

Recycling von Solarmodulen im Lehr-Lern-Kontext Chemie

Solarmodule spielen eine zentrale Rolle in der Energiewende und tragen maßgeblich zur Erzeugung erneuerbarer Energie bei. Mit einer Lebensdauer von durchschnittlich 25 bis 30 Jahren stellt sich jedoch die Frage, wie diese am Ende ihres Lebenszyklus nachhaltig entsorgt und recycelt werden können. Bis 2030 wird allein in Deutschland mit etwa 1,7 Millionen Tonnen Solarmüll gerechnet. Dieser Umstand verdeutlicht die Dringlichkeit effektiver Recyclingstrategien. Die EU-Richtlinie für Elektro- und Elektronik-Altgeräte (WEEE) schreibt vor, dass mindestens 80 % eines Solarmoduls recycelt werden müssen. Dies stellt sowohl eine technologische als auch eine logistische Herausforderung dar, insbesondere in Bezug auf die Trennung und Wiederverwertung der enthaltenen Materialien wie Glas, Aluminium und Silizium.

Recycling von Solarmodulen

Solarmodule bestehen hauptsächlich aus Glas, Aluminium, Silizium und Kunststoff. Die größten Anteile entfallen dabei auf Glas (70-80 %) und Aluminium (ca. 10 %), während Silizium und Kunststoff nur kleinere Anteile ausmachen. Für Glas und Aluminium bestehen bereits gut etablierte Recyclingprozesse mit hohen Recyclingquoten von bis zu 100 % (IRENA and IEA-PVPS, 2016). Schwieriger gestaltet sich das Recycling von Silizium, das nur 5-10 % der Masse eines Moduls ausmacht, jedoch in der Produktion erheblich zur CO₂-Bilanz beiträgt (Peplow, 2022). Trotz des Potenzials, durch das Recycling von Silizium große Mengen CO₂ und Energie zu sparen, werden derzeit nur 10-20 % des verwendeten Siliziums recycelt. Der Grund dafür liegt unter anderem im Aufbau einer Solarzelle. Um den Silizium-Wafer vor Witterungseinflüssen zu schützen, wird dieser in eine Schicht aus Ethylvinylacetat (EVA) eingebettet. In einem sogenannten Laminator werden die Schichten dann im Vakuum auf 150 °C erhitzt, wobei das EVA schmilzt, und eine dauerhafte Verbindung der Schichten bewirkt. Diese Laminierung ist für den Schutz der Solarzelle sehr wichtig, stellt jedoch ein großes Hindernis beim Recycling dar (Mertens, 2015). Die Delaminierung gestaltet sich als komplex und energieintensiv (Akram Cheema et al., 2024). Verschiedene Methoden zur Entfernung der EVA-Schicht – mechanisch, chemisch oder thermisch – werden derzeit erforscht und in der Industrie angewendet, wobei keine Methode bislang flächendeckend zum Einsatz kommt (Tembo & Subramanian, 2023). Die Herausforderung besteht darin, kosteneffiziente und umweltfreundliche Verfahren zu entwickeln, die gleichzeitig eine hohe Reinheit der zurückgewonnenen Materialien gewährleisten.

Recycling von Solarmodulen als Gegenstand des Lehr-Lern-Kontextes Chemie

Das Thema „Recycling von Solarmodulen“ bietet einen idealen Anknüpfungspunkt für die curriculare Innovationsforschung im Chemieunterricht. Es verknüpft zentrale chemische Konzepte, wie die Materialtrennung, chemische Reaktionen und Energieeinsparungen, mit innovativen Themen der Industrie und Forschung wie auch aktuellen gesellschaftlichen Herausforderungen. Im Rahmen der Bildung für nachhaltige Entwicklung (BNE) kann das Recycling von Solarmodulen nicht nur als technisches Thema, sondern auch im Kontext

globaler Ressourcenknappheit und Umweltschutzes thematisiert werden. Die curriculare Innovationsforschung zielt darauf ab, neue, zukunftsorientierte Themen in den Unterricht zu integrieren, die Schülerinnen und Schüler zu einer kritischen Auseinandersetzung mit Nachhaltigkeitsfragen anregen (Tausch, 2004). Der Chemieunterricht bietet hierbei eine hervorragende Plattform, um anhand realer Fragestellungen – wie der Rückgewinnung von Silizium oder der Trennung von EVA-Schichten – experimentelle Kompetenzen zu fördern und gleichzeitig ökologische und ökonomische Zusammenhänge zu vermitteln. Das Thema kann zudem in verschiedene Unterrichtsformate eingebunden werden, von klassischen Experimenten im Labor bis hin zu projektbasiertem Lernen, bei dem die Schülerinnen und Schüler interdisziplinär arbeiten und dabei chemische, wirtschaftliche und gesellschaftliche Aspekte berücksichtigen. So wird das Fach Chemie nicht nur als naturwissenschaftliches Fach, sondern auch als Medium für die Entwicklung von Problemlösungsfähigkeiten und verantwortungsbewusstem Handeln in einer zunehmend technologisierten und nachhaltigkeitsorientierten Welt genutzt.

