



# **Ressourcen sparen, Kosten senken und Resilienz stärken?**

Eine Fallstudie zu wirtschaftlichen Potenzialen der  
Kreislaufwirtschaft am Beispiel Photovoltaik bei EnBW

Vorwort	05
1. Einleitung: Kreislaufwirtschaft – vom großen Versprechen zum realen Business Case	06
2. Überblick: Kreislaufwirtschaft im Kontext der Energieerzeugung durch Photovoltaik (PV)	08
2.1 Politische Rahmenbedingungen der Kreislaufwirtschaft	08
2.2 Der Begriff Kreislaufwirtschaft	10
2.3 Die 9R-Strategien in der PV-Wertschöpfungskette	14
3. Status quo: Kreislaufwirtschaft bei EnBW	18
3.1 Welche Rolle spielt Kreislaufwirtschaft bereits bei EnBW?	19
3.2 Rahmenbedingungen der PV bei EnBW	20
3.3 Physische Bestandteile eines PV-Parks	20
4. Pilotprojekt: Realisierbare und wirtschaftlich attraktive Maßnahmen identifizieren	23
4.1 Projektdesign	14
4.2 Bewertung der Kreislaufmaßnahmen	16
5. Ergebnis: Der Business Case Kreislaufwirtschaft bei einem Energieunternehmen	36
5.1 Übergeordnete Erkenntnisse: Handlungsspielräume der EnBW	36
5.2 Konkrete Kreislaufwirtschaftspotenziale: Identifizierte Handlungsfelder	37
6. Fazit	39
Abkürzungen	40
Bildverzeichnis	41
Ansprechpersonen	42

# Vorwort

## Liebe Leserinnen und Leser,

Fragen der Resilienz und der Bezahlbarkeit von Energie sind für die Energiebranche zentral. Kreislaufwirtschaft soll hierzu einen Beitrag leisten. Die Rahmenbedingungen werden vor allem auf europäischer Ebene durch den Circular Economy Action Plan (CEAP) und gesetzliche Instrumente wie die Ecodesign-Verordnung (ESPR) gesetzt und bestehende deutsche Gesetze hieran angepasst. Hiermit sind Chancen und Risiken für bestehende und zukünftige Geschäftsmodelle zu erwarten sowie Auswirkungen auf operative Kennzahlen. Gleichzeitig ist das Thema Kreislaufwirtschaft oftmals schwer greifbar: Einerseits ist es geprägt von häufig kleinteiligen technischen und wirtschaftlichen Fragestellungen, andererseits umspannt es ganze Wertschöpfungsketten und Stakeholder.

In einem Pilotprojekt wollten wir daher ehrlich und ergebnisoffen herausfinden, welche kurz- und mittelfristigen Potenziale – konkret in einem Zeitraum von bis zu drei bis fünf Jahren – die Kreislaufwirtschaft in der Energiewirtschaft tatsächlich bietet. Unser Projekt war kein originäres Nachhaltigkeitsprojekt: Im Mittelpunkt standen operative Fragen aus Einkauf, Bau, Betrieb

und Rückbau. Wir sind weder mit der Ambition einer Zielvorgabe für die ferne Zukunft gestartet noch mit einer berichtserstattungsgetriebenen Zielsetzung (ESRS E5). Wir wollten eine Antwort auf die Frage finden, ob und wie sich Ansätze der Ressourcenschonung auch ökonomisch tragfähig und praktisch umsetzbar gestalten lassen – gerade in Zeiten, in denen Energieunternehmen vor steigenden Kosten, Effizienzdruck und wandelnden Marktbedingungen stehen. Unser Ziel war, Chancen und Grenzen ressourceneffizienter Strategien in der Photovoltaik zu prüfen – nicht nur in der Theorie, sondern auch dort, wo selbst wohlmeinende Potenzialstudien sich mitunter mehr vom Wünschen als von der Empirie leiten lassen. Gleichzeitig sollte ein Ansatz entwickelt werden, der auch auf weitere Aktivitäten im Unternehmen und darüber hinaus übertragbar ist.

Unsere Ergebnisse zeigen: Es lohnt sich, genauer hinzusehen. Manche Hebel sind kleiner als erwartet, andere überraschend wirkungsvoll. Entscheidend ist, Materialkreisläufe nicht nur zu schließen, sondern neu zu denken – unter Einbeziehung aller relevanten Stakeholder entlang der Wertschöpfungskette. Dieses White Paper soll

eine Einladung sein, Konzepte praktisch zu erproben: zu prüfen, wie sich Materialien sinnvoller einsetzen, Kosten senken und Prozesse zugleich robuster und nachhaltiger gestalten lassen. Die vertiefte Auseinandersetzung mit der Resilienz konnten wir anstoßen und erste Teilergebnisse erzielen, die in weiteren Projekten überprüft und vertieft werden sollten.

Dieses Arbeitsergebnis – mit allen Pro- und Contra-Punkten zu kreislauffähigem Wirtschaften – war nur möglich durch die enge, vertrauensvolle und ergebnisorientierte Zusammenarbeit zwischen EnBW und Deloitte. Unser Dank gilt allen Beteiligten, die mit Fachkenntnis, Offenheit und Engagement zu diesem Ergebnis beigetragen haben.

Mit dieser gemeinsamen Arbeit verbindet uns nicht nur das Interesse an pragmatischen Lösungen, sondern auch die Suche nach einer gemeinsamen Sprache, um über Kreislaufwirtschaft und Ressourceneffizienz differenziert, ehrlich und zugleich praxisnah zu diskutieren. Wir sind offen für den Diskurs zu diesen und ähnlichen Fragestellungen.



**Dr. Lothar Rieth**  
Leiter Nachhaltigkeit  
EnBW  
l.rieth@enbw.com



**Dr. Matthias Schmidt**  
Partner Sustainability Assurance  
Deloitte  
mattschmidt@deloitte.de

# 1. Einleitung

## Kreislaufwirtschaft – vom großen Versprechen zum realen Business Case

Das Thema Kreislaufwirtschaft ist spätestens seit der Veröffentlichung des EU Green Deal in aller Munde. Längst beschränken sich die Diskussionen nicht mehr auf Fachkreise aus den Bereichen Umwelt und Nachhaltigkeit; auch eine breitere wirtschaftspolitische Debatte über die strategische Relevanz von Kreislaufwirtschaft ist entfacht.

Dabei wird die Kreislaufwirtschaft als Europas neues Erfolgsmodell gehandelt und auf signifikante Wertschöpfungspotenziale von mehreren Billionen US-Dollar verwiesen.<sup>1</sup> Im Zentrum dieser Dynamik steht das große, aber bislang wenig greifbare Versprechen neuer Formen der Wertschöpfung und einer höheren Resilienz durch die Verringerung der Abhängigkeiten von Primärrohstoffen und den damit verbundenen geopolitischen Risiken. Gerade in der Energiebranche sind diese Argumente so relevant wie selten zuvor. Die Branche steht vor der Herausforderung, die Transformation des Energiesystems zu stemmen, ohne von der einen Rohstoffabhängigkeit (etwa fossilen Energieträgern) in eine neue Abhängigkeit (beispielsweise von Seltenen Erden für Batterien oder Solarkomponenten) zu geraten. Die Versprechen rund um das Thema Kreislaufwirtschaft wären von großem Vorteil: eine robustere Versorgungssicherheit sowie die Möglichkeit, Kosten durch höhere Wiederverwendung, effizienteres Materialmanagement und geschlossene Wertschöpfungsketten zu senken.

Die öffentliche Debatte verharrt oft auf einer abstrakten, volkswirtschaftlichen Ebene und wird selten in konkrete Maßnahmen vor dem Hintergrund bestehender Geschäftsmodelle übersetzt.

Das Versprechen, dass sich Kreislaufwirtschaft automatisch aus Profit- und Resilienzgründen lohnt, bleibt dabei meist eine Annahme. Die öffentliche Debatte verharrt oft auf einer abstrakten, volkswirtschaftlichen Ebene und wird selten in konkrete Maßnahmen vor dem Hintergrund bestehender Geschäftsmodelle übersetzt. Der Business Case für Kreislaufwirtschaft bleibt daher unscharf, es fehlt vielfach an belastbaren Erprobungen. Stattdessen werden Pioniere im Bereich der Kreislaufwirtschaft vor allem aus nachhaltigkeitsstrategischen, regulatorischen oder reputationsbezogenen Motiven aktiv und tragen dafür auf

zunächst unbestimmte Zeit höhere Kosten und Risiken. Es stellt sich also – nach wie vor – die Frage: Wie sieht ein konkreter Business Case für Kreislaufwirtschaft aus?

Lassen sich bereits kurzfristig wirtschaftliche Vorteile realisieren – etwa durch vermiedene Entsorgungskosten, gesicherte Sekundärrohstoffströme oder optimierte Supply-Chain-Strukturen? Oder entstehen Effizienzgewinne tendenziell erst langfristig durch technologische Entwicklungen, Skaleneffekte und einen passenden regulatorischen Rahmen?

Für die EnBW als eines der größten Energieversorgungsunternehmen Deutschlands stellt sich die Frage nach der Rolle der Kreislaufwirtschaft unter besonderen Voraussetzungen. Das Unternehmen verantwortet ein breites Portfolio an Produkten und Dienstleistungen in den Bereichen Strom, Gas, Wasser, Wärme sowie Energie- und Infrastrukturdienstleistungen. Mit einer installierten erneuerbaren Erzeugungskapazität von 7,4 GW im Geschäftsjahr 2025 – bereits 65,6 Prozent der Gesamtkapazität und weiter steigend – nimmt die EnBW eine zentrale Rolle beim Umbau des deutschen Energiesystems ein. Gleichzeitig unterscheidet sich die Ausgangslage der EnBW von Industriekonzernen, die selbst Anlagen, Komponenten oder Materialien entlang der Wertschöpfungskette produzieren. Die EnBW ist eine Betreiberin von Erzeugungsinfrastruktur, jedoch keine Herstellerin von Solarmodulen, Windturbinen oder Batteriesystemen – und ebenso wenig Recyclerin oder Wiederaufbereiterin. Für die EnBW stellt sich also die Frage, welche Handlungsspielräume ihr im Bereich Kreislaufwirtschaft überhaupt zur Verfügung stehen und welche Potenziale sie innerhalb dieser Spielräume ausschöpfen kann. Über den offensichtlichen Beitrag hinaus, Rohmaterialströme langfristig zu reduzieren und damit indirekt auch den Fußabdruck anderer Akteure zu verkleinern: Welchen eigenständigen Business Case hat das Thema Kreislaufwirtschaft für ein Energieunternehmen?

