

**Verena Luisa Aufderheide**

## **Zirkuläre Photovoltaik-Anlagen in Anbieternetzwerken**

**Steigerungspotentiale durch die Digitalisierung**

**Arbeitsbericht Nr. 18  
Juli 2023**

## ABSTRACT

Zirkuläre Photovoltaik-Anlagen in Anbieternetzwerken – Steigerungspotentiale durch die Digitalisierung

Die Circular Economy (CE) verspricht einen nachhaltigeren Umgang mit Ressourcen, indem Produkte im Kreislauf geführt werden und eine Transformation von einer linearen zu einer zirkulären Supply Chain (SC) angestrebt wird. Insbesondere digitale Technologien als Enabler für die CE werden in den letzten Jahren verstärkt in Forschung und Praxis untersucht und angewendet. Der vorliegende Beitrag analysiert, an welcher Stelle der Wertschöpfungskette welche digitalen Technologien Steigerungspotentiale für zirkuläre Photovoltaik-Anlagen (PV-Anlagen) bereithalten.

***Keywords: Circular Economy, Digitalisierung, Photovoltaikanlagen, Anbieternetzwerke***

# INHALTSVERZEICHNIS

<b>1. Netzwerkstrukturen für PV-Anlagen .....</b>	<b>1</b>
<b>2. Digitale Technologien für PV-Anlagen .....</b>	<b>3</b>
<b>3. Einsatz digitaler Technologien bei zirkulären PV-Anlagen .....</b>	<b>5</b>
3.1 Digitalisierung des Netzwerkes für PV-Anlagen.....	5
3.2 Automatisierung und digitale Unterstützung in der BOL.....	6
3.3 Digitale Kommunikation während der MOL .....	7
3.4 Verbesserte Kreislaufführung in der EOL .....	7
3.5 Digitales Kundenmanagement.....	8
<b>4. Fazit .....</b>	<b>9</b>
<b>LITERATURVERZEICHNIS.....</b>	<b>10</b>

## ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Netzwerk einer zirkulären PV-Anlage (in Anlehnung an Aufderheide et al., 2022)	2
Abbildung 2: Digitale Technologien für zirkuläre PV-Anlagen	5

## SYMBOLVERZEICHNIS

AR	Augmented Reality
BOL	Beginning-of-Life-Phase
CC	Cloud Computing
CE	Circular Economy
CO <sub>2</sub>	Kohlenstoffdioxid
CPS	Cyberphysische Systeme
CS	Cybersecurity
EOL	End-of-Life-Phase
IoT	Internet of Things
KI	Künstliche Intelligenz
ML	Maschinelles Lernen
MOL	Middle-of-Life-Phase
PSS	Product-Service-System
PV	Photovoltaik
SC	Supply Chain
VR	Virtual Reality
WSP	Wertschöpfungspartner

# 1. Netzwerkstrukturen für PV-Anlagen

PV-Anlagen sind ein wichtiger Baustein bei der Energiewende, da sie die CO<sub>2</sub>-Emissionen bei der Stromerzeugung verringern können (García-López et al., 2023). Allerdings stehen Kunden vor einer Reihe von Herausforderungen, weshalb PV-Anlagen bisher noch nicht flächendeckend eingesetzt werden. Dazu zählen in der Beginning-of-Life-Phase (BOL) die hohen Anfangsinvestitionen und mangelndes Wissen über verschiedene Technologien, in der Middle-of-Life-Phase (MOL) mangelnde Erfahrung mit notwendigen Wartungsarbeiten und einer nachhaltigen Nutzung, sowie in der End-of-Life-Phase (EOL) eine umweltgerechte Entsorgung und Rückbau der Anlage, so dass Ressourcen erneut genutzt werden können (Överholm, 2017; Ndzibah et al., 2022).

