die Auswahl, welche Umweltauswirkungen analysiert werden sollen, kann relativ flexibel gestaltet werden.⁴

Im Bereich der LCA für Photovoltaik (PV) werden üblicherweise folgende **Indikatoren** zur Abschätzung der ökologischen Nachhaltigkeit herangezogen:

- **„Energieeinsatz“ (Cumulative Energy Demand, CED)**
Das ist der gesamte Energiebedarf während eines PV-Lebenszyklus, d. h. sowohl der direkte Energieverbrauch (Elektrizität zur Herstellung der Solarzellen bzw. Module) als auch der indirekte Energieverbrauch (die in den Materialien eingebettete Energie, d. i. jene Energie, die zur Gewinnung bzw. Herstellung der Ausgangsrohstoffe und -materialien eingesetzt wird).
- **„Treibhausgasemissionen“ (Greenhouse Gas, GHG) bzw. „Erderwärmungspotenzial“ (Global Warming Potential, GWP)**
Maßzahl für den relativen Beitrag einer chemischen Verbindung zum Treibhauseffekt. Sie gibt an, wie viel eine bestimmte Masse eines Treibhausgases (GHG) im Vergleich zur gleichen Masse CO₂ zur globalen Erwärmung beiträgt.
- **„Energierücklaufzeit“ (Energy Payback Time, EPBT)**
Das ist jene Zeit, die eine Solarzelle benötigt, um die für die Herstellung benötigte Energie zu produzieren.

Umweltauswirkungen eines Produkts bzw. einer einzelnen Solarzelle oder gesamten PV-Anlage werden in einer LCA nach unterschiedlichen Methoden für verschiedene **Wirkungskategorien** untersucht. Dazu gehören z. B.:⁵

- Ökotoxikologie (marin, limnisch, terrestrisch)
- Humantoxikologie (kanzerogen, nicht-kanzerogen)
- Naturraumbeanspruchung
- Ressourcenerschöpfung (Wasser, fossil, mineralisch)
- Versauerung (Boden, Gewässer)
- Eutrophierung (Land, Wasser)
- Landnutzungsänderungen
- Feinstaub
- Ionisierende Strahlung
- Klimaänderung
- Abbau der Ozonschicht

Weitere Wirkungskategorien sind ebenfalls möglich. Die ISO-Norm gibt hier keine fixen Vorgaben von zu untersuchenden Wirkungskategorien vor, weshalb die Auswahl den Ersteller*innen der LCA freigestellt ist.⁵ Die notwendigen Daten für LCAs zu PV-Technologien werden zumeist (kommerziell) verfügbaren Datenbanken (auch Ökoinventare⁶ genannt) entnommen und gegebenenfalls um eigene Annahmen der Analyst*innen ergänzt, wobei auf Primärdaten aus veröffentlichten Studien oder nicht-veröffentlichten Firmendaten zu bestimmten Prozessen zurückgegriffen wird.

Prinzipiell birgt der Vergleich verschiedener LCAs von Photovoltaiksystemen untereinander Schwierigkeiten, da Analyst*innen frei unter einer Vielzahl von zu untersuchenden Umweltkategorien und Methoden wählen können.⁷ Es werden auch verschiedene Systemgrenzen festgelegt und zumeist werden nur die beiden ersten Stufen, nämlich die Anschaffung der Rohmaterialien und die Herstellungsphase, untersucht („cradle-to-gate“). Nur wenige LCAs umfassen auch das Ende der Lebensphase („cradle-to-grave“). Auch bei der Wahl der sogenannten funktionellen Einheit, also der Bezugsgröße, haben die Ersteller*innen die freie Wahl. Zumeist finden hierzu die Einheiten Leistung in „kW_p“⁸, produzierte Strommenge in „kWh“ oder 1 m² Fläche der Solarzelle Anwendung. Primärdaten, wie Strom oder Chemikalienverbrauch, sind für manche Herstellungsprozesse kaum bzw. unvollständig verfügbar und es besteht ein genereller Mangel an Daten für die Entsorgungs- bzw. Recyclingphase. Oftmals wird in LCAs auch auf sekundäre Daten aus anderen Analysen zurückgegriffen.

Bezüglich der analysierten Indikatoren, Parameter und Wirkungskategorien gibt es große Unterschiede: So ziehen manche Studien nur die Kennzahlen EPBT oder CED heran. Von den Umweltkategorien werden am häufigsten die Treibhausgasemissionen oder das Erderwärmungspotenzial kalkuliert. Bezüglich der Abschätzung der Umweltauswirkungen gibt es verschiedene Methoden.⁹ In manchen LCAs werden die Resultate in normalisierter Form wiedergegeben. Das erschwert den Vergleich mit Ergebnissen anderer Studien zusätzlich.⁷ Ein weiterer Kritikpunkt an den bislang durchgeführten LCAs zu PV-Systemen ist der Umstand, dass diese kein komplettes Bild potenzieller Umwelt und Gesundheitsauswirkungen bieten, da diese die neuesten Entwicklungen oft nicht berücksichtigen. Beispiele hierfür sind etwa die expandierenden Märkte in Schwellenländern wie China, Indien und Malaysia, aber auch die unterschiedlichen Systemtypen wie netzunabhängige PV-Systeme, großflächige Anlagen in Wüstengebieten, gebäudeintegrierte Systeme und technologische Innovationen.¹⁰ Im Zusammenhang mit EPVs sind LCAs zudem mit großen Unsicherheiten behaftet, da sich die Entwicklung oft noch im experimentellen Stadium befindet und somit nur Labordaten herangezogen werden können. Wie sich eine großtechnische Herstellung auf die Resultate von LCAs auswirken kann, ist derzeit schwer abschätzbar. Möglicherweise reduziert eine industrielle Produktion die Umweltbelastungen, denn die Herstellung im Labor ist hinsichtlich Material und Energieeinsatz weniger effizient als eine kommerzielle.⁷