Dieses White Paper verfolgt das Ziel, einen möglichst realistischen Blick auf die Handlungsspielräume eines Energieunternehmens in der Kreislaufwirtschaft zu werfen – und somit die Grundlage für die Integration von zirkulärem Denken in ein bestehendes Geschäftsmodell zu legen. Da es bislang kaum praxistaugliche Ansätze gibt, mit denen große Unternehmen den „Business

## Welchen eigenständigen Business Case hat das Thema Kreislaufwirtschaft für ein Energieunternehmen?

Case Kreislaufwirtschaft“ in ihr bestehendes Geschäft integrieren können, wurde zunächst ein grundlegendes Vorgehen entwickelt und in einem isolierbaren Geschäftsbereich der EnBW angewandt. Dabei wurde das Vorgehen so gestaltet, dass es später auch auf weitere Bereiche des Konzerns sowie auf Unternehmen in anderen Branchen übertragbar und somit skalierbar ist. Der gewählte Geschäftsbereich für diese Fallstudie ist die Photovoltaik-(PV-)Energieerzeugung bei der EnBW. Im Verlauf des Papers wird für diesen Bereich überprüft, welche Kreislaufmaßnahmen einen wirtschaftlichen Nutzen stiften und welche vor allem kurzfristig realistisch umsetzbar sind.

Die zentralen Erkenntnisse lassen sich bereits an dieser Stelle vorwegnehmen: Die Handlungsspielräume eines einzelnen Akteurs wie der EnBW sind begrenzt. Einige Kreislaufstrategien sind branchenbedingt nicht umsetzbar, andere liegen außerhalb des direkten Einflussbereichs entlang der Wertschöpfungskette. Dennoch gibt es innerhalb des Einflussbereichs bereits heute Maßnahmen, die geringe Investitionen erfordern, unmittelbar umsetzbar sind und dennoch wirtschaftliche und ökologische Vorteile erzielen. Darüber hinaus bieten Kreislaufmaßnahmen in der PV-Branche gerade zukünftig große Potenziale, etwa durch resilientere Rohstoffkreisläufe oder höhere Kosteneffizienz. Die frühzeitige Umsetzung der heute möglichen Maßnahmen schafft die Grundlage, um diese Potenziale von morgen auszuschöpfen.

<sup>1</sup> Z.B.: Voeste, D. (Dezember 2025). Kreislaufwirtschaft kann Europas neues Erfolgsmodell sein. Handelsblatt. (<https://www.handelsblatt.com/meinung/gastbeitraege/gastkommentar-kreislaufwirtschaft-kann-europas-neues-erfolgsmodell-sein/100181574.html>; Abruf: 9.3.2026)  
Deloitte (Januar 2026). Circularity Industry Insights. A cross-industry transformation. (<https://cloud.marketing.deloitte.de/RegistrationPage?eventname=SRT%20SU%20Circularity%20Industry%20Insights%202026&locale=en&mid2=MID-23385&category=Publications&eventCampaignId=701af00000AfVY9AAE>; Abruf: 9.3.2026)  
Handelsblatt (Januar 2026). Circular Economy 2026. Vom Nice-to-have zum wirtschaftlichen Muss. (<https://live.handelsblatt.com/event/circular-economy/circular-economy-2026/>; Abruf: 13.3.2026)

## 2. Überblick

# Kreislaufwirtschaft im Kontext der Energieerzeugung durch Photovoltaik (PV)

### 2.1 Politische Rahmenbedingungen der Kreislaufwirtschaft

Die Kreislaufwirtschaft hat längst nicht mehr nur eine ökologische Bedeutung, sondern ist zu einem zentralen politischen und regulatorischen Handlungsfeld geworden. Weltweit erkennen Gesetzgeber das Potenzial geschlossener Wertschöpfungsketten – sowohl zur Reduktion von Emissionen und Ressourcenverbrauch als auch zur Stärkung der wirtschaftlichen Resilienz. Entsprechend wächst die Zahl der regulatorischen Initiativen, die Transparenz schaffen, Rohstoffkreisläufe schließen und die Abhängigkeit von globalen Risikomärkten reduzieren sollen.

Einer der Treiber in der internationalen Diskussion ist die Europäische Union (EU). So ist die Kreislaufwirtschaft ein Kernbestandteil des Green Deal sowie der neuen industriepolitischen Agenda im Rahmen des Clean Industrial Deal. Kreislaufwirtschaft wird hierbei ausdrücklich als ökologisches und ökonomisches Projekt angelegt: Sie soll Emissionen und Ressourcendruck senken und gleichzeitig Kosten, Importabhängigkeiten und geopolitische Risiken für Unternehmen reduzieren. Entsprechend breit ist die regulatorische Landschaft: Vorgaben wie der kommende Circular Economy Act (CEA) sowie bestehende Regularien rund um die Extended Producer Responsibility (EPR) – inklusive der Waste Framework Directive (WFD), produktspezifischer Richtlinien wie der Waste from Electrical and Electronic Equipment Directive (WEEE) oder der Ecodesign for Sustainable Products Regulation (ESPR) – definieren Anforderungen an Produktdesign,

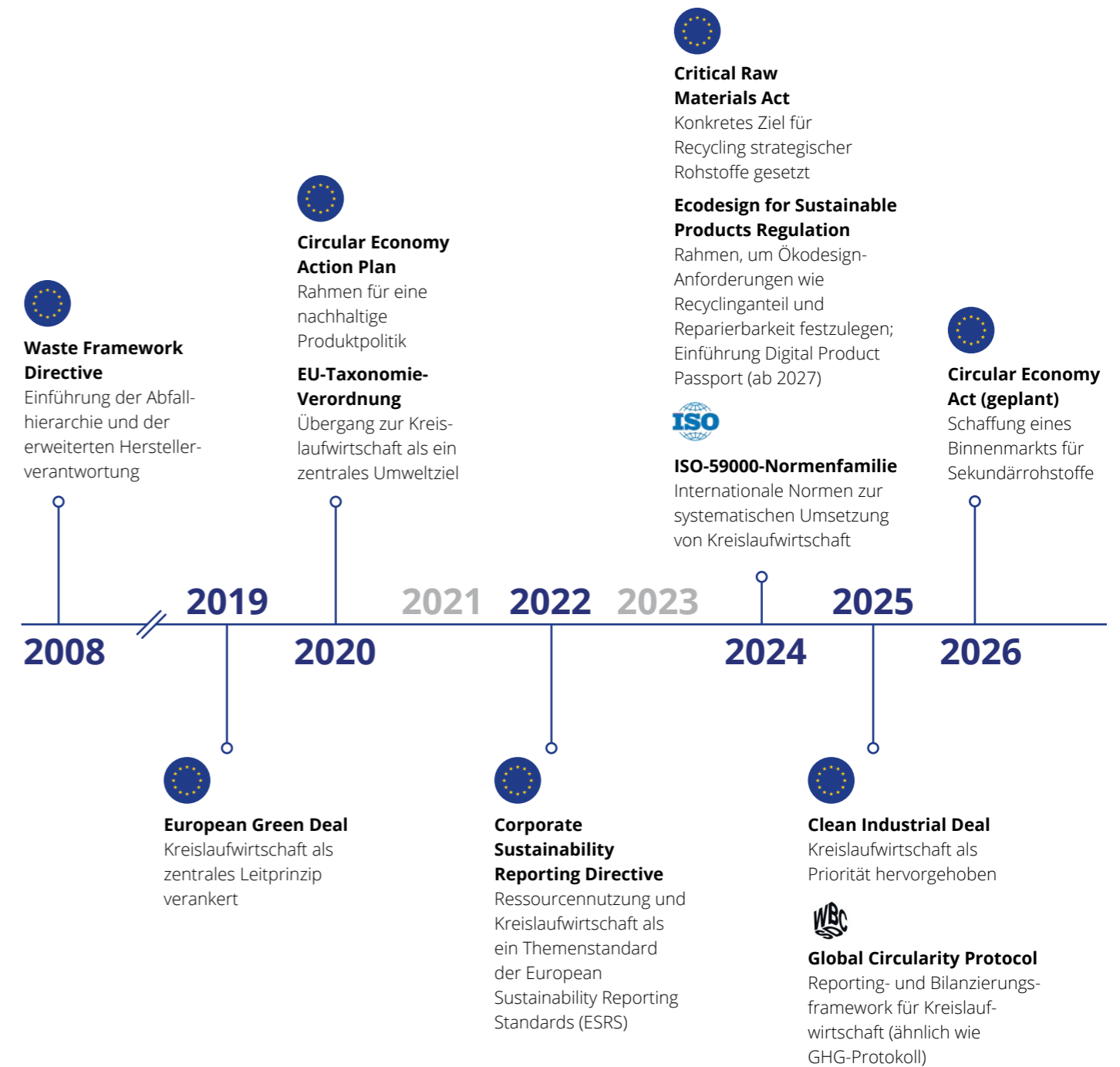
Reparierbarkeit, Wiederverwendung und Rückgewinnung. In diesem Rahmen wird ab 2027 beispielsweise der Digital Product Passport (DPP) schrittweise eingeführt, der transparente Informationen zu Zusammensetzung und Zirkularität insbesondere für Materialien wie Aluminium und Stahl verfügbar machen soll. Darüber hinaus werden durch den Critical Raw Materials Act (CRMA) konkrete Recyclingziele für strategische Rohstoffe gesetzt, um Europas Abhängigkeit von einzelnen Lieferländern zu reduzieren. Transparenzvorgaben wie EU-Taxonomie und die Corporate Sustainability Reporting Directive (CSRD) flankieren diese Entwicklungen, indem sie erstmals systematisch offenzulegen verlangen, wie Unternehmen mit Materialströmen, Risiken und Umweltwirkungen umgehen. Darüber hinaus wurden kürzlich auch Initiativen zu standardisierten freiwilligen Reportingformaten zur Kreislaufwirtschaft in Unternehmen ins Leben gerufen: So wurden 2025 ein Erstaufschlag des Global Circularity Protocol (GCP) durch das WBCSD veröffentlicht (Urheber des bereits etablierten Greenhouse Gas Protocol) und 2024 mit der ISO-59000-Normenreihe ein erster ISO-Standard zur Kreislaufwirtschaft entworfen.