Durch eine effiziente Strategie zur Überwindung dieser Herausforderungen können die Attraktivität der PV-Anlagen und somit deren Verbreitung sowie die Kreislaufführung gesteigert werden (Overholm, 2015). Als Ansatzpunkt dafür dienen Anbieternetzwerke, die die PV-Anlage nicht als reines Produkt verkaufen, sondern eine kundenorientierte Servicelösung als Product-Service-System (PSS) anbieten, sodass anstelle des Besitzes die Nutzung der PV-Anlagen in den Vordergrund rückt (D'Agostin et al., 2020). Neben dem Anbieter dieses Geschäftsmodells sind weitere Wertschöpfungspartner (WSP) in den verschiedenen Phasen notwendig (siehe auch Abbildung 1) (Aufderheide et al., 2022):

- **BOL:** weltweit verteilte Lieferanten und Produzenten verschiedener Bauteile, Handwerker zur Installation und Anbindung an das Stromnetz
- **MOL:** Abrechnungsdienstleister, Servicepartner, Handwerker für Wartungs- und Reparaturmaßnahmen
- **EOL:** spezialisierte Aufbereiter, Recycler und Entsorgungsunternehmen

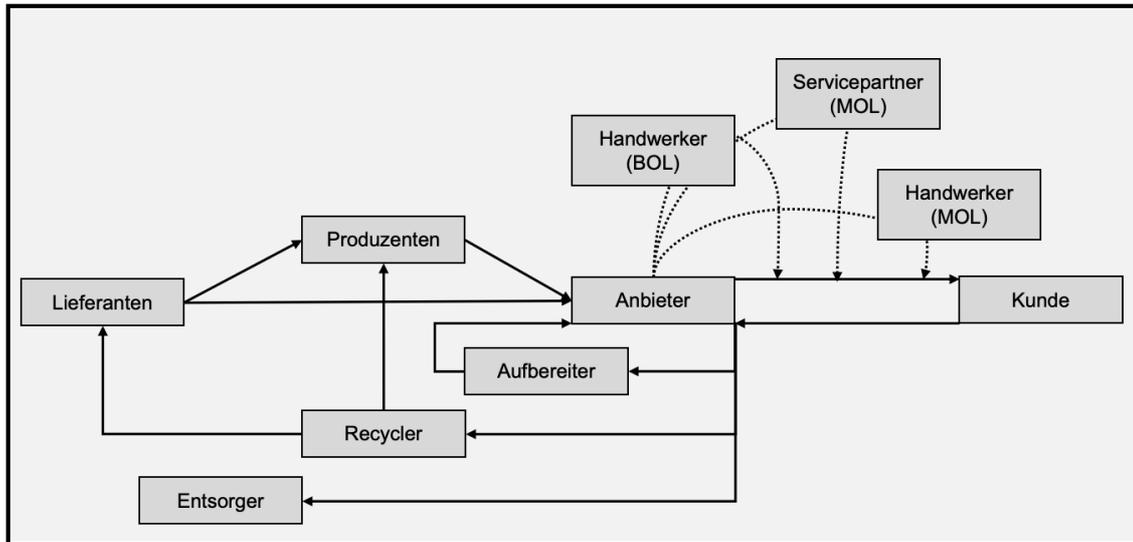


Abbildung 1: Netzwerk einer zirkulären PV-Anlage  
(in Anlehnung an Aufderheide et al., 2022)

In diesem Netzwerk kommt dem Anbieter als fokalem Unternehmen eine besondere Rolle zu, da er nicht nur den Kontakt zum Kunden pflegt, sondern auch das weitverzweigte Netzwerk koordiniert. Dieses Netzwerk besitzt einen großen Vorteil bei der Überwindung der Herausforderungen, indem es Kunden vielfältig unterstützt (Overholm, 2015):

- **BOL**: Reduktion der Kosten für Kunden, indem nicht mehr die PV-Anlage an sich verkauft wird, sondern ihre Nutzung
- **MOL**: Übernahme der langfristigen Serviceprozesse durch das Netzwerk
- **EOL**: Übernahme des Rückbaus der Anlage und der umweltgerechten Weiterverarbeitung bzw. Entsorgung

Durch die Zusammenarbeit im Netzwerk kann eine Verbreitung von PV-Anlagen erreicht werden. Auch wenn PV-Anlagen als nachhaltigere Alternative zur Stromerzeugung gelten, ist insbesondere die Kreislaufführung der Ressourcen weiter auszubauen, da in den PV-Anlagen meist hochwertige Stoffe verbaut sind (Ndzibah et al., 2022).