LCAs für EPVs wurden bisher auf Basis der am häufigsten eingesetzten Materialien durchgeführt. Der Großteil innovativer, umweltfreundlicher Materialien wie etwa natürliche bzw. organische Farbstoffe wurde noch nicht bewertet, da dazu zumeist noch Daten zum Energie- und Chemikalienverbrauch für die Herstellung fehlen.¹¹ Eine entscheidende Rolle bei LCAs für PVs generell spielt auch die Phase am Ende der Lebensdauer, die bislang allerdings nur in wenigen Untersuchungen berücksichtigt wurde, da spezifische Daten und Informationen zu Recyclingprozessen fehlen. In manchen LCAs wurde angenommen, dass anorganische Materialien deponiert, Kunststoffe verbrannt und einige Materialien, speziell Metalle und Glas, recycelt werden können. Die Möglichkeit des Recyclings reduziert Umweltbelastungen von PVs jedenfalls erheblich, insbesondere wenn es toxische Materialien wie etwa Cadmium oder Blei betrifft.⁷

Ein entscheidender Faktor bei LCAs von PVs generell ist die geschätzte Produktlebensdauer, da davon wichtige Parameter wie die EPBT abhängen. Da Solarzellen während ihrer Betriebsdauer faktisch keine Emissionen abgeben, ist deren Umweltprofil in LCAs umso besser, je länger ihre Lebensdauer ist, in der sie Strom produzieren. Die Lebensdauer von siliziumbasierten Solarzellen beträgt derzeit etwa 25 bis 30 Jahre. Für die Performance von EPVs gibt es bislang aber noch keine verlässlichen Daten unter realen Anwendungsbedingungen, sondern nur Schätzungen aus Laboruntersuchungen bzw. Pilotstudien.⁷ Bislang scheint die Lebensdauer jedoch bei allen Arten von EPVs noch weit unter jener der siliziumbasierten PVs zu liegen, da EPVs empfindlich gegenüber Umwelteinflüssen wie Temperatur, Feuchtigkeit, Licht und Wärme sind. In manchen LCAs wird jedoch eine Lebensdauer angenommen, die ähnlich jener siliziumbasierter Solarzellen ist. Das ist aber streng genommen eine Verfälschung der Ergebnisse und derzeit noch nicht realistisch.⁷

Trotz aller Limitierungen sind LCAs eine wichtige Methode, um jene Materialien in einem Produkt zu identifizieren, welche in Relation zu den anderen eingesetzten Materialien den höchsten Beitrag zu den Umweltbelastungen des gesamten Produkts leisten. Auf diese Weise können problematische Materialien identifiziert werden, etwa (1) Materialien, deren Herstellung einen hohen Aufwand an Energie benötigen, (2) solche, deren Gewinnung die Umwelt besonders belasten oder deren Verfügbarkeit begrenzt ist, sowie (3) Materialien, die Risiken für die Umwelt oder die menschliche Gesundheit aufweisen. Dies bietet die Möglichkeit ein Produkt im Sinne des Umweltschutzes und der Nachhaltigkeit zu optimieren.

Lebenszyklus-Analysen für EPVs

EPVs zeigten in den bislang durchgeführten LCAs einen niedrigeren Energiebedarf und eine kürzere EPBT verglichen mit konventionellen PV-Technologien, aufgrund ihrer Effizienz, ihrer niedrigen Produktionskosten und ihrer Umweltfreundlichkeit. Negative Umweltauswirkungen durch den

Lebenszyklus-Analysen für EPVs

EPVs zeigten in den bislang durchgeführten LCAs einen niedrigeren Energiebedarf und eine kürzere EPBT verglichen mit konventionellen PV-Technologien, aufgrund ihrer Effizienz, ihrer niedrigen Produktionskosten und ihrer Umweltfreundlichkeit. Negative Umweltauswirkungen durch den

Gehalt an Schwermetallen in den aktiven Schichten sind im Vergleich zu siliziumbasierten, kommerziellen PVs vernachlässigbar.¹² Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Halbleiterschichten im Nanometerbereich vorliegen, d. h. der Materialeinsatz für diese Schichten ist verhältnismäßig sehr gering. Der größte Masseanteil (mehr als 90 Gewichtsprozent) bei EPVs entfällt auf das Glassubstrat, auf welchem die Schichten aufgebracht werden. Aus diesem Grund zeigt etwa Solar- bzw. Sicherheitsglas in bislang durchgeführten LCAs die größten Umweltauswirkungen – aufgrund des hohen Energiebedarfs bei der Herstellung des Glases und den Seltenen Erdmetallen für die transparente Elektrode.⁷

Solarzellkomponenten, wie die Elektrode, können aus sogenannten „kritischen Rohstoffen“ bestehen.¹³ Als „kritisch“ werden Rohstoffe betrachtet, die größtenteils aus dem EU-Ausland stammen und um die sich der globale Wettbewerb zunehmend verschärft. Wirtschaftliche Bedeutung und Versorgungsrisiko sind die beiden wichtigsten Parameter bei der Bestimmung, ob ein Rohstoff als „kritisch“ eingestuft wird. Die EU bezieht 98 % der Seltenen Erden aus China, 98 % des Bedarfs an Borat aus der Türkei, 71 % Platin und einen noch höheren Anteil an Metallen der Platingruppe wie Iridium, Rhodium und Ruthenium aus Südafrika.¹⁴ Die EU ist bei den meisten „kritischen Rohstoffen“ zu 75-100 % von Importen abhängig. Ressourcensicherheit kann nur erreicht werden, wenn Maßnahmen zur Diversifizierung der Versorgung getroffen werden. Primär sollte auf Rohstoffe zurückgegriffen werden, für die kein Versorgungsrisiko besteht und auf Materialien, die im Sinne der Kreislaufwirtschaft zurückgewonnen werden können. Die Europäische Kommission veröffentlicht zur Gestaltung einer besseren Versorgungspolitik eine Liste der „kritischen Rohstoffe“. Diese Liste wird alle drei Jahre überprüft und aktualisiert.¹⁵