Auch außerhalb Europas ist die politische Bedeutung der Kreislaufwirtschaft stark gewachsen. In China gilt Kreislaufwirtschaft seit dem 14. Fünfjahresplan (2021–2025) als nationale Priorität für Ressourcensicherheit, Emissionsminderung und Innovationsförderung. Der Plan formuliert messbare Ziele – von einer deutlichen Steigerung der Ressourceneffizienz

über sinkenden spezifischen Energie- und Wasserverbrauch bis hin zu hohen Verwertungsquoten für Stahl, Nichteisenmetalle oder Bauabfälle. Anfang 2026 wurde diese Agenda durch einen umfassenden Aktionsplan für grünen Konsum ergänzt, der Maßnahmen in sieben Bereichen definiert – von grünen Agrarprodukten über Elektromobilität bis zu Leasing- und Sharing-Modellen.

Für Europa ergibt sich daraus eine weitere strategische Dimension: Akteure in der EU sollten daher schnell handeln, um den versprochenen Nutzen von Kreislaufmaßnahmen heben zu können, statt weiter in eine geopolitische Abhängigkeit von Kapazitäten in China oder anderen Ländern zu geraten. Denn neue europäische Vorgaben erzeugen Wettbewerb, der sich nicht zwingend auf europäische Akteure beschränkt. Einige Anforderungen könnten kurzfristig nur durch Importe aus zum Beispiel China erfüllt werden, solange europäische Kapazitäten erst aufgebaut werden. Dadurch könnten regulatorisch intendierte Ziele wie Resilienz und Unabhängigkeit zunächst sogar schwerer erreichbar werden. Dies bedeutet nicht, dass entsprechende politische Weichenstellungen infrage gestellt werden sollten – im Gegenteil. Die Regularien bilden eine notwendige Grundlage für eine kreislaforientierte Wirtschaft. Aber auch darüber hinaus besteht Handlungsbedarf, um die politisch wie wirtschaftlich gewünschten Effekte tatsächlich zu realisieren.

Abb. 1 – Zeitliche Entwicklung der Regulatorik und Standards zum Thema Kreislaufwirtschaft in der EU



## 2.2 Der Begriff Kreislaufwirtschaft

„Kreislaufwirtschaft“ bezeichnet grundsätzlich ein Wirtschaftsmodell, bei dem der Wert von Produkten, Materialien und anderen Ressourcen in der Wirtschaft so lange wie möglich auf möglichst hohem Niveau erhalten bleibt. Statt einem linearen System – produzieren, nutzen, entsorgen – soll ein System geschaffen werden, das die Haltbarkeit, die optimale Nutzung oder die Wiederverwendung, die (Wieder-)Aufbereitung und zuletzt das Recycling ermöglicht. Dadurch sollen die Auswirkungen der Ressourcennutzung auf die Umwelt reduziert und das Abfallaufkommen sowie die Freisetzung gefährlicher Stoffe in allen Phasen des Lebenszyklus minimiert werden. Außerdem soll die Wertschöpfung möglichst stark von der Ressourcennutzung entkoppelt werden.

Kreislaufwirtschaft ist damit weit mehr als bloßes Recycling. Sie umfasst ein Zusammenspiel unterschiedlicher Aspekte: Produktdesign, Geschäftsmodelle, Nutzungskonzepte, Reparatur- und Wiederaufbereitungskapazitäten, Materialtechnologien und Rückgewinnungsprozesse. Richtig angewandt bietet die Kreislaufwirtschaft nicht nur ökologische Vorteile, sondern erschließt auch erhebliche wirtschaftliche Potenziale, etwa durch geringeren Primärmaterialverbrauch, höhere Anlagenverfügbarkeit, effizientere Materialströme und reduzierte Abhängigkeiten von volatilen Rohstoffmärkten.

Um diese breit gefasste Idee greifbar zu machen, hat sich international eine Reihe konzeptioneller Rahmenwerke etabliert. Eines der präzisesten ist das 9R-Modell<sup>2</sup>, das von einer Expertengruppe der Europäischen Kommission vorgestellt wurde. Dieses ordnet kreislaufwirtschaftliche Maßnahmen entlang des Lebenszyklus eines

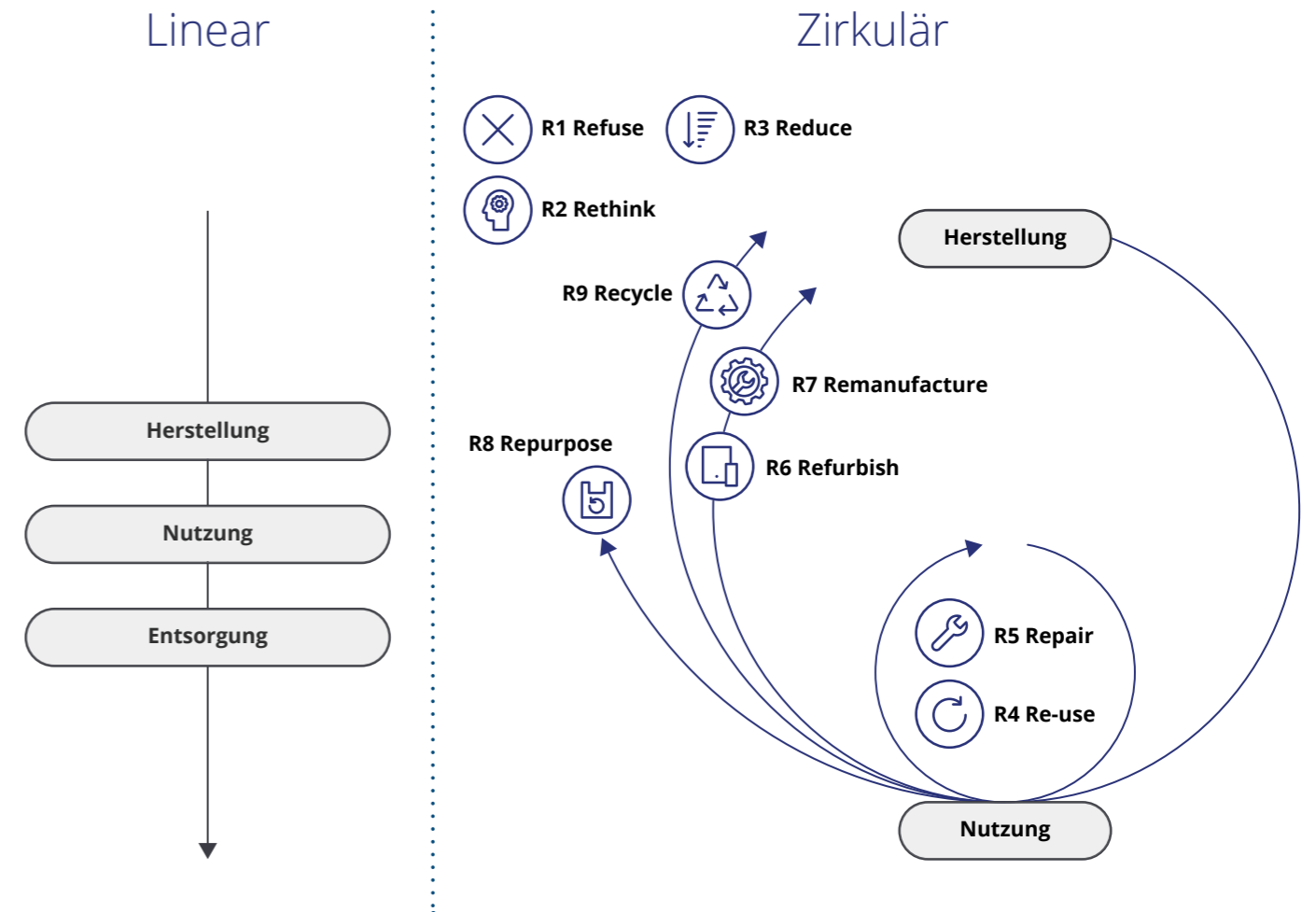
Produkts und wertet Materialien nicht primär als Abfall, sondern als Ressourcen mit zwei Wertdimensionen: einem reinen Materialwert und einem funktionalen Wert, den das Material erst durch die Herstellung des Produktes erhält. Der möglichst langfristige Erhalt der Produktfunktion ist das leitende Prinzip des 9R-Modells.

Diese Zielsetzung wird durch neun Strategien verfolgt, die sich in drei Kategorien einteilen lassen: R1 bis R3 stellen Strategien in Bezug auf ein grundlegendes Umdenken in der Nutzung, Vermarktung sowie Herstellung und im Design von Produkten dar. R4 bis R8 beinhalten vor allem technische Maßnahmen, um die Produktfunktion zu erhalten und die Nutzungsdauer zu verlängern. In R9 „Recycling“ wird die Ressource nur noch auf ihr Material reduziert und

die Produktfunktion nicht mehr länger erhalten; diese Strategie wird deshalb am wenigsten präferiert, ist aber auf große Mengen und vielfältige Arten an Ressourcen anwendbar und der Materialentsorgung immer noch überlegen. Durch diese nuancierte Differenzierung der Strategien ist das Modell granularer als die klassische Abfallhierarchie (Prävention, Vorbereitung zur Wiederverwendung, Recycling, sonstige Verwertung, Entsorgung). Während die Abfallhierarchie als normatives Modell die Rangfolge der Abfallbewirtschaftung festlegt (Vermeidung und Verwertung vor Beseitigung), beantwortet das 9R-Modell präziser und ebenfalls hierarchisch, durch welche neun Handlungsstrategien die Abfallhierarchie umgesetzt werden kann.