## 2. Digitale Technologien für PV-Anlagen

Um die Kreislaufführung und Attraktivität der PV-Anlagen zu fördern, stehen dem fokalen Unternehmen verschiedene digitale Technologien zur Verfügung, die an unterschiedlichen Schnittstellen in der Wertschöpfungskette wirken. Nachfolgend werden zunächst ausgewählte Technologien vorgestellt, um anschließend die Steigerungspotentiale für zirkuläre PV-Anlagen im Netzwerk zu erarbeiten.

Das *Sensing* meint den Verbau von Sensoren in Produkten zur Dokumentation von Daten, wie z.B. über die Nutzung oder des Zustandes des Produktes (Mengata et al., 2022).

Die mittels Sensing aufgenommenen Daten können über das *Internet of Things (IoT)* verbreitet werden. So lassen sich verschiedene Objekte miteinander vernetzen (Habib et al., 2022). Diese können als *digitaler Zwilling* dargestellt werden, was das virtuelle Abbild eines Objektes ist. Der digitale Zwilling kann über den gesamten Lebenszyklus genutzt werden und Echtzeitdaten zur Verfügung stellen (Chauhan et al., 2022).

Die *digitale Plattform* ermöglicht eine schnelle und einfache Kommunikation zwischen verschiedenen WSP und ist insbesondere bei Anbieternetzwerken von entscheidender Bedeutung (Senyo et al., 2019).

*Cloud Computing (CC)* ist die Bereitstellung der informations- und softwaretechnischen Ressourcen über das Internet. Dazu zählen z.B. Server und Datenbanken (Song et al., 2020).

Werden die Produkte als mechanische und elektronische Teile sowie die informations- und softwaretechnischen Komponenten zusammen betrachtet, spricht man von *Cyberphysischen Systemen (CPS)* (Zhong et al., 2019). Innerhalb der CPS sind *kollaborative Roboter* weit verbreitet, die bei verschiedenen Prozessen mit Menschen zusammenarbeiten, um diese zu entlasten (Chauhan et al., 2022).

*Big Data* bezeichnet die große Datenmenge, die bei der Sammlung entsteht und durch ihre Schnelllebigkeit und Komplexität charakterisiert wird. Zur Analyse reichen herkömmliche Methoden nicht aus, sondern es werden sogenannte *Big Data Analytics* Methoden eingesetzt (Walch et al., 2020).

Die *Künstliche Intelligenz (KI)* nutzt diese Datenmengen, um das menschliche Lernen und Denken auf den Computer zu übertragen. Das *maschinelle Lernen (ML)*, ein Teilbereich der KI, erkennt mittels Algorithmen Muster und Gesetzmäßigkeiten und entwickelt damit Lösungen aufgrund von Erfahrungen (Utama et al., 2023).

Zur *Cybersecurity (CS)* zählen Technologien, die Daten vor Manipulationen und Fremdeingriffen schützen (Jarmakiewicz et al., 2017).

Die *Blockchain* ist ein nicht manipulierbares Register, das Daten und Transaktionen aufzeichnen und verschiedenen WSP zur Verfügung stellen kann (Zhang et al., 2021).

Unter dem Begriff Mixed Reality werden die *Virtual Reality (VR)* und die *Augmented Reality (AR)* zusammengefasst. Während VR eine computergenerierte Wirklichkeit auf Leinwände überträgt, wie z.B. VR-Brillen, werden mittels AR digitale Elemente in die reale Welt integriert, was auf einem Bildschirm sichtbar wird (Erten et al., 2022).



PV-Anlagen sind im Netzwerk zu steuern und überwachen. Das *Sensing* dient der Dokumentation über die Nutzung und den Zustand der PV-Anlagen (Mengata et al., 2022). Durch einen *digitalen Zwilling* kann dies in Echtzeit geschehen. Die PV-Anlagen können gesammelt beim Anbieter dargestellt und remote überwacht werden (Chauhan et al., 2022).

Eine schnelle Kommunikation im Netzwerk bietet einen entscheidenden Wettbewerbsvorteil. Um die Kommunikation zu vereinfachen, werden *digitale Plattformen* verwendet, auf die zunächst alle WSP Zugriff haben. Dennoch ist es möglich, bestimmte Informationen individuell zu senden, wenn nicht alle WSP alle Informationen erhalten sollen (Senyo et al., 2019).