Die Umweltauswirkungen von **organischen Solarzellen** korrelieren stark mit dem Einsatz von Fullerenderivaten wie Phenyl-C61-Buttersäuremethylester (PCBM) als Absorberschicht, da dieses Material jenes mit dem höchsten Energieeinsatz ist. Die Produktion von Fullerenen¹⁶ ist sehr energieintensiv, u. a. weil bei der Synthese aus Graphit nur ca. 30 % Fullerene gewonnen werden können und der überwiegende Rest als Ruß anfällt.¹⁷ „Cradle-to-gate“-LCAs von 15 verschiedenen Materialien, die als aktive Schicht in organischen Solarzellen eingesetzt werden können, zeigten, dass Fullerene und deren Derivate den höchsten CED aufweisen.¹ Besser schneiden andere Materialien, wie Polymere oder „kleine Moleküle“, ¹⁸ ab. Eine genauere Analyse zeigte, dass funktionalisierte Fullerene einen höheren CED haben als nicht-funktionalisierte. Während reine C₆₀-Fullerene, die mittels Pyrolyse hergestellt werden, einen Energieverbrauch von 12,7 GJ/kg

aufweisen, steigt dieser bei PCBM auf 64,7 GJ/kg aufgrund der zusätzlichen Syntheseschritte.¹⁷ Auch das als Elektrodenmaterial eingesetzte Silber zeigt sich in LCAs als eines der hauptverantwortlichen Materialien für Umweltauswirkungen in vielen Kategorien.¹⁹ Vor allem der Abbau von Silber, der mit schwefel- und säurehaltigen Abwässern einhergeht, verursacht große Umweltschäden.

Bei der Produktion von **Farbstoffsolarzellen** ist insbesondere die Verwendung von Glas als Substrat und Platin als Elektrode aus ökologischer Sicht problematisch. LCAs zeigen, dass das mit Indiumzinnoxid (ITO) beschichtete Glas als Substrat hauptverantwortlich für den hohen Energieverbrauch und die Umweltauswirkungen von Farbstoffsolarzellen ist. Glas hat in diesen Anwendungen den höchsten Masseanteil und seine Herstellung verbraucht sehr viel Energie, während Indium zu den „kritischen Rohstoffen“ mit hoher Versorgungsunsicherheit zählt.¹ Weniger Umweltauswirkungen zeigt eine Beschichtung mit Fluor dotiertem Zinn(IV)-oxid. Der Ersatz von Glas als Substrat durch den Kunststoff Polyethylenterephthalat (PET) verringerte in einer LCA die Umweltauswirkungen in allen untersuchten Kategorien und die EPBT war für diese Variante mit 0,73 Jahren am geringsten.²⁰ Allerdings ist PET nicht so temperaturbeständig wie Glas, sodass niedrigere Beschichtungstemperaturen angewendet werden müssen, was zu einer schlechteren Performance führen kann. PET hat im Gegensatz zu Glas den Vorteil, dass die Herstellung der Solarzellen mittels kostengünstigem „Rolle-zu-Rolle“-Verfahren möglich ist und diese leicht und flexibel sind, was die Anwendungsfelder erweitert.²¹ Farbstoffsolarzellen mit organometallischen Farbstoffen auf Basis von Ruthenium zeigen die beste Effizienz. Allerdings kann dieser Farbstoff nur durch viele Reaktionsschritte, unter Verwendung problematischer Lösungsmittel und teuren chromatographischen Reinigungsprozessen hergestellt werden²², weshalb dieser einen hohen Anteil an den Umweltauswirkungen bei einer „cradle-to-gate“-Bewertung von Farbstoffsolarzellen aufweist.¹ Aufgrund der sehr geringen eingesetzten Menge ist der Farbstoff jedoch hinsichtlich der Umweltbelastungen weniger problematisch als etwa das Elektrodenmaterial Platin, das zu den „kritischen Rohstoffen“ zählt und dessen Primärabbau mit hohen Umweltbelastungen einhergeht.¹¹

Anstelle von Ruthenium-basierten Farbstoffen können viele organische Farbstoffe, die in der Natur reichlich vorhanden sind, eingesetzt werden. Dazu zählen etwa Anthocyane, welche für die roten, blauen und violetten Farben vieler Pflanzen und Früchte verantwortlich sind, ebenso Tannine, Carotinoide, Flavonoide oder der grüne Pflanzenfarbstoff Chlorophyll.²² Umweltvorteile natürlicher Farbstoffe sind etwa biologische Ab-

baubarkeit, niedrige Herstellungskosten und die Reduktion des Einsatzes von Edelmetallen und „kritischen Rohstoffen“. ¹¹ Allerdings sind auch organische Farbstoffe nicht *a priori* nachhaltig. Der Farbstoff selbst oder die für die Herstellung notwendigen Lösungsmittel können toxisch und/oder teuer sein, ebenso können Nebenprodukte Umweltschadstoffe darstellen.¹¹ Die bislang erprobten organischen Farbstoffe zeigen zudem eine verhältnismäßig schlechte Performance aufgrund der geringen Interaktion zwischen dem Farbstoff und der Halbleiteroberfläche.