Richtig angewandt bietet die Kreislaufwirtschaft nicht nur ökologische Vorteile, sondern erschließt auch erhebliche wirtschaftliche Potenziale, etwa durch geringeren Primärmaterialverbrauch, höhere Anlagenverfügbarkeit, effizientere Materialströme und reduzierte Abhängigkeiten von volatilen Rohstoffmärkten.










Abb. 2 – Lineares Modell und zirkuläres Modell anhand der 9R-Strategien<sup>2</sup>



<sup>2</sup> European Commission: Directorate-General for Research and Innovation (2020). Categorisation system for the circular economy: a sector-agnostic categorisation system for activities substantially contributing to the circular economy. Publications Office. (<https://data.europa.eu/doi/10.2777/172128>; Abruf: 13.3.2026)



Tab. 1 – Die 9R-Strategien (eigene Darstellung basierend auf: Europäische Kommission, 2020)

	Kreislaufstrategie	Beschreibung
Alternativen in Nutzung und Herstellung	 R1 <b>Refuse</b>	<b>Verzicht</b> oder <b>radikal andere</b> Produkte/Services mit derselben Funktion, z.B. digital
	 R2 <b>Rethink</b>	<b>Intensivere Produktnutzung</b> z.B. durch Product-as-a-Service- oder Sharing-Modelle
	 R3 <b>Reduce</b>	<b>Effizienz</b> erhöhen, <b>Ressourceneinsatz reduzieren</b>
Lebensspanne während der Nutzung erhöhen	 R4 <b>Re-use</b>	<b>Wiederverwendung</b> von Produkten, die ihre Funktion noch erfüllen
	 R5 <b>Repair</b>	<b>Reparatur und Wartung</b> , um Produkte wiederzuverwenden
	 R6 <b>Refurbish</b>	<b>Altgeräte up-to-date</b> bringen
	 R7 <b>Remanufacture</b>	<b>Teile</b> von Ausschussprodukten <b>in neuen Produkten mit selber Funktion</b> verwenden
Verwendung von Materialien	 R8 <b>Repurpose</b>	Redundantes <b>Produkt/Teil in neuen Produkten mit anderer Funktion</b> verwenden
	 R9 <b>Recycle</b>	<b>Rohmaterialien</b> aus Abfall gewinnen und <b>zur neuen Verwendung wiederaufbereiten</b>

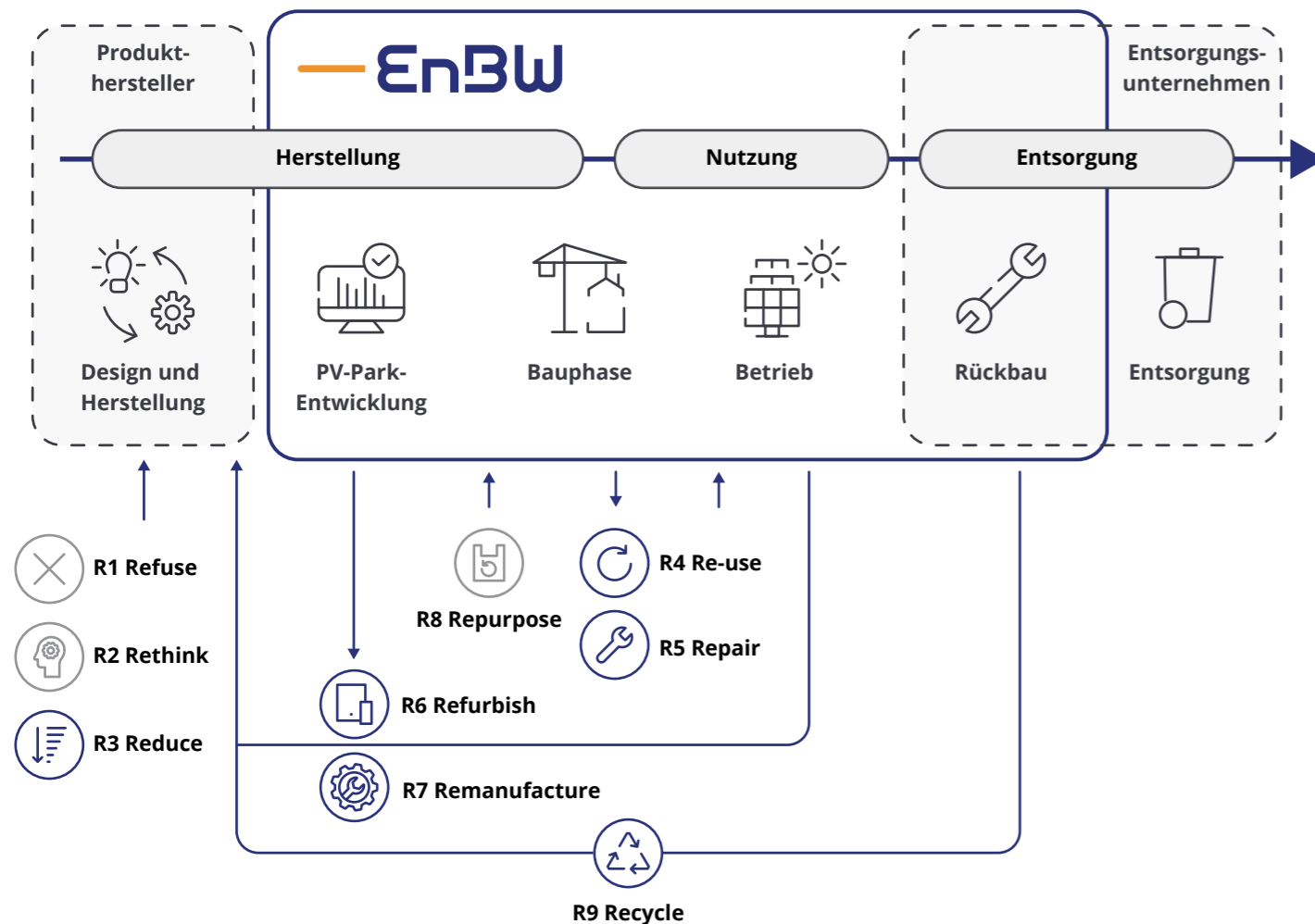
Im Einflussbereich der EnBW liegen insbesondere diejenigen Kreislaufstrategien, die sich auf die Nutzung der Komponenten während des Betriebs der PV-Parks beziehen.

### 2.3 Die 9R-Strategien in der PV-Wertschöpfungskette

Das 9R-Modell bietet ein umfassendes Bild von sektorunabhängigen Kreislaufstrategien. Je nach Branche oder Geschäftsaktivität sind allerdings nicht alle Strategien gleichermaßen anwendbar oder relevant. Entlang der PV-Wertschöpfungskette lassen sich grundsätzlich viele 9R-Strategien identifizieren, wenn auch mit unterschiedlicher Relevanz und Umsetzbarkeit. Abbildung 3 zeigt einen Überblick – mit den relevantesten Strategien in Blau und den

weniger relevanten Strategien in Grau. Relevanz haben insbesondere R-Strategien, in denen technische Maßnahmen zum Funktionserhalt leitend sind – also Wiederverwendung (R4) und Reparatur (R5), die Wiederherstellungsstrategien R7 und R8 sowie die Materialverwertung durch Recycling (R9) und die daraus resultierende Reduktion (R3) des Ressourceneinsatzes. Refuse (R1), Rethink (R2) und Repurposing (R8) sind in der PV-Wertschöpfungskette hingegen weniger relevant.

Abb. 3 – 9R-Strategien entlang der EnBW-PV-Wertschöpfungskette (eigene Darstellung)



### 2.3.1 Relevante R-Strategien in der PV-Energieerzeugung



**Reduce (R3)** spielt eine zentrale Rolle. PV-Anlagen sind prinzipiell bereits auf minimalen Ressourceneinsatz ausgelegt; so wird beispielsweise die Unterkonstruktion präzise dimensioniert, um Stabilität bei geringstmöglichem Materialeinsatz zu gewährleisten. Außerdem werden viele Materialien verwendet, bei denen der Einsatz recycelter Rohstoffe möglich ist, zum Beispiel bei Stahl, Aluminium und Kupfer. Primärrohstoffe durch recycelte Materialien zu ersetzen, kann sowohl ökologische als auch ökonomische Vorteile bieten. Höhere Recyclinganteile reduzieren den Bedarf an energieintensiver Rohstoffförderung und verringern dadurch Umweltwirkungen wie Treibhausgasemissionen. Gleichzeitig kann der niedrigere Energieeinsatz bei der Herstellung von Sekundärrohstoffen auch zu Kostenvorteilen führen. Des Weiteren ermöglicht auch der technologische Fortschritt einen geringeren Ressourceneinsatz: Leistungsfähigere Module ermöglichen höhere Erträge pro installiertem Modul, was den Flächen- und Materialbedarf pro erzeugter Kilowattstunde reduziert und somit Investitionskosten und Materialeinsatz senken kann.



**Re-use (R4)** ist grundlegend anwendbar und relevant, aktuell jedoch bei der PV-Energieerzeugung im großen Umfang, wie die EnBW sie betreibt, nur von eingeschränkter Bedeutung. PV-Parks bestehen aus vielen Einzelkomponenten wie etwa PV-Modulen, Wechselrichtern, Verkabelungen und Unterkonstruktionen. Der Aus- und Wiedereinbau einzelner noch funktionstüchtiger Komponenten ist also grundsätzlich möglich. Jedoch entsprechen Altmodule häufig nicht mehr dem aktuellen technischen Standard, passen nicht in neue Anlagenlayouts oder sind in den Mengen, die benötigt werden, nicht mehr erhältlich. Im kleinen Stil ist Re-use jedoch anwendbar, zum Beispiel beim Neubau kleinerer PV-Anlagen. Hier bieten spezialisierte Anbieter wie z.B. SecondSol eine Plattform für den (Ver-)Kauf gebrauchter Komponenten. Darüber hinaus lassen sich gebrauchte Module oder Wechselrichter als Ersatzteile auch bei großen PV-Parks bereits einsetzen. Jede Wiederverwendung verlängert dabei die Nutzungsdauer der ursprünglichen Investition und reduziert den Bedarf an Neuanschaffungen. Dies kann insbesondere bei schwer verfügbaren Komponenten oder langen Lieferzeiten zu betriebswirtschaftlichen Vorteilen führen.