Häufig werden die digitalen Technologien noch nicht vollumfänglich eingesetzt, da Unternehmen um ihre Daten besorgt sind. Hier eignen sich Technologien der CS (Jarmakiewicz et al., 2017). Insbesondere die *Blockchain* bietet ein hohes Sicherheitsniveau für Daten und eignet sich daher in komplexen Netzwerkstrukturen, wie sie bei einem Angebot zirkulärer PV-Anlagen gegeben sind (Zhang et al., 2021).

### **3.2 Automatisierung und digitale Unterstützung in der BOL**

In der BOL wird zunächst die PV-Anlage individuell für den Kunden konfiguriert und in Auftrag gegeben. Anschließend findet eine Kommunikation zwischen den Lieferanten, den Produzenten und dem Anbieter statt. Nachdem die Fertigung der PV-Anlagen abgeschlossen ist, wird diese beim Kunden installiert und an das Stromnetz angebunden. Hierfür werden Handwerker benötigt. In allen Prozessen können digitale Technologien helfen.

Die Beschaffung von Rohstoffen zur Herstellung von Produkten ist häufig durch hohe Unsicherheiten gekennzeichnet (Friedemann / Schumann, 2010). Durch *Big Data* und *Big Data Analytics* können Bestände und Kapazitäten genauer bestimmt und übermittelt werden, sodass die Beschaffung mit konkreteren Mengenangaben rechnen kann (Alcayaga / Hansen, 2022). Das führt dazu, dass nur benötigte Rohstoffe abgebaut werden und die Ressourcenverknappung abgemildert wird. Neben der genauen Analyse kann die Beschaffung komplett digitalisiert werden, indem sie mittels *KI* automatisiert wird (Utama et al., 2023).

In der Produktion von PV-Anlagen werden *CPS* eingesetzt, die eine hohe Produktivität aufweisen. Außerdem verringern digitale Technologien wie beispielsweise 3D-Drucker

Abfälle bei der Produktion. Durch *ML* können Produktionsprozesse verbessert werden, was zu einem geringeren Ausschuss führt (Oettmeier / Hofmann, 2019). Die geringeren Abfallmengen und Ausschussquoten schonen die Ressourcen.

Bei der Produktion und Installation der PV-Anlagen helfen *kollaborative Roboter*, die direkt an Produktionsprozessen beteiligt sind. Beispielsweise können Roboter die PV-Module auf dem Dach an der richtigen Stelle halten, während der Handwerker diese montiert (Chauhan et al., 2022). *AR* kann dem Handwerker bestimmte Prozessschritte direkt anzeigen, sodass diese schneller und einfacher ausgeführt werden können, was insbesondere bei individuellen Auftragsfertigungen hilfreich sein kann. So können Prozesse in der BOL beschleunigt und vereinfacht werden (Jacob, 2019).

### **3.3 Digitale Kommunikation während der MOL**

In der MOL sind es die Servicepartner und Handwerker, die vorwiegend Serviceprozesse zur Sicherung der Nutzbarkeit der PV-Anlagen ausführen. Auch hier können digitale Technologien bei der Durchführung helfen.

Mittels *CC* lassen sich die Daten der verschiedenen PV-Anlagen beim Anbieter oder Stromversorger sammeln und digital zur Verfügung stellen. Servicepartner können so direkt auf Daten zugreifen und z.B. Abrechnungen erstellen (Song et al., 2020).

Durch *ML* und *KI* werden die gewonnenen Daten für die Überprüfung der Notwendigkeit von Wartungen angewendet (Utama et al., 2023) und mittels *CPS* remote ausgeführt (Patil et al., 2022).

Wenn der Zustand und der Ort der PV-Anlage sowie einzelner verbauter Ressourcen über *Sensing* aufgenommen und mittels *digitaler Plattformen* verfügbar sind, ist eine genauere Planung für die Aufbereitung und das Recycling möglich. Somit kann eine frühzeitige Aufbereitung bspw. durch digitale Upgrades durchgeführt werden, was die Nutzungsdauer verlängert.

### **3.4 Verbesserte Kreislaufführung in der EOL**

In der EOL werden die PV-Anlagen umweltgerecht demontiert und durch WSP recycelt oder entsorgt.