Bei **Perowskit-Solarzellen** sind jene Materialien, welche die größten Umweltauswirkungen in LCAs zeigen, ebenfalls das verwendete Glas sowie Gold als Elektrodenmaterial, ebenso andere Edelmetalle wie Silber oder Platin. Bei den Herstellungsprozessen sind die Abscheidung der rückseitigen Kontakte und der Elektroden wie auch die Präparation des Solarglases jene Bereiche mit den größten Umweltauswirkungen.⁷ Die Halbleiterschicht aus Blei-Halogeniden von Perowskit-Solarzellen ist gemäß der bislang durchgeführten LCAs nicht das Material mit den größten Bedenken hinsichtlich der Human- und Ökotoxizität aufgrund der geringen eingesetzten Menge. Die Dicke der Perowskitschicht beträgt weniger als 500 nm und der Bleigehalt einer Perowskit-Solarzelle weniger als 1 g/m².²³ LCAs können aber die komplexen Interaktionen zwischen Chemikalien und biologischen Systemen nicht direkt abschätzen.²⁴ Die Toxizität von Blei sollte deshalb nicht unterschätzt und eine unabsichtliche Freisetzung verhindert werden. Das kann vor allem durch geeignetes Verkapselungsmaterial und spezialisierte Recyclingsysteme geschehen. Aufgrund der Toxizität ist Blei in der EU schon in vielen Anwendungen limitiert bzw. vollständig verboten. Die EU-Verordnung „Restriction of Hazardous Substances Directive“ (RoHS) setzt für Blei als erlaubte Konzentration 0,1 Gewichtsprozent oder 1000 ppm fest.²⁵ Die Einschränkung bezieht sich auf einen „homogenen Werkstoff“²⁶ in einem Produkt. Ob die bleihaltige Perowskit-Schicht in den Solarzellen als ein solches homogenes Material betrachtet werden kann, ist noch Gegenstand der Diskussion. Jedenfalls umfasst die Verordnung nicht PV-Freiflächenanlagen, sondern betrifft nur Konsumprodukte. Sollten Perowskit-Solarzellen etwa in tragbaren elektronischen Geräten eingesetzt und die bleihaltige Perowskit-Schicht als homogenes Material eingestuft werden, dann wäre deren Einsatz in Konsumprodukten aufgrund des Bleigehaltes von mehr als 0,1 Gewichtsprozent untersagt. Darüber hinaus kann der Bleigehalt auch der Grund für ein zurückhaltendes Konsumentenverhalten sein und eine Kaufentscheidung beeinflussen.¹ Da Blei-Halogenide wasserlöslich sind, bestehen Bedenken, dass diese aus beschädigten Solarpaneelen oder in Deponien ausgewaschen und in die Umwelt sowie das Grundwasser gelangen

könnten.²³ Um eine potenzielle Umweltgefährdung abschätzen zu können, sind jedoch mehr Daten notwendig.²⁷

Bislang wurde nur eine einzige LCA von **Quantenpunkt-Solarzellen** durchgeführt, die zeigt, dass diese im Vergleich mit konventionellen Dünnschicht-Solarzellen, etwa auf Basis von Cadmiumtellurid, weniger Umweltauswirkungen aufgrund des geringeren Materialeinsatzes haben. Allerdings ist der Energieeinsatz für die Produktion der Quantenpunkte (Quantum Dots, QDs) höher als für alternative Absorbermaterialien.²⁸ Bezüglich des Verhaltens, der Stabilität und des Verbleibs von QDs in der Umwelt ist so gut wie nichts bekannt, ebenso wenig zum Metabolismus in Wirbeltieren oder über die Ausscheidungsrouten.²⁹ Die Ergebnisse der wenigen bislang durchgeführten Untersuchungen an Nagetieren und *in vitro* Zellkulturen legen jedoch nahe, dass die nanoskaligen QDs unter bestimmten Bedingungen ein Umwelt- und Gesundheitsrisiko darstellen können.²⁹ Bei der Verwendung von QDs aus Bleisulfid (PbS) besteht die Gefahr, dass toxische Blei-Ionen freigesetzt werden können.³⁰ Generell ist jedoch das Risiko einer Humanexposition aufgrund der sehr geringen eingesetzten Mengen gering einzuschätzen.³¹

Bedeutung der eingesetzten AdMs in der Kreislaufwirtschaft

Derzeit spielen EPVs in der sogenannten End-of-Life-Phase (EoL) mengenmäßig noch keine Rolle, da sie bis dato noch keine Marktreife erlangt haben. Es ist daher offensichtlich, dass bislang noch keine Recyclingtechnologien im Pilot- oder Industriemaßstab für EPVs adaptiert bzw. neu entwickelt wurden. Sobald – analog zu den siliziumbasierten Solarzellen – eine EoL-Mindestmenge³² fürs Recycling erreicht wird, könnte eine Rückgewinnung der Glassubstrate, auf welchen EPVs aufgebaut sind, sowie der Metalle, wie Kupfer, Silber, Gold, Indium, Zinn oder Aluminium, von wirtschaftlichem Interesse werden. Die Rückgewinnung von Indium, Zinn oder Titan, welche in der transparenten Elektrode oder in den aktiven Schichten von EPVs enthalten sind (siehe dazu³), wird in naher Zukunft eine sehr wichtige Bedeutung im Recycling spielen, da diese Materialien von der EU als „kritische Rohstoffe“ eingestuft werden.¹⁴ Die größte Herausforderung im Recycling von Solarzellen ist, Verbundmaterialien aufzutrennen, um in weiterer Folge Sekundärrohstoffe aus den gewonnenen Einzelfraktionen so energieeffizient und sortenrein wie möglich zurückzugewinnen zu können. Solarzellen werden zumeist in Kunststofffolien aus Ethylen-Vinylacetat-Copolymeren (EVA) oder mittels Epoxidharze hermetisch eingekapselt, um die aktiven Schichten vor Umwelteinflüssen, wie Sauerstoff- oder Wasser(dampf)eintritt, langfristig zu schützen.

Die Auftrennung dieses Verbundmaterials wird auch als Delaminierung bezeichnet. Mechanische, chemische oder thermische Trennverfahren, die bereits auf siliziumbasierte Solarzellen angewandt werden, könnten zukünftig für EPVs adaptiert werden.