**Repair (R5)** ist im PV-Betrieb relevant, insbesondere da sich der modulare Aufbau von PV-Parks zur Reparatur von Einzelbestandteilen anbietet. Durch die Reparatur beschädigter Wechselrichter, Leistungselektronik oder Transformatoren kann die Lebensdauer der Komponenten erhöht werden. Reparaturen vermeiden dadurch die Anschaffung von Ersatzkomponenten, reduzieren Abfall und minimieren Ausfallzeiten. Zugleich kann diese Strategie die Abhängigkeit von Herstellern und globalen Lieferketten verringern – was angesichts geopolitischer und logistischer Risiken unmittelbare Resilienzgewinne und Kostenersparnisse ermöglicht. Voraussetzungen hierfür sind jedoch die Verfügbarkeit von entsprechendem Know-how, Personal und Ersatzteilen sowie ein gut reparierbares Design der Komponenten.

Ein Großteil der 9R-Strategien ist grundsätzlich auf die PV-Wertschöpfungskette anwendbar. Je nach Position eines Unternehmens innerhalb dieser Wertschöpfungskette variiert jedoch die praktische Relevanz der Strategien.



**Refurbish (R6) und Remanufacture (R7)** gewinnen mit steigenden Rückbaumengen an Bedeutung. Refurbishmentprozesse, bei denen gebrauchte Module oder Wechselrichter wiederaufbereitet werden, existieren bereits heute – meist jedoch in kleinem Umfang und bei spezialisierten Anbietern. Remanufacturing geht noch einen Schritt weiter, indem Teile aus Altgeräten wieder zu neuwertigen Produkten zusammengeführt werden. Beide Ansätze bieten das Potenzial für neue Sekundärmärkte, die aber bislang in der Breite noch nicht existieren. Ökonomische Vorteile entstehen z.B. durch den Verkauf von Komponenten an Dienstleister, die diese Komponenten wiederaufbereiten und auf Sekundärmärkten veräußern. Zu den Erlösen aus solchen Verkäufen kommen gesparte Entsorgungskosten hinzu. Außerdem können generalüberholte Komponenten als günstige Ersatzteile im eigenen Betrieb genutzt werden, sodass der Kauf von Neugeräten gespart wird.



**Recycling (R9)** ist von übergreifender Bedeutung im PV-Sektor. Metalle wie Stahl, Aluminium und Kupfer werden heute routinemäßig und mit hohen Quoten recycelt. Auch PV-Module erreichen Rückgewinnungsraten von über 80 Prozent ihres Gewichts. Das Recycling erfolgt derzeit vorwiegend mengen- statt wertstofforientiert; es konzentriert sich auf Glas und Metalle, während die Rückgewinnung kritischer Materialien wie Silber, Silizium und bestimmter Kunststoffe vergleichsweise selten erfolgt. Fortschritte in hochwertigen Recyclingtechnologien (z.B. in hydrometallurgischen Verfahren oder laserbasierten Trenntechniken) sind daher entscheidend, um das Potenzial von Rezyklaten wirtschaftlich besser auszuschöpfen. Ein direkter ökonomischer Effekt des Recyclings kann in der Veräußerung von Materialien wie Stahl, Aluminium, Kupfer, insbesondere aber auch Silber und Silizium liegen. Gerade Letztere machen einen signifikanten Anteil des Wertes eines PV-Moduls aus. Langfristig kann Recycling zur Versorgungssicherheit beitragen, weil durch regional verfügbare Sekundärrohstoffe die Abhängigkeit von globalen, politisch und logistisch kritischen Lieferketten reduziert wird.<sup>3</sup>



Jeder PV-Park wird individuell basierend auf verschiedenen Einflussfaktoren geplant – so wird beispielsweise der Aufstellwinkel der Module so bestimmt, dass der maximale Energieertrag erreicht wird.

### 2.3.2 Weniger relevante R-Strategien in der PV-Energieerzeugung



**Refuse (R1) und Rethink (R2)** spielen in der PV-Energieerzeugung kaum eine Rolle. Weder ein Verzicht auf Technologieeinsatz noch radikal neue Nutzungskonzepte sind angesichts wachsender Strombedarfe sinnvoll. PV ist ein zentraler Baustein der Energiewende und liegt damit außerhalb von Verzichtsüberlegungen; auch entsprechende Technologiesprünge sind derzeit nicht unmittelbar ersichtlich. Auch **Repurpose (R8)** bleibt ein Nischenthema. Die Hauptkomponenten der Energieerzeugung durch PV sind hochspezialisiert und nur selten für andere Anwendungen geeignet. Einzelbeispiele sind etwa die Nutzung von Bauschutt als Schotter für den Wegebau eines PV-Parks oder die Nutzung des Glases von PV-Modulen für nicht-technische Zwecke.

Die Ausführungen zeigen, dass ein Großteil der 9R-Strategien grundsätzlich auf die PV-Wertschöpfungskette anwendbar ist. Je nach Position eines Unternehmens innerhalb dieser Wertschöpfungskette variiert jedoch die praktische Relevanz der Strategien. Im Folgenden wird am Beispiel der EnBW aufgezeigt, welche der 9R-Strategien innerhalb des Handlungsspielraums eines Energieunternehmens liegen – und welche gleichzeitig auch wirtschaftlich attraktiv umzusetzen sind.

<sup>3</sup> BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (3.1.2024). Resilienz der Lieferketten für Rohstoffe, Energiewendetechnologien und -komponenten in der Energiewirtschaft. ([https://www.bdew.de/media/documents/BDEW\\_Diskussionpapier\\_Resilienz\\_der\\_Lieferketten.pdf](https://www.bdew.de/media/documents/BDEW_Diskussionpapier_Resilienz_der_Lieferketten.pdf); Abruf: 13.3.2026)

## 3. Status quo

### Kreislaufwirtschaft bei EnBW



PV-Parks erfüllen bereits heute einen alternativen Nutzen neben der eigentlichen Energieversorgung: Schafbeweidung im Solarpark.

#### 3.1 Welche Rolle spielt Kreislaufwirtschaft bereits bei EnBW?

Die EnBW kennt die Bedeutung des Ressourcen- und Abfallmanagements, um die relative Zunahme der Nutzung sekundärer (recycelter) Ressourcen und die Abkehr von der Nutzung von Primärrohstoffen zu erzielen.

Das Abfallmanagement der EnBW orientiert sich an der Abfallhierarchie gemäß § 6 Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG). Das wesentliche Konzept bildet die [EnBW-Abfallmanagement-Policy](#), die Grundsätze und Leitlinien im Umgang mit der Ressource Abfall definiert. Darüber hinaus regelt die [EnBW-Umwelt- und Klimaschutz-Policy](#) die Einführung von zertifizierten Umweltmanagementsystemen, die die Ressourcenschonung und Abfallvermeidung bei umweltrelevanten Geschäftstätigkeiten unterstützen. Auch in der Nachhaltigkeitsberichterstattung der EnBW ist ESRS E5 „Ressourcennutzung und Kreislaufwirtschaft“ ein wesentliches Thema.

Die EnBW geht über die gesetzlichen Anforderungen des KrWG hinaus, was durch die Verankerung des Themas Kreislaufwirtschaft in der [EnBW-Nachhaltigkeitsagenda](#) unterstrichen wird. Ziel ist es, Materialien möglichst sparsam und – sofern verfügbar – in recycelter und/oder recycelbarer Form einzusetzen und so lange wie möglich im Kreislauf zu halten. So wird angestrebt, die Kreislaufwirtschaft als festen Bestandteil in Projektplanung, -entwicklung und -umsetzung zu etablieren. Maßnahmen zur Förderung der Ressourcenschonung und Kreislaufwirtschaft sind unter anderem – im konventionellen Bereich der Erzeugung – die Wiederverwendung von [Kraftwerksnebenprodukten](#) wie Flugasche, Schlacke und Gips in der Bauindustrie; außerdem der Bau und Betrieb von stationären [Second-Life-Batteriespeichern](#) aus ausrangierten Batterien von Elektrofahrzeugen an ausgewählten Standorten.

In verschiedenen Initiativen wurde in den letzten Jahren das Thema Kreislaufwirtschaft bei der EnBW betriebsintern voran gebracht. Im Jahr 2023 wurde eine

Ein Ziel der EnBW-Nachhaltigkeitsagenda ist es, Materialien möglichst sparsam und – sofern verfügbar – in recycelter und/oder recycelbarer Form einzusetzen und so lange wie möglich im Kreislauf zu halten.

Status-quo-Analyse – das „Circular Business Assessment“ – mit der Unternehmensberatung Taival durchgeführt, um sämtliche konzernweiten Maßnahmen im Sinne der Ressourceneffizienz und Stärkung der Kreislaufwirtschaft zu erfassen und zu analysieren. 2024 folgte eine Markt- und Machbarkeitsstudie mit dem finnischen Forschungsinstitut VTT, um unternehmensweit Potenziale der Kreislaufwirtschaft zu identifizieren. Ergebnisse der Studie waren unter anderem die Ermittlung weiterer Möglichkeiten im Bereich der Batteriespeicher und des PV-Bereichs sowie übergeordnete konzernweite Kreislaufwirtschaftspraktiken zu formalisieren und weiterzuentwickeln.