Untersuchungsdesign und -methodik

Die Studie gliedert sich in zwei wesentliche Teile: einen praktischen und einen empirischen Teil.

Der **empirische Teil** der Studie untersucht allgemeine und spezifische Aspekte für eine sinnvolle Umsetzung von innovativen Themen im Chemieunterricht. Hierzu wurden qualitative Interviews mit Chemielehrkräften durchgeführt, um deren Wünsche, Anforderungen und Herausforderungen bei der Integration von technischen Themen wie dem Recycling von Solarmodulen in den Unterricht zu erfassen. Durchgeführt wurde die qualitative Fragebogenstudie mit fünf Gymnasiallehrkräften aus Rheinland-Pfalz. Die Auswertung der Interviews erfolgte mittels der qualitativen Inhaltsanalyse nach Mayring (2022) in Form einer induktiven Kategorienbildung.

Ergänzt wird dies durch eine quantitative Fragebogenstudie, die die Akzeptanz und Umsetzbarkeit solcher Themen im Schulkontext untersucht. Neben der allgemeinen Betrachtung von Unterrichtskonzepten zu aktuellen Forschungsinhalten liegt ein Fokus auf der spezifischen Thematik *Recycling von Solarmodulen*. Die Fragebogenstudie befindet sich gerade in der Durchführung und bislang haben n=245 Lehrkräfte aus Rheinland-Pfalz an der Befragung teilgenommen.

Der **praktische Teil** zielt auf die Entwicklung von Experimenten für den Chemieunterricht ab, die auf der aktuellen Forschung aus Industrie und Technik basieren. Dabei werden Experimente konzipiert, die zentrale chemische und technologische Aspekte des Recyclings von Solarmodulen veranschaulichen. Die Experimente orientieren sich an Forschungsergebnissen aus der Industrie, wie zum Beispiel der chemischen oder thermischen Entfernung der EVA-Schicht oder der Wiederaufbereitung von Siliziumwafern.

Durch diese zweigeteilte Untersuchungsmethodik wird sowohl die praktische Umsetzung im Unterricht als auch die theoretische Fundierung des Konzepts in der schulischen Praxis beleuchtet, um ein möglichst fundiertes und praxisnahes Unterrichtsmodell zu entwickeln.

Erste Erkenntnisse der empirischen Untersuchung

Die qualitative Befragung der Chemielehrkräfte ergab Einblicke in die Umsetzung innovativer Themen wie das *Recycling von Solarmodulen* im Chemieunterricht. Dabei wurden die *Einbindungsmöglichkeiten*, *allgemeine* sowie *inhaltliche Anforderungen* an ein Unterrichtskonzept sowie die *Herausforderungen* beleuchtet.

Ein zentrales Ergebnis ist, dass das Recycling von Solarmodulen aber auch Photovoltaik bislang wenig oder gar nicht im Unterricht integriert wird. Die Lehrkräfte sehen es jedoch als geeignetes Thema für die Oberstufe, insbesondere im Zusammenhang mit den Themengebieten Atommodelle, Metalle, Halbleiter und Kunststoffe. Hier wird es immer als eine Vertiefungsmöglichkeit genannt. Daraus folgt eine notwendige Agilität der zu vermittelnden Inhalte in Bezug auf die verschiedenen Anknüpfungspunkte. Die Lehrkräfte äußerten auch allgemein in Bezug auf aktuelle Themen aus Industrie und Forschung den Wunsch nach flexiblen und modularen Unterrichtskonzepten, die es ermöglichen, bestimmte Inhalte gezielt in den Unterricht zu integrieren oder je nach Bedarf zu erweitern oder zu vertiefen. Ein weiteres Anliegen war die Bereitstellung fundierter, leicht zugänglicher Daten und Zahlen, insbesondere im Bereich des Recyclings. Viele gaben an, dass verlässliche, aussagekräftige und insbesondere aktuelle Daten, Zahlen und Fakten eine zu zeitintensive Recherche benötigen, was eine Herausforderung für die Unterrichtsgestaltung darstellt.