Mechanische Zerkleinerungsverfahren, wie Shredder, Metallabscheider, Siebe oder optische Trennverfahren, dienen dazu, das Glassubstrat abzutrennen, welches wiederum dem Flachglasrecycling zugeführt werden kann. Hierbei ist vor allem darauf zu achten, dass die gewonnenen Glasfraktionen nicht allzu sehr mit Metallresten (z. B. Aluminium, Blei, Kupfer oder Silber) verunreinigt sind, die den Glasrecyclingprozess erheblich stören können. Die bei der mechanischen Trennung gewonnenen Einzelfraktionen können, je nach stofflicher Zusammensetzung sowie Verunreinigungsgrad, durch chemische Ätzverfahren weiterbehandelt werden. Die metallischen Fraktionen können entweder direkt nach der mechanischen Vorbehandlung oder nach einer chemischen Weiterbehandlung hydro- oder pyrometallurgischen Prozessen zugeführt werden. Die aus den Trennverfahren entstehenden Feinfraktionen bzw. Reststoffe werden in Abhängigkeit des organischen Kohlenstoffanteils und Schwermetallgehalte der thermischen Behandlung zugeführt, bevor die daraus resultierenden festen Verbrennungsrückstände auf sogenannten Reststoffdeponien abgelagert werden.

Die Delaminierung des Glas-Kunststoff-Metallverbundes kann auch mittels thermischer Verfahren erfolgen. Die organischen Bestandteile (Kunststofffolien, Silikonverklebungen, etc.) werden hierbei entweder bei oxidativen Bedingungen verbrannt oder mittels Pyrolyse (unter Sauerstoffarmut) thermisch verwertet, um daraus Pyrolysegase zu gewinnen. Die dabei zurückbleibenden metallischen bzw. anorganischen Komponenten können wiederum metallurgischen Prozessen zugeführt werden, um Metalllegierungen unterschiedlicher Qualitäten rückzugewinnen. Für die Verbundmaterialien könnten zukünftig auch neuartige, physikalische Trennverfahren, wie die sogenannte Hochspannungsfragmentierung (High Voltage Fragmentation, kurz HVF), angewandt werden. So wurde die HVF bereits eingesetzt, um die sogenannte Schwarzmasse³³ von Lithium-Ionen-Batterien aufzubereiten, wobei die Stromabnehmerfolie aus Aluminium durch pulsierende Spannung abgetrennt wurde.³⁴ Im Vergleich zu konventionellen mechanischen Separationstechnologien weist die HVF aufgrund der benötigten Spannung derzeit relativ hohe Betriebs- sowie Investitionskosten auf.³⁰ Ein vielversprechendes, innovatives und kostengünstiges Trennverfahren ist die physikalische Auftrennung der Verbunde mittels hochintensiver Lichtpulse bei geringem Energieeinsatz.³⁵

Zusammengefasst sind die derzeit angewandten Recyclingverfahren sehr aufwendig, wobei oftmals – je nach Wirtschaftlichkeit und Recyclingeffizienz – Verfahrenskombinationen aus mechanischen, chemischen und thermischen Prozessen angewandt werden. In Zukunft steht die Recyclingbranche vor einer großen Herausforderung, um v. a. „kritische Rohstoffe“ sowie AdMs aus EPVs, wie der transparenten Elektrode aus Indiumzinnoxid (ITO) oder Fluor dotiertes Zinn(IV)-oxid aus dem komplexen Materialverbunden rückzugewinnen zu können. Im Sinne der Kreislaufwirtschaft müssen hierfür bestehende Recyclingverfahren adaptiert oder neue innovative Verfahren entwickelt werden. Ein weiterer Ansatz wäre auch, bereits während des Designs auf recyclingfähige Materialien zu achten (auch Ecodesign oder „Design for Recycling“ genannt). So wurden beispielsweise bereits flexible, biologisch abbaubare und somit recyclingfähige EPVs entwickelt.³⁶ Weiters könnten auch forciert Sekundärrohstoffe, wie z. B. aus Elektroaltgeräten bzw. Leiterplatten von PCs oder aus anderen Abfallströmen rückgewonnene „kritische Rohstoffe“, in der Solarzellenherstellung eingesetzt werden.³⁷ Um in diesem Sinne eine nachhaltige Kreislaufwirtschaft in Zukunft gewährleisten zu können, wird neben den Herstellungskosten und den gesetzlichen Rahmenbedingungen (erweiterte Produzentenverantwortlichkeit), auch der Kompromiss zwischen Materialqualität, Lebensdauer und Wirkungsgrad einer Solarzelle eine große Bedeutung haben. Ein Umdenken hinsichtlich „Sustainability by Design“ könnte auch dahingehend stattfinden, dass EPVs zukünftig vermehrt eingesetzt werden könnten, da etwa in organischen Solarzellen im Vergleich zu konventionellen Dünnschichttechnologien (z. B. Cu(In,Ga)Se₂ oder GaAs Halbleiter) und siliziumbasierten Solarzellen (Si-Wafer) verhältnismäßig geringe Mengen an „kritischen Rohstoffen“ verwendet werden.