Diese Vorstudien haben wesentliche Trends, KPIs, Marktpotenziale und Wirkmechanismen der Kreislaufwirtschaft innerhalb der EnBW aufgezeigt und bilden die Grundlage für das vorliegende Projekt. Dieses Projekt soll den Fokus vom kon-

zeptionellen Verständnis hin zu konkreten operativen Maßnahmen verschieben. Da es bislang kaum vergleichbare Untersuchungen gibt und somit keine erprobten Blaupausen existieren, wurde ein klar abgegrenzter Pilotbereich für die Durchführung des Projekts ausgewählt. Ziel war es, im Rahmen dieses Pilotbereichs ein standardisiertes Vorgehen zu entwickeln, das sich später auf weitere Geschäftsbereiche übertragen lässt. Die Wahl fiel auf den PV-Erzeugungsbereich, da dieser aus verschiedenen Gründen besonderes Potenzial für Zirkularität verspricht und fordert: PV ist Teil des Erneuerbaren-Energien-Portfolios des Unternehmens; außerdem existiert bereits ein gutes Verständnis der Wertschöpfungskette; und der modulare Aufbau der PV-Anlagen würde potenzielle Eingriffe erleichtern. Hinzu kommen spezifische regulatorische Anforderungen (siehe Kapitel 2.1), die besonders in der PV-Erzeugung relevant sind.

Dieses Projekt soll den Fokus vom konzeptionellen Verständnis hin zu konkreten operativen Maßnahmen verschieben.

### 3.2 Rahmenbedingungen der PV bei EnBW

Die EnBW baut und betreibt deutschlandweit Freiflächen-PV-Parks. Der Lebenszyklus eines PV-Parks vom Bau über den Betrieb bis zum Lebensende umfasst mehrere Stufen, die bei der EnBW von verschiedenen Bereichen verantwortet werden. Am Anfang übernimmt der Bereich Projektentwicklung die technische Planung der Parks. Hier werden zentrale Entscheidungen zur Produkt- und Systemtechnik getroffen, die sowohl den Energieertrag als auch die Wirtschaftlichkeit über den gesamten Lebenszyklus der Anlage bestimmen. Der Einkauf beschafft danach die präqualifizierte Technik. Dabei wird ein Teil der Komponenten selbst beschafft, während andere Leistungen an Generalunternehmer vergeben werden. Der Einkaufsprozess ist in ein Risikomanagement eingebettet, das Zulieferer im Hinblick auf potenzielle Risiken prüft. Darauf folgt die Realisierung des Bauprojekts durch die Projektumsetzung. Diese stellt innerhalb der anvisierten Zeit und des geplanten Investitionsbudgets den PV-Park fertig. Nach dem Probetrieb des Parks übergibt der Bereich der Projektumsetzung weiter an den Bereich Betrieb. Dieser ist während der gesamten Lebensdauer des Parks für eine möglichst störungsfreie Energieerzeugung verantwortlich und überwacht beispielsweise Wartungen oder Reparaturen. Am Ende der Lebensdauer übernimmt der Bereich Projektumsetzung das Repowering, sofern es die Rahmenbedingungen ermöglichen, bzw. den Rückbau des Parks.

### 3.3 Physische Bestandteile eines PV-Parks

Ein PV-Park besteht aus verschiedenen technischen Komponenten und baulichen Strukturen, die bestimmen, an welchen Stellen Kreislaufmaßnahmen ansetzen können (s. Tab. 2). Das Herzstück der Stromerzeugung sind die PV-Module, die überwiegend aus Glas, Kunststoffen, Aluminiumrahmen und Silizium bestehen. In kleineren Mengen enthalten sie weitere Materialien wie Antimon, Bismut, Gallium oder Kupfer. Sie wandeln Sonnenlicht in Gleichstrom um, der über Wechselrichter in netzfähigen Wechselstrom transformiert wird. Wechselrichter enthalten zu diesem Zweck elektronische Bauteile wie Leiterplatten, Halbleiter oder Kondensatoren und werden je nach Anlagendesign zentral oder dezentral eingesetzt.

Für die Einspeisung ins Mittel- oder Hochspannungsnetz werden Transformatoren benötigt, die aus Kupfer, Stahl und verschiedenen Kunststoffen bestehen. Ein PV-Park verfügt zudem über Monitoring- und Steuerungssysteme mit Sensorik, Kommunikationshardware und Software, die den Betrieb überwachen. Ergänzt wird die Anlage durch umfangreiche Verkabelung, überwiegend aus Kupfer, während Aluminiumkabel – insbesondere als Bodenkabel – zunehmend an Bedeutung gewinnen. Mechanische Halter bestehen häufig aus Stahl oder Aluminium und werden durch Kunststoffisolationen ergänzt.

Die Module sind auf einer Unterkonstruktion montiert, die meist aus Stahl besteht und statisch auf Standortbedingungen wie Windlasten und Bodenqualität ausgelegt ist. Aluminium wird seltener eingesetzt, findet aber in manchen Designvarianten Verwendung. Ergänzende bauliche Elemente umfassen Schotterwege sowie verdichtete Schotterfundamente für Transformatorenstationen; Unterkonstruktionssysteme werden standardmäßig in den Boden gerammt. Schließlich werden PV-Parks in der Regel durch Umzäunungen, meist aus Stahl, gesichert.

Tab. 2 – Übersicht der wesentlichen Bestandteile eines PV-Parks

Komponente	Funktion	Hauptmaterialien
<b>PV-Module</b>	Wandeln Sonnenlicht in Gleichstrom um	Glas, Silizium, Aluminiumrahmen, Kupfer, Silber (Spuren), Antimon, Gallium, Bismut, Kunststoffe (EVA-Folien, Rückseitenfolien), Dioden
<b>Wechselrichter</b>	Wandeln Gleichstrom in netzkonformen Wechselstrom um	Halbleiter, Leiterplatten, Kupfer, Aluminium, Stahlblechgehäuse, Kondensatoren, Kunststoffe
<b>Transformatoren</b>	Transformieren Spannung auf Mittel-/Hochspannungsebene	Kupferwicklungen, Stahlblech, Elektroblech, Kunststoffe, mineralische oder synthetische Isolierstoffe
<b>Monitoring- und Steuerungssysteme</b>	Überwachung von Leistung, Zustand und Sicherheit	Sensoren, Leiterplatten, Halbleiter, Kupfer, Kunststoffe, Kommunikationsmodule
<b>Verkabelung</b>	Elektrische Verbindung innerhalb des Parks	Kupfer oder Aluminiumleiter, Kunststoffisolationen (PVC, XLPE), Stahl-/Aluminiumhalterungen
<b>Unterkonstruktion</b>	Mechanische Tragstruktur für Module	Stahl (verzinkt), seltener Aluminium; Schrauben/Verbindungen aus Edelstahl; Befestigungsklemmen aus Aluminium
<b>Fundamente</b>	Stationsbett und Stellfläche für Trafostationen	Schotter (verdichtet gemäß Spezifikationsvorgaben)
<b>Wege und Infrastruktur</b>	Zugang für Wartung und Betrieb	U.a. Schotter, Erde, Randsteine

## 4. Pilotprojekt

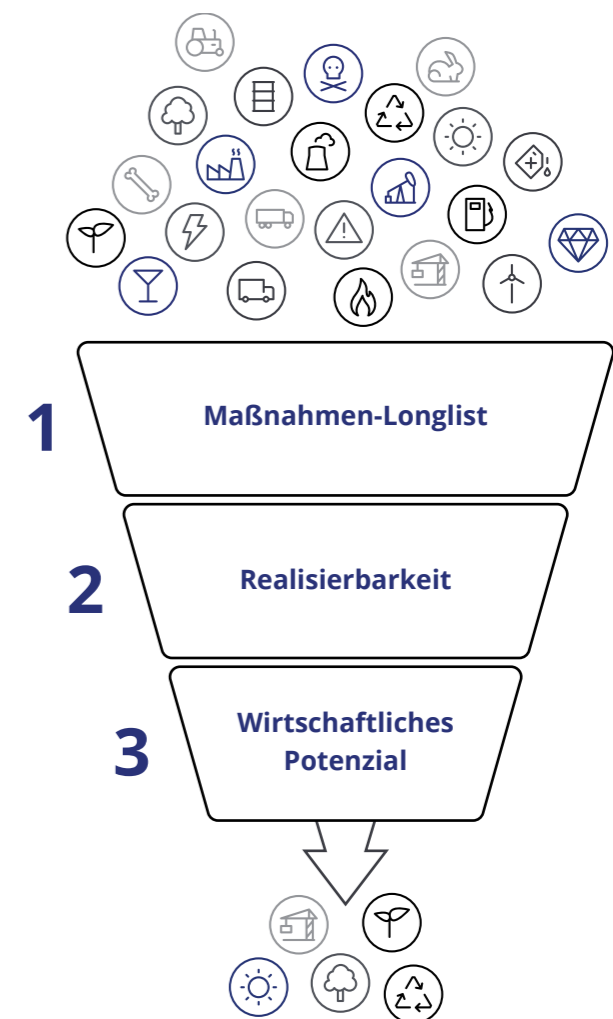
### Realisierbare und wirtschaftlich attraktive Maßnahmen identifizieren

#### 4.1 Projektdesign

Der gewählte Projektansatz verfolgte das Ziel, realistisch umsetzbare und wirtschaftlich attraktive Kreislaufmaßnahmen für die PV-Energieerzeugung der EnBW zu identifizieren. Im Zentrum standen daher „operative“ Maßnahmen entlang der Wertschöpfungskette, das heißt diejenigen Maßnahmen, die eine unmittelbare praktische Wirkung haben.<sup>4</sup> Grundlage hierfür bildete in einem ersten Schritt die Erstellung einer Longlist potenzieller Maßnahmen. Diese wurde aus drei Quellen gespeist: EnBW-Studien und Vorarbeiten, die mit externen Partnern erstellt wurden; den 9R-Strategien in den Teilen der Wertschöpfungskette, die im Handlungsspielraum der EnBW liegen; und internen Expert:innen-Interviews mit relevanten Fachbereichen.