„Das was mir zum Beispiel fehlt beim Recycling oder bei vielen Betrachtungen sind wirklich Zahlen [...]. Dass man da halt keine Recherche mehr betreiben muss, weil das Problem ist zum Beispiel auch bei vielen Recyclingfragen. Ich komme da schlecht an Zahlen ran, die wirklich valide sind. Oder die auch wirklich eine echte Aussagekraft haben.“

Inhaltlich betonten die Lehrkräfte, dass Silizium als zentrales Material für die Photovoltaik im Fokus eines solchen Unterrichtskonzepts stehen sollte. Darüber hinaus wurde die Integration gesellschaftspolitischer Aspekte, wie die Bedeutung des Recyclings für die Nachhaltigkeit und die Interessen der Wirtschaft, als relevant erachtet. Insgesamt herrschte Konsens darüber, dass das Thema *Recycling von Solarmodulen* eine hohe Relevanz für die Bildung für nachhaltige Entwicklung (BNE) besitzt und einen Beitrag zum Verständnis moderner Technologien und ihrer Auswirkungen auf Umwelt und Gesellschaft leisten kann. Es wurde verdeutlicht, dass eine Umsetzung auch Informationen aus realen Recyclingbetrieben und eventuell auch der Aufbereitung von Solarmüll umfassen sollte. Als Herausforderungen wurden insbesondere der zeitliche Faktor sowie der Stundenumfang eines solchen Projektes genannt. Auch die Frage, wie neben dem Einsatz von Modellexperimenten auch die Nutzung von realem Solarmüll in das Konzept integriert werden könnte, stand im Fokus der Betrachtungen.

Fazit und Ausblick

Die bisherigen Ergebnisse zeigen, dass das Recycling von Solarmodulen, insbesondere die Rückgewinnung von Silizium, noch vor großen Herausforderungen steht. Im Bildungsbereich besteht großes Potenzial, das Thema *Recycling von Solarmodulen* verstärkt in den Unterricht zu integrieren, um Schülerinnen und Schüler für die technischen und gesellschaftlichen Aspekte des nachhaltigen Ressourcenmanagements zu sensibilisieren und Nachhaltigkeitskompetenzen zu stärken. Es besteht der Wunsch nach flexiblen und modularen Unterrichtskonzepten, die es Lehrkräften erlauben, aktuelle Themen aus Industrie und Forschung bedarfsgerecht zu integrieren. Dabei zeigt sich ein Mangel an leicht zugänglichen, aktuellen und verlässlichen Daten als wesentliche Herausforderung, die eine zeiteffiziente Vorbereitung erschwert. Auch die Betrachtung des Recyclings der physischen Infrastruktur erneuerbarer Energien aber auch die chemischen Aspekte des Ressourcenmanagements von Technologien wie KI stellen Themen für diesen Bereich dar.

Literatur

- Akram Cheema, H., Ilyas, S., Kang, H. & Kim, H. (2024). Comprehensive review of the global trends and future perspectives for recycling of decommissioned photovoltaic panels. *Waste management* (New York, N.Y.), 174, 187–202. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2023.11.025>
- IRENA and IEA-PVPS. (2016). End-of-Life Management: Solar Photovoltaic Panels. International Renewable Energy Agency and International Energy Agency Photovoltaic Power Systems. <https://www.irena.org/publications/2016/Jun/End-of-life-management-Solar-Photovoltaic-Panels> (29.10.2024)
- Mayring, P. (2022). *Qualitative Inhaltsanalyse. Grundlagen und Techniken* (13. Aufl.). Beltz
- Mertens, K. (2015). *Photovoltaik: Lehrbuch zu Grundlagen, Technologie und Praxis* (3., neu bearbeitete und erweiterte Auflage). Hanser Verlag
- Peplow, M. (2022). Solar Panels Face Recycling Challenge. *ACS central science*, 8(3), 299–302. <https://doi.org/10.1021/acscentsci.2c00214> (29.10.2024)
- Tausch, M. (2004). Curriculare Innovation. *Praxis der Naturwissenschaften - Chemie in der Schule* (53), Artikel 8, 18–21
- Tembo, P. M. & Subramanian, V. (2023). Current trends in silicon-based photovoltaic recycling: A technology, assessment, and policy review. *Solar Energy*, 259, 137–150. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2023.05.009> (29.10.2024)