Vorschläge für die Entwicklung von EPVs mit geringeren Umweltbelastungen

Bei Weiterentwicklungen von EPVs sollte ein Weg eingeschlagen werden, der einen Kompromiss zwischen dem im Sinne der Nachhaltigkeit am besten geeigneten Material, der höchsten zu erreichenden Effizienz und Lebensdauer sowie der Wirtschaftlichkeit darstellt. Prinzipiell sollten Materialien ausgewählt werden, die nicht-toxisch, auf lange Sicht ausreichend verfügbar und kostengünstig sind. Zudem sollten sie nach Möglichkeit aus Abfällen gewonnen werden können sowie wiederverwendbar bzw. -verwertbar sein.¹¹ Insbesondere könnten folgende Maßnahmen dazu beitragen, EPVs umweltfreundlicher und nachhaltiger zu gestalten:

- Erforschung anderer Elektrodenmaterialien, um seltene und teure Stoffe wie Gold, Silber und Platin zu ersetzen, die für viele Umweltbelastungen und -auswirkungen verantwortlich sind.¹⁹
- Generell sollten „kritische Rohstoffe“ wie Platin, Ruthenium oder Indium sowie aufwendige, teure und komplizierte Herstellungsverfahren vermieden werden.¹¹
- Ersatz von bleihaltigen Halbleitermaterialien zur Verhinderung von derzeit nicht abschätzbaren Umwelt- und Gesundheitsrisiken und um ein mögliches negatives Konsument*innenverhalten sowie Einschränkungen durch allfällige gesetzliche Regulierungen vorzubeugen.¹
- Entwicklung alternativer Versiegelungsmaterialien, etwa biologisch abbaubare Kunststoffe, um PET zu ersetzen.¹⁹ Allerdings wären diese aufgrund ihrer geringen Widerstandsfähigkeit gegenüber Umwelteinflüssen derzeit nur für Produkte mit geringer Lebensdauer geeignet.
- Anwendung des „Green Chemistry“-Prinzips, v. a. im Hinblick auf die eingesetzten Lösungsmittel.¹
- Betrachtung des gesamten Lebenszyklus beim Design einer PV-Technologie – von der Herstellungs- bis zur Entsorgungsphase („Sustainability by Design“).¹⁹
- Beim Design sollte bereits das Recycling mitberücksichtigt werden („Design for Recycling“). Umweltfreundliche Prozesse zur Trennung der einzelnen Schichten (Delaminierung) ohne Einsatz von problematischen Lösungsmitteln müssen entwickelt werden.²³
- Die Wiedergewinnung, insbesondere von Blei und TiO₂, wenngleich derzeit aus ökonomischen Gründen noch nicht vorteilhaft, wäre aus ökologischen Gründen zu begrüßen. Das Recycling des eingesetzten Glases ist sowohl aus ökologischer als auch ökonomischer Sicht sinnvoll.¹
- Die Herstellung von Solaranlagen sollte in Ländern mit niedrigen Umweltstandards (z. B. aufgrund strenger Emissionsstandards oder hoher technologischer Effizienz) verlagert werden. Die Aufstellung und der Betrieb sollte in Ländern mit hoher Sonneneinstrahlung erfolgen, um die Umweltvorteile der PV-Technologie zu maximieren.¹⁹
- Spezielle Regulierungen für eingesetzte Nanomaterialien bzw. AdMs sind unter Umständen notwendig, sollte die Gefahr einer Freisetzung in die Umwelt bestehen.²³
- Obwohl die Bedeutung einer ökologischen Nachhaltigkeit von Solarzelltechnologien in der Forschung bekannt ist, besteht dennoch die Gefahr, dass dieses Ziel einer höheren Energieausbeute geopfert wird. Anzuraten ist, solche Forschung zu fördern, die einen Brückenschlag zwischen Grundlagenforschung und wirtschaftlicher Umsetzbarkeit ermöglichen. Die ökologische und auch soziale Nachhaltigkeit sollte dabei laufend überprüft und überwacht werden, damit zukünftige Entwicklungen im Sinne von „Sustainability by Design“ stattfinden.⁴

Anmerkungen und Literaturhinweise

- 1 Mariotti, N., Bonomo, M. und Barolo, C. (2020a): Reliability and Ecological Aspects of Photovoltaic Modules. Gok, A. (ed), IntechOpen.
- 2 Siehe dazu: „Kann die Sonne den Weltenergiebedarf decken?“. SOLARWATT GmbH. <https://solarenergie.de/hintergrundwissen/solarenergie-nutzen/weltenergiebedarf>.
- 3 Scharber, M., Rodin, V., Moser, S., Greßler, S., Part, F., Pavlicek, A., Fuchs, D., Sarıçiftçi, N.S., Lindorfer, J. und Ehmoser E.-K. (2021): „Advanced Materials“ für innovative Solarzelltechnologien. Teil I: Grundlagen, historische Entwicklung und Marktpotenziale. NanoTrust Dossier Nr. 56/ August 2021. http://epub.oew.ac.at/Oxc1aa5576_0x003cb915.pdf.
- 4 Lizin, S., Van Passel, S., De Schepper, E., Maes, W., Lutsen, L., Manca, J. und Vanderzande, D. (2013): Life cycle analyses of organic photovoltaics: a review. Energy & Environmental Science 6, 3136-3149.
- 5 Sutter J. & Merz C. (2019): P2X: Erforschung, Validierung und Implementierung von „Power-to-X“ Konzepten. Ökobilanz der Herstellung und Nutzung von Oxymethylenether (OME), Öko-Institut e.V.
- 6 Beispiel für Ökoinventar: „ecoinvent“, siehe unter: <https://www.ecoinvent.org/>.

Fazit

EPVs ermöglichen neue Anwendungsgebiete und können aufgrund ihres geringen Materialeinsatzes sowie ihrer weniger energieintensiven Herstellungsmethoden umweltfreundlicher und nachhaltiger als konventionelle siliziumbasierte PV-Systeme sein. Dennoch sind nicht alle eingesetzten Materialien hinsichtlich des Umweltschutzes und der menschlichen Gesundheit unproblematisch und es bestehen Möglichkeiten zur Optimierung im Sinne der Nachhaltigkeit. Da die EPV-Technologien noch am Anfang ihrer Entwicklung stehen, ist die Möglichkeit eines lenkenden Eingreifens durch gezielte Forschungsförderung bzw. Regulierung noch möglich. Wünschenswert wäre es daher, bereits in der Forschung und Entwicklung einen Kompromiss zu finden zwischen höchstem Wirkungsgrad, bester Stabilität, Wirtschaftlichkeit und ökologischer Nachhaltigkeit. Im Sinne der Kreislaufwirtschaft sollte die Recyclingfähigkeit bereits beim Design berücksichtigt werden, um wertvolle Metalle, „kritische Rohstoffe“ und Materialien wie Glas und Kunststoffe rückzugewinnen zu können.