In einem zweiten Schritt wurde die grundsätzliche Realisierbarkeit der Maßnahmen bewertet – vor einem kurzfristigen Zeithorizont und unter Berücksichtigung von Marktverfügbarkeit und organisatorischen Voraussetzungen bei der EnBW. Die Bewertung erfolgte mittels qualitativer Methoden. Dazu gehörten Einzelinterviews mit Expert:innen aus allen relevanten Bereichen – Projektentwicklung, Einkauf, Projektumsetzung, Betrieb, Umwelt und Controlling. Zusätzlich wurde der aktuelle Stand regelmäßig in der gesamten interdisziplinären Runde gespiegelt, um das kombinierte Know-how aller Fachbereiche zu nutzen und die Bewertung der Maßnahmen umfassend zu prüfen.

Abb. 4 – Gewählter Ansatz zur Identifikation realistisch umsetzbarer und wirtschaftlich attraktiver Kreislaufmaßnahmen



<sup>4</sup> In Abgrenzung dazu wurden keine „Enabler“-Maßnahmen in die Analyse aufgenommen, wie zum Beispiel die Einführung neuer Richtlinien. Ziel war es, Maßnahmen zu identifizieren und bewerten, die selbst einen ökologischen und ökonomischen Mehrwert haben können; also zum Beispiel die Erhöhung des Recyclinganteils im Input, statt des Verfassens einer Richtlinie, die eine solche Erhöhung vorschreibt.

Abb. 5 – Kriterien zur Bewertung der Realisierbarkeit

### Realisierbarkeit

Zur Bewertung der Realisierbarkeit wurden folgende Kriterien festgelegt. Dabei handelt es sich um eine branchen- und unternehmensspezifische Auswahl; bei anderen Unternehmen und in anderen Branchen können andere Kriterien geeignet sein.



**Verfügbarkeit von Marktangeboten**  
Viele Kreislaufmaßnahmen hängen grundsätzlich von passenden Marktangeboten ab. Ökodesignaspekte wie Modularität, Reparierbarkeit oder Recyclinganteil beispielsweise können von nicht-produzierenden Unternehmen nur beachtet werden, wenn sie in der vorgelagerten Wertschöpfungskette angeboten werden.

**Technische und prozessuale Limitationen**  
Manche Maßnahmen scheitern in der Praxis an fehlender Kompatibilität von Komponenten oder auch an einer mangelnden Passung zu den prozessualen Rahmenbedingungen – zum Beispiel sind Maßnahmen zur Verlängerung der Lebensdauer nicht umsetzbar, wenn eine Nutzung der Komponenten über die ursprünglich geplante Lebensdauer hinaus nicht möglich ist.

**Organisatorisches und Datenverfügbarkeit**  
Die Umsetzung einiger Maßnahmen erfordert gewisse Informationen – so lässt sich z.B. der Materialeinsatz nur nach Kreislaufprinzipien steuern, wenn Daten über Ökodesignaspekte verfügbar sind. Auch bei Abstimmungen zwischen verschiedenen PV-Parks können organisatorische Hürden auftreten.

**Wesentlichkeit des Potenzials**  
Manche Maßnahmen sind im Grunde realisierbar, zahlen sich aber wegen ihres/r geringen Potenzials und Skalierbarkeit kaum aus. Die Verwendung wiederaufbereiteter Komponenten als Ersatzteile ist zum Beispiel nur in Ausnahmefällen möglich und würde deswegen strukturell keinen Unterschied machen.

In einem dritten Schritt wurde für alle realisierbaren Maßnahmen das wirtschaftliche Potenzial bewertet. Um die dafür relevanten Kriterien auszuwählen, wurden interne Stakeholder befragt. Dadurch wurde sichergestellt, dass die Ergebnisse der Fallstudie in den unternehmensintern relevanten KPIs abgebildet werden. Entsprechend erfolgte die Bewertung auf Basis einer Wirtschaftlichkeitsrechnung des Controllings, in der sowohl Investitionsausgaben (CapEx) als auch Betriebsausgaben (OpEx) zur Bewertung des Net Present Value (NPV) und der Internal Rate of Return (IRR) einfließen (Details s. Abb. 6).

Verwendet wurden unter anderem reale Daten eines exemplarischen EnBW-PV-Parks, Erfahrungswerte aus einem ersten Praxistest sowie Informationen aus bestehenden Rückbaugutachten.

Angesichts der eingangs beschriebenen großen Resilienzversprechen der Kreislaufwirtschaft im gegenwärtigen Diskurs lag auch eine Bewertung der Resilienzeffekte einzelner Kreislaufmaßnahmen nahe. Eine solche Bewertung der Resilienz – auch vor einem mittel- oder langfristigen Zeithorizont – stellte sich allerdings als nicht umsetzbar heraus.

Abb. 6 – Kriterien zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit

### Wirtschaftlichkeit

Zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit wurden folgende Kriterien ausgewählt. Die Auswahl sollte in jedem Unternehmen individuell so getroffen werden, dass die Ergebnisse in den unternehmensintern relevanten KPIs abgebildet werden.



**Investitionsausgaben (CapEx)**  
Unter CapEx werden die gesamten Anfangsinvestitionen bis zur Inbetriebnahme eines PV-Parks zusammengefasst – also sowohl Kosten für die Komponenten als auch für Bauleistungen und Planung.

**Betriebsausgaben (OpEx)**  
OpEx beschreibt die laufenden Kosten des Anlagenbetriebs, also beispielsweise Kosten für Wartung, Instandsetzung, Überwachung und für Ersatzteile. Diese Ausgaben beeinflussen die Wirtschaftlichkeit des Parks über dessen gesamte Lebensdauer.

**Net Present Value (NPV)**  
Der NPV eines PV-Parks ergibt sich aus der Summe aller diskontierten künftigen Cashflows – zum Beispiel Stromeinnahmen und OpEx – abzüglich der initialen CapEx. Ein positiver NPV zeigt, dass der Park über die Betriebsdauer hinweg einen höheren Wert erwirtschaftet als eine alternative Anlage mit vergleichbarem Risiko- und Zinssatz.

**Internal Rate of Return (IRR)**  
Die IRR beschreibt den Zinssatz, bei dem der NPV eines Projekts exakt null beträgt. Sie gibt damit an, welchen durchschnittlichen jährlichen Ertrag ein PV-Park über seine Lebensdauer hinweg auf das eingesetzte Kapital erzielt. Ist die IRR höher als ein Kalkulationszinssatz, ist die Investition vorteilhaft.

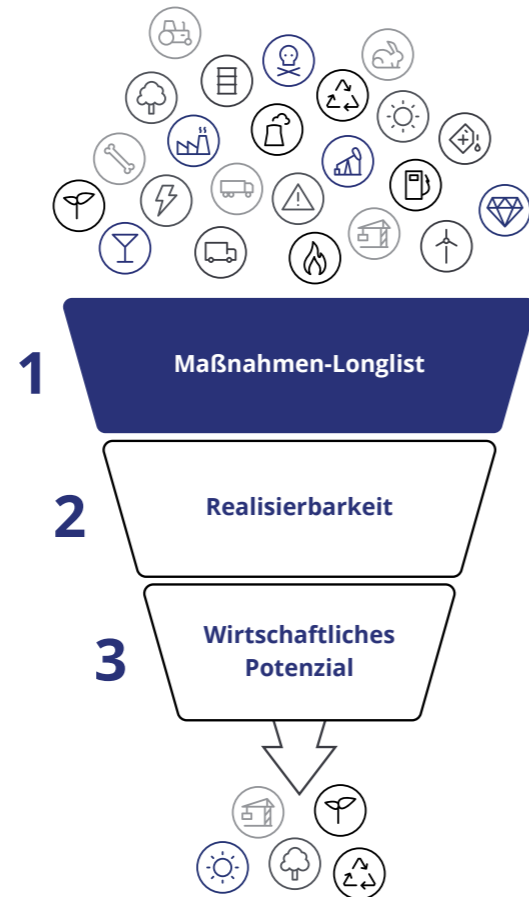
Zum einen fehlte hierfür die entsprechende Datenbasis; zum anderen wurden auf Grundlage der qualitativen Einschätzung aus Schritt 2 keine kurzfristig realisierbaren Maßnahmen identifiziert, bei denen ein relevanter Effekt auf die Resilienz zu erwarten gewesen wäre. Vor diesem Hintergrund wurde in dieser Fallstudie darauf verzichtet, Resilienz als Bewertungskriterium aufzunehmen. Wie Kreislaufmaßnahmen langfristig zu Resilienz führen können, wird im Rahmen des Handlungsfelds 3 erörtert.

Das Ergebnis dieses Prozesses war eine Shortlist an Maßnahmen, die sowohl realistisch umsetzbar als auch wirtschaftlich attraktiv (oder zumindest neutral) sind – und damit fundierte nächste Schritte für den zukünftigen Ausbau zirkulärer Ansätze in der PV-Energieerzeugung der EnBW bilden.

## 4.2 Bewertung der Kreislaufmaßnahmen

### 4.2.1 Schritt 1: Maßnahmen-Longlist

Basierend auf der beschriebenen Vorgehensweise wurden zunächst zwölf potenzielle Maßnahmen(gruppen) identifiziert, die sich auf die R-Strategien R4 Re-use, R5 Repair, R6 Refurbish, R7 Remanufacture und R9 Recycle beziehen. Diese Longlist umfasst ausschließlich jene Kreislaufmaßnahmen, die für den Geschäftsbereich PV bei der EnBW grundsätzlich umsetzbar wären. Entsprechend enthielt bereits die Longlist keine Maßnahmen, bei denen (z.B. basierend auf den Vorstudien) bekannt war, dass etwa die Marktbedingungen oder grundlegende technische Hürden keinerlei Handlungsoptionen bieten. Dazu zählt zum Beispiel die Maßnahme „gezielte Beschaffung wiederaufbereiteter Komponenten für den Bau neuer PV-Parks“, da Komponenten in solchen Mengen schlichtweg nicht zur Verfügung stehen. Die Longlist ist deswegen eine unternehmensspezifische Momentaufnahme, die bei einem anderen Energieunternehmen bzw. in einigen Jahren bereits anders aussehen kann.