Durch das *Sensing* kann nicht nur der Zustand der PV-Anlage erfasst werden, sondern auch die einzelnen verbauten Rohstoffe. Kann die PV-Anlage nicht aufbereitet werden und wird in der EOL in ihre Bestandteile zerlegt, die anschließend der Beschaffung und Produktion als neue Rohstoffe dienen (Ndzibah et al., 2022).

Am Ende des Lebenszyklus der PV-Anlage ist trotz der Kreislaufführung immer noch eine Entsorgung notwendig. Durch den Einsatz von *CPS* entstehen in der Entsorgungswirtschaft zahlreiche Potentiale, die die Umweltbelastungen verringern (Patil et al., 2022).

### **3.5 Digitales Kundenmanagement**

Die Beziehung zwischen dem Anbieter und dem Kunden stellt eine besondere Verbindung im Netzwerk da. Während der Anbieter das ganze Netzwerk im Hintergrund steuert, hat der Kunde nur Kontakt zum Anbieter und kann häufig nicht genau unterscheiden, welche WSP zum Netzwerk zählen. Der Kunde hat einen besonderen Einfluss auf die Kreislauffähigkeit und die nachhaltige Nutzung der PV-Anlage. Der Anbieter kann ihn dabei allerdings unterstützen.

Der Kunde kann durch eine *digitale Plattform* in Form einer App dahingehend unterstützt werden, dass weniger Umweltbelastungen entstehen und eine Wiederverwendung ermöglicht wird. Damit wird nicht nur die Nachhaltigkeit während der Nutzung verbessert und die Nutzungsdauer der PV-Anlage verlängert, sondern eine Kreislaufführung häufig sogar erst ermöglicht.

PV-Anlagen lassen sich individuell planen und gestalten. Neben der Möglichkeit, mittels *digitaler Plattform* dem Kunden die Zusammenstellung komplett selbst zu übertragen, kann mittels *AR* gezeigt werden, an welchen Stellen die PV-Anlagen installiert werden und wie dies aussehen wird. Weitere digitale Zusatzleistungen führen wie die Möglichkeit der Appnutzung erhöhen den Kaufanreiz weiter (Aufderheide et al., 2022).

## **4. Fazit**

PV-Anlagen haben in Hinblick auf die Energiewende eine große Bedeutung. Jedoch sind sie aktuell noch nicht flächendeckend verbreitet. Mithilfe digitaler Technologien kann nicht nur das Anbieternetzwerk gestärkt werden, sondern auch die Kreislauffähigkeit der PV-Anlagen gesteigert werden. Der Beitrag hat gezeigt, welche Technologien an welcher Stelle innerhalb der Wertschöpfungskette unterstützen. Dies wurde teilweise bereits in der Literatur diskutiert und in Teilen in der Praxis umgesetzt. Jedoch fehlt es noch an gemeinschaftlichen Umsetzungen über die komplette Wertschöpfungskette, sodass das voll Potential der digitalen Technologien für zirkuläre PV-Anlagen noch nicht erreicht wird.