Aber nicht nur Maßnahmen im Bereich Forschung und Entwicklung können die Nachhaltigkeit von EPVs fördern, sondern auch die Schaffung entsprechender politischer Rahmenbedingungen:

- Regulierung des End-of-life-Managements durch die Etablierung eines Rücknahmesystems, um die Materialrückgewinnung zu erhöhen und damit die Umweltauswirkungen zu reduzieren. Hierbei ist auf die Anwendungsmöglichkeiten von EPVs zu achten, da sich daraus unterschiedliche abfallrechtliche Behandlungspflichten ergeben können – so müssen z. B. EPVs in Gebäuden anders als tragbare Elektronik entsorgt werden. Die erweiterte Produzentenverantwortung sollte zur Anwendung kommen, ohne dabei allerdings einen Wettbewerbsvorteil für andere Formen der Stromgewinnung zu generieren.

- 7 Muteri, V., Cellura, M., Curto, D., Franzitta, V., Longo, S., Mistretta, M. und Parisi, M.L. (2020): Review on Life Cycle Assessment of Solar Photovoltaic Panels. Energies 13.
- 8 Kilowatt-Peak (kWp) ist ein besonderes Maß, das ausschließlich zur Messung der Leistung von Photovoltaikanlagen verwendet wird. Normalerweise wird elektrische Leistung in Watt gemessen. Der Zusatz „peak“ dient im Photovoltaikbereich der Vergleichbarkeit der Leistung verschiedener Photovoltaikmodule. Ein Photovoltaikmodul erbringt nämlich bei unterschiedlichen Bedingungen, etwa bei verschiedenen Außentemperaturen, eine andere Leistung. Um sicherzustellen, dass Module mit derselben angegebenen Leistung in Watt auch gleichwertig sind, wird die Leistung eines Photovoltaikmoduls von den Herstellern stets unter festgelegten Bedingungen, den sogenannten Standard-Testbedingungen, gemessen und im Datenblatt ausgewiesen. <https://www.wegatech.de/ratgeber/photovoltaik/grundlagen/kwp-kwh/>.
- 9 Althaus H.-J., Bauer, Ch., Doka, G., Dones, R., Frischknecht, R., Hellweg, S., Humbert, S., Jungbluth, N., Köllner, T., Loerincik, Y., Margni, M. und Nemecek, T. (2010): Implementation of Life Cycle Impact Assessment Methods. Ecoinvent Report Nr. 3. https://www.ecoinvent.org/files/201007_hischier_weidema_implementation_of_lcia_methods.pdf.
- 10 Bakhiyi, B., Labrèche, F. und Zayed, J. (2014) The photovoltaic industry on the path to a sustainable future – environmental and occupational health issues. Environment International 73, 224-234.