Die Unterkonstruktion der PV-Module wird für jeden Park individuell so geplant, dass sie optimal an die Umgebung und an Maße und Gewicht der aktuellen Generation von PV-Modulen angepasst ist.

Tab. 3 – Longlist potenzieller Kreislaufmaßnahmen

ID	Lebenszyklus	R-Strategie	Komponente	Maßnahme
M1	Input	R9 Recycle	<b>komponentenübergreifend</b>	Erhöhung des <b>Recyclinganteils</b> in den Inputs: Stahl-Unterkonstruktion, PV-Module, Wechselrichter etc.
M2	Input	R4 Re-use	<b>Unterkonstruktion</b>	Wechsel von <b>verzinktem Stahl</b> auf <b>Aluminium</b> , um die Lebensdauer zu erhöhen und <b>Wiederverwendung</b> zu ermöglichen/wahrscheinlicher zu machen
M3	Input	R4 Re-use	<b>Unterkonstruktion</b>	<b>Standardisierung</b> der Unterkonstruktionen für parkübergreifende Verwendung und Wiederverwendung
M4	Input	R6 Refurbish, R7 Remanufacture	<b>Wechselrichter und Module</b>	Beschaffung von <b>wiederaufbereiteten Wechselrichtern und Modulen</b> von Second-Life-Märkten (extern) als Ersatzkomponenten
M5	Input, Nutzung	R6 Refurbish, R7 Remanufacture	<b>PV-Module</b>	Beschaffung <b>modular</b> aufgebauter, besser/selbst <b>reparierbarer PV-Module</b>
M6	Input, Nutzung	R5 Repair	<b>Wechselrichter</b>	Beschaffung <b>modular</b> aufgebauter, besser/selbst <b>reparierbarer Wechselrichter</b>
M7	Nutzung	R5 Repair	<b>PV-Module und Wechselrichter</b>	Reparatur eigener <b>Wechselrichter und Module</b> zur eigenen Wiederverwendung als <b>Ersatzkomponenten</b>
M8	Input, Nutzung	R4 Re-use	<b>komponentenübergreifend</b>	Projektübergreifenden, <b>internen Markt</b> schaffen für wiederverwendbare/übrige Ersatzkomponenten (dadurch weniger Materialverbrauch durch weniger Neubeschaffung)
M9	Output	R4 Re-use	<b>Unterkonstruktion</b>	<b>Wiederverwendung der Unterkonstruktion</b>
M10	Output (und Stilllegung)	R6 Refurbish, R7 Remanufacture	<b>PV-Module</b>	<b>Verkauf</b> von <b>gebrauchten/beschädigten Modulen</b> an Dienstleister ( <b>Wiederaufbereitung</b> )
M11	Output (und Stilllegung)	R6 Refurbish, R7 Remanufacture	<b>Wechselrichter</b>	<b>Verkauf</b> von <b>gebrauchten/beschädigten Wechselrichtern</b> an Dienstleister ( <b>Wiederaufbereitung</b> )
M12	Output (und Stilllegung)	R9 Recycle	<b>PV-Module und Wechselrichter</b>	<b>Höherwertiges Recycling</b> nicht-reparierbarer <b>PV-Module und Wechselrichter</b>

#### 4.2.2 Schritt 2: Realisierbarkeits-Check

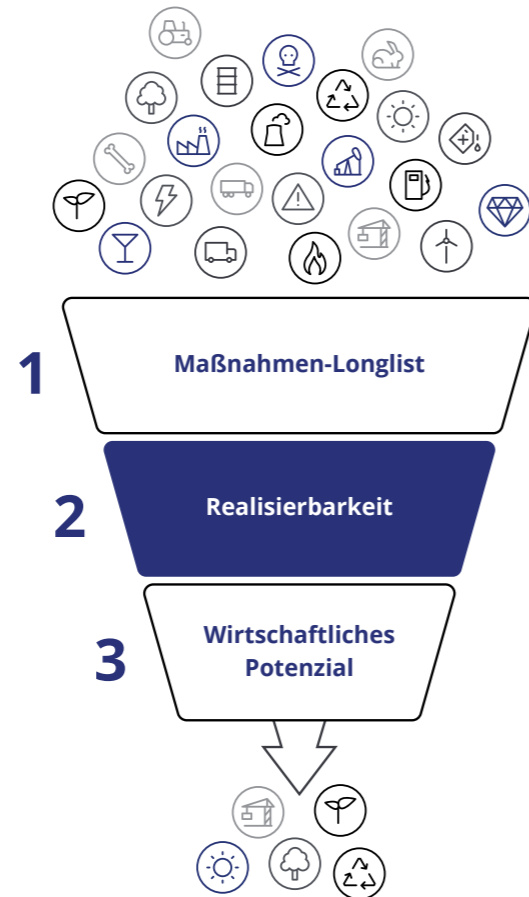
Im nächsten Schritt wurden die Maßnahmen der Longlist auf ihre Realisierbarkeit geprüft. Viele der Maßnahmen wurden ausgeschlossen, weil sie unter heutigen Bedingungen nicht umsetzbar sind. Entlang der Realisierbarkeitskriterien lassen sich die ausgeschlossenen Maßnahmen in vier Gruppen einteilen (s.a. Abb. 5).

##### Verfügbarkeit geeigneter Marktangebote

Da bereits die Erstellung der Longlist auf EnBW-Spezifika basierte, scheitert nur eine Maßnahme an fehlenden Angeboten: die gezielte Beschaffung modular aufgebaut, besser reparierbarer PV-Module (M5). Der Markt für PV-Module bietet aktuell kaum Variation im Produktaufbau, weshalb eine Entscheidung für einen bestimmten Hersteller aufgrund der Modularität oder Reparierbarkeit seiner Produkte als unrealistisch eingeschätzt wurde.

##### Technische und prozessuale Limitationen

An diesem Kriterium scheiterten gleich mehrere Maßnahmen; so beispielsweise die Idee, eine Wiederverwendung von Unterkonstruktionen anzustreben (M9). Die Unterkonstruktionen (meist aus verzinktem Stahl) sind genau auf die Lebensdauer und die lokalen Gegebenheiten eines Parks ausgelegt. Ob danach noch eine Wiederverwendung möglich ist, hängt von individuellen Standorteinflüssen ab und stellt immer eine Einzelfallentscheidung dar. Eine Wiederverwendung auf einer anderen Fläche ist kaum möglich, da die Unterkonstruktionen spezifisch für die zu bebauende Fläche geplant und angefertigt werden. Eine Wiederverwendung auf derselben Fläche ist ebenfalls unwahrscheinlich, da über die Lebensdauer des Parks hinweg mit einer erheblichen technischen Weiterentwicklung von Modulen zu rechnen ist (z.B. bezüglich des Formats, des Gewichts und der Befestigung), sodass diese nicht mehr zur bestehenden Unterkonstruktion passen.



Die Bewertung der Realisierbarkeit zeigt: Trotz der Vielzahl theoretisch möglicher Maßnahmen ist unter den gegebenen Bedingungen nur ein Teil davon unmittelbar und realistisch umsetzbar.

Ähnlich verhält es sich mit der Erwägung, Aluminium statt verzinktem Stahl als Material für die Unterkonstruktion zu verwenden (M2). Zwar ist Aluminium korrosionsbeständiger und damit länger haltbar, dieser Vorteil verpufft jedoch, wenn eine Wiederverwendung der Unterkonstruktion – aus den genannten Gründen – ohnehin kaum praktikabel ist.

Auch die Option, gebrauchte oder beschädigte Wechselrichter dem Zweitmarkt zuzuführen (M11), ist unter den aktuellen Prozessbedingungen nicht realisierbar: In den Interviews zeigte sich, dass Wechselrichter bei der EnBW grundsätzlich repariert und anschließend intern weiterverwendet werden. Sie verlassen den Konzern erst dann, wenn eine Reparatur nicht mehr möglich ist. In diesem Zustand ist eine Aufbereitung zum Verkauf auf dem Zweitmarkt nicht mehr möglich.

##### Organisatorische Voraussetzungen, insbesondere Datenverfügbarkeit

Zwei Maßnahmen der Longlist lassen sich zumindest kurzfristig nicht realisieren, weil die aktuell implementierten Prozesse keine Umsetzung erlauben. Dazu gehört die Erhöhung des Recyclinganteils in den Inputs (M1). Informationen über Recyclinganteile werden derzeit im Beschaffungsprozess nicht systematisch bereitgestellt. Dementsprechend ist eine Auswahl von Lieferanten oder Produkten anhand ihrer Recyclingquoten (falls überhaupt Alternativen verfügbar sind) aktuell nicht möglich. Auch die Standardisierung von Unterkonstruktionen (M3) ist kurzfristig nicht umsetzbar. Unterschiedliche Spezifikationen je Park, die derzeitige Beschaffungslogik und potenzielle strategische Risiken wie Lock-in-Effekte verhindern zumindest kurzfristig die Umsetzung dieser Maßnahme. Unabhängig davon setzt die Umsetzung der Maßnahme M3 eine Kooperation mit den Herstellern voraus.

##### Wesentlichkeit des Potenzials

Schließlich ist die Maßnahme der Beschaffung wiederaufbereiteter Komponenten von Second-Life-Märkten als Ersatzteile (M4) ausgeschlossen worden, weil dadurch weder kurz- noch langfristig wesentliche ökologische oder ökonomische Effekte zu erwarten sind. Ersatzkomponenten werden meist bereits zu Beginn eines Projekts eingeplant und vorgehalten. Nachbestellungen sind selten und erfolgen vor allem in Ausnahmefällen, etwa bei Serienfehlern. Entsprechend gering ist das Potenzial dieser Maßnahme.

Die Bewertung der Realisierbarkeit zeigt: Trotz der Vielzahl theoretisch möglicher Maßnahmen ist unter den gegebenen Bedingungen nur ein Teil davon unmittelbar und realistisch umsetzbar.