## LITERATURVERZEICHNIS

1. Alcayaga, A.; Hansen, E.: Internet of things enabling the circular economy: An Expert Study of Digitalisation Practices in B2B Firms (IQD Research 2022, No. 1). Institute for Integrated Quality Design (IQD), Johannes Kepler University Linz (JKU), Austria.
2. Aufderheide, V.L.; Montag, L.; Steven, M.: Conceptualizing Smart-Circular Product-Service Ecosystems for the Photovoltaic Power Industry, in: Baumann, S. (Hrsg.) Handbook on Digital Business Ecosystems, Cheltenham 2022.
3. Chauhan, C.; Parida, V.; Dhir, A.: Linking circular economy and digitalisation technologies: A systematic literature review of past achievements and future promises, in: Technological Forecasting & Social Change 177, 2022, S. 121508.
4. D'Agostin, A.; Medeiros, J. de; Vidor, G.; Zulpo, M.; Moretto, C.: Drivers and barriers for the adoption of use-oriented product-service systems: A study with young consumers in medium and small cities. Sustainable Production and Consumption 21, 2020, S. 92–103.
5. Erten, B.; Oral, B.; Yakut, M. Z.: The role of virtual and augmented reality in occupational health and safety training of employees in PV power systems and evaluation with a sustainability perspective, in: Journal of Cleaner Production, Volume 379 (2), 2022, S. 134499.
6. Friedemann, S.; Schumann, M.: Der Umgang mit Unsicherheit in der Produktion bei der Nutzung von nachwachsenden Rohstoffen – State of the Art, in: Arbeitsbericht des Instituts für Wirtschaftsinformatik Nr. 1/2010.
7. García-López, M.; Montano, B.; Melgarejo, J.: The financial competitiveness of photovoltaic installations in water utilities: The case of the Tagus-Segura water transfer system. Solar Energy, 249, 2023, S. 734-743.
8. Habib, M.; Gram, A.; Harrag, A.; Wang, Q.: Optimized management of reactive power reserves of transmission grid-connected photovoltaic plants driven by an IoT solution, in: Electrical Power and Energy Systems 143, 2022, S. 108455.
9. Jacob, M.: Digitalisierung & Nachhaltigkeit – Eine unternehmerische Perspektive, Wiesbaden 2019.

10. Jarmakiewicz, J.; Parobczak, K.; Maslanka, K.: Cybersecurity protection for power grid control infrastructures, in: *International Journal of critical infrastructure protection* 18, 2017, S. 20-33.
11. Mengata, G. M.; Perabi, S. N.; Ndi, F. E.; Wiysahnyuy, Y. S.: Characterization of solar photovoltaic modules powered by artificial light for use as a source for smart sensors, in: *Energy Reports* 8, 2022, S. 12105-12116.
12. Ndzibah, E.; Pinilla-De La Cruz, G. A.; Shamsuzzoha, A.: Collaboration towards value creation for end-of-life solar photovoltaic panel in Ghana. *Journal of Cleaner Production*, 333, 2022, S. 129969.
13. Oettmeier, K.; Hofmann, E.: Additive Fertigung und deren Auswirkungen auf Supply Chains, in: Obermaier, R. (Hrsg.): *Handbuch Industrie 4.0 und Digitale Transformation*, Wiesbaden 2019.
14. Överholm, H.: Alliance formation by intermediary ventures in the solar service industry: implications for product–service systems research, in: *Journal of Cleaner Production* 140, 2017, S. 288–298.
15. Overholm, H.: Collectively created opportunities in emerging ecosystems: The case of solar service ventures. *Technovation* 39-40, 2015, S. 14–25.
16. Patil, T., Rebaioli, L., Fassi, I.: Cyber-physical systems for end-of-life management of printed circuit boards and mechatronics products in home automation: A review, in: *Sustainable Materials and Technologies* 32, 2022, e00422.
17. Senyo, P.; Liu, K.; Effah, J.: Digital business ecosystem: Literature review and a framework for future research. *International Journal of Information Management* 47, 2019, S. 52–64.
18. Song, Y.; Chen, Y.; Yu, Z.; Huang, S.; Shen, C.: CloudPSS: A high-performance power system simulator based on cloud computing, in *Energy Reports* 6, 2020, S. 1611-1618.
19. Utama, C.; Meske, C.; Schneider, J.; Schlatmann, R.; Ulbrich, C.: Explainable artificial intelligence for photovoltaic fault detection: A comparison of instruments, in: *Solar Energy* 249, 2023, S. 139-151.
20. Walch, A.; Castello, R.; Mohajeri, N.; Scartezzini, J.-L.: Big data mining for the estimation of hourly rooftop photovoltaic potential and its uncertainty, in: *Applied Energy* 262, 2020, S. 114404.

21. Zhang, T.; Yang, J.; Li, J.; Yang, Z.; Jin, K.: Research in local consumption method of distributed photovoltaic generation for benefits of multi parties based on blockchain, in: *Energy Reports* 7, 2021, S. 185-190.
22. Zhong, S.; Deng, S.; Zhao, J.; Wang, Y.; Su, P.: A Case Study of Operation Optimization on A Renewable Energy Building by E-CPS Method: From Both Sides of Supply and Demand, in: *Energy Procedia* 158, 2019, S. 6145-6151.