- ¹¹ Mariotti, N., Bonomo, M., Fagiolari, L., Barbero, N., Gerbaldi, C., Bella, F. und Barolo, C. (2020b): Recent advances in eco-friendly and cost-effective materials towards sustainable dye-sensitized solar cells. *Green Chemistry* 22(21), 7168-7218.
- ¹² Zendehele, M., Nia, N.Y. und Yaghoubinia, M. (2020): Reliability and Ecological Aspects of Photovoltaic Modules. Gok, A. (ed), IntechOpen.
- ¹³ European Commission & Joint Research Centre (2020): Critical Raw Materials for Strategic Technologies and Sectors in the EU. A Foresight Study. https://rmis.jrc.ec.europa.eu/uploads/CRMs_for_Strategic_Technologies_and_Sectors_in_the_EU_2020.pdf.
- ¹⁴ Europäische Kommission (2020): Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen. Widerstandsfähigkeit der EU bei kritischen Rohstoffen: Einen Pfad hin zu größerer Sicherheit und Nachhaltigkeit abstecken. COM(2020) 474 final.
- ¹⁵ European Commission & Joint Research Centre (JRC) (2021): CRM list 2020. <https://rmis.jrc.ec.europa.eu/?page=crm-list-2020-e294f6>.
- ¹⁶ Als Fullerene werden kugelförmige Moleküle aus Kohlenstoffatomen bezeichnet. Sie stellen die dritte Modifikation des Kohlenstoffs, neben Diamant und Graphit, dar.
- ¹⁷ Anctil A. und Fthenakis V. (2012): Third Generation Photovoltaics. Fthenakis, V. (ed), IntechOpen.
- ¹⁸ „Kleine Moleküle“ (Engl. „small molecules“) sind Stoffe, die im Gegensatz zu größeren, hochmolekularen Stoffen, wie z. B. langkettige Polymere, eine niedrige Molekülmasse besitzen. Dazu gehören etwa Rylene-Farbstoffe.
- ¹⁹ Espinosa, N., Laurent, A. und Krebs, F.C. (2015): Ecodesign of organic photovoltaic modules from Danish and Chinese perspectives. *Energy & Environmental Science* 8(9), 2537-2550.
- ²⁰ Parisi, M.L., Maranghi, S. und Basosi, R. (2014): The evolution of the dye sensitized solar cells from Grätzel prototype to up-scaled solar applications: A life cycle assessment approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 39, 124-138.
- ²¹ Søndergaard, R., Hösel, M., Angmo, D., Larsen-Olsen, T.T., Krebs, F.C., 2012. Roll-to-roll fabrication of polymer solar cells. *Mater. Today* 15, 36–49. [https://doi.org/10.1016/S1369-7021\(12\)70019-6](https://doi.org/10.1016/S1369-7021(12)70019-6).
- ²² Meneghetti, M., Talon, A., Cattaruzza, E., Celotti, E., Bellantuono, E., Rodriguez-Castellon, E., Meneghetti, S. und Moretti, E. (2020): Sustainable Organic Dyes from Winemaking Lees for Photoelectrochemical Dye-Sensitized Solar Cells. *Applied Sciences* 10.
- ²³ Kadro, J.M. und Hagfeldt, A. (2017): The End-of-Life of Perovskite PV. *Joule* 1, 29-46.
- ²⁴ Bae, S.-Y., Lee, S.Y., Kim, J.-w., Umh, H.N., Jeong, J., Bae, S., Yi, J., Kim, Y. und Choi, J. (2019): Hazard potential of perovskite solar cell technology for potential implementation of „safe-by-design“ approach. *Scientific Reports* 9.
- ²⁵ Richtlinie 2011/65/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 8. Juni 2011 zur Beschränkung der Verwendung bestimmter gefährlicher Stoffe in Elektro- und Elektronikgeräten. Amtsblatt der Europäische Union. L 174/88.
- ²⁶ Als „homogener Werkstoff“ wird in der EU-Verordnung ein Werkstoff von durchgehend gleichförmiger Zusammensetzung oder ein aus verschiedenen Werkstoffen bestehender Werkstoff, der nicht durch mechanische Vorgänge wie Abschrauben, Schneiden, Zerkleinern, Mahlen und Schleifen in einzelne Werkstoffe zerlegt oder getrennt werden kann, definiert.
- ²⁷ Kwak, J.I., Nam, S.-H., Kim, L. und An, Y.-J. (2020): Potential environmental risk of solar cells: Current knowledge and future challenges. *Journal of Hazardous Materials* 392.
- ²⁸ Şengül, H. und Theis, T.L. (2011): An environmental impact assessment of quantum dot photovoltaics (QDPV) from raw material acquisition through use. *Journal of Cleaner Production*, 19 (1), 21-31.
- ²⁹ Hardman, R. (2006): A Toxicologic Review of Quantum Dots: Toxicity Depends on Physicochemical and Environmental Factors. *Environmental Health Perspectives* 114(2), 165-172.
- ³⁰ Ayoubi, M., Naserzadeh, P., Hashemi, M. T., Reza Rostami, M., Tamjid, E., Tavakoli, M.M. und Simchi, A. (2017): Biochemical mechanisms of dose-dependent cytotoxicity and ROS-mediated apoptosis induced by lead sulfide/graphene oxide quantum dots for potential bioimaging applications. *Scientific Reports*, 7 (1), 12896.
- ³¹ Ahmad, F., Pandey, A. K., Herzog, A.B., Rose, J.B., Gerba, C.P. und Hashsham, S.A. (2012): Environmental applications and potential health implications of quantum dots. *Journal of Nanoparticle Research*, 14.
- ³² Eine Mindestmenge an EoL-Photovoltaikmodulen muss in der Praxis erreicht werden, um spezialisierte Recyclinganlagen wirtschaftlich betreiben zu können. Die Wirtschaftlichkeit von Recyclinganlagen hängt im Allgemeinen von zahlreichen Faktoren, wie Investitionskosten, Betriebskosten, Erlöse aus rückgewonnenen Materialien etc., ab.
- ³³ Als Schwarzmasse wird die Output- bzw. Feinfraktion aus der mechanischen Vorbehandlung von Lithium-Ionen-Batterien bezeichnet, die vorwiegend aus zerkleinertem Anoden- und Kathodenmaterial besteht.
- ³⁴ Horn D., Zimmermann J., Stauber R., Gutfleisch O. (2018): New efficient Recycling Process for Li-ion Batteries. 7th Conference on Future Automotive Technology, Proceedings (08.05.-09.05.2018). <https://mediatum.ub.tum.de/doc/1462984/1462984.pdf>.
- ³⁵ Siehe beispielsweise das Trennverfahren mittels Lichtblitze der Firma FLAXRES GmbH unter: https://www.flaxres.com/index_de.php.
- ³⁶ Sadasivuni, K.K., Deshmukh, K., Ahipa, T.N., Muzaffar, A., Ahamed, M.B., Pasha, S.K.K. und Al-Maadeed, M.A.-A. (2019): Flexible, biodegradable and recyclable solar cells: a review. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics* 30(2), 951-974.
- ³⁷ Charles, R.G., Douglas, P., Dowling, M., Liversage, G. und Davies, M.L. (2020): Towards Increased Recovery of Critical Raw Materials from WEEE – evaluation of CRMs at a component level and pre-processing methods for interface optimisation with recovery processes. *Resources, Conservation and Recycling* 161, 104923. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092134492030241X> und <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652618324673?via%3Dihub>.

IMPRESSUM

Medieninhaber: Österreichische Akademie der Wissenschaften; Juristische Person öffentlichen Rechts (BGBl 569/1921 idF BGBl I 31/2018); Dr. Ignaz Seipel-Platz 2, A-1010 Wien

Herausgeber: Institut für Technikfolgen-Abschätzung (ITA); Apostelgasse 23, A-1030 Wien; www.oeaw.ac.at/ita

Erscheinungsweise: Die NanoTrust-Dossiers erscheinen unregelmäßig und dienen der Veröffentlichung der Forschungsergebnisse des Instituts für Technikfolgen-Abschätzung im Rahmen des Projekts NanoTrust. Die Berichte werden ausschließlich über das Internetportal „epub.oeaw“ der Öffentlichkeit zur Verfügung gestellt:

epub.oeaw.ac.at/ita/nanotrust-dossiers/

NanoTrust-Dossier Nr. 057, August 2021:
epub.oeaw.ac.at/ita/nanotrust-dossiers/dossier057.pdf

ISSN: 1998-7293

Dieses Dossier steht unter der Creative Commons (Namensnennung-NichtKommerziell-KeineBearbeitung 2.0 Österreich)
Lizenz: creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.0/at/deed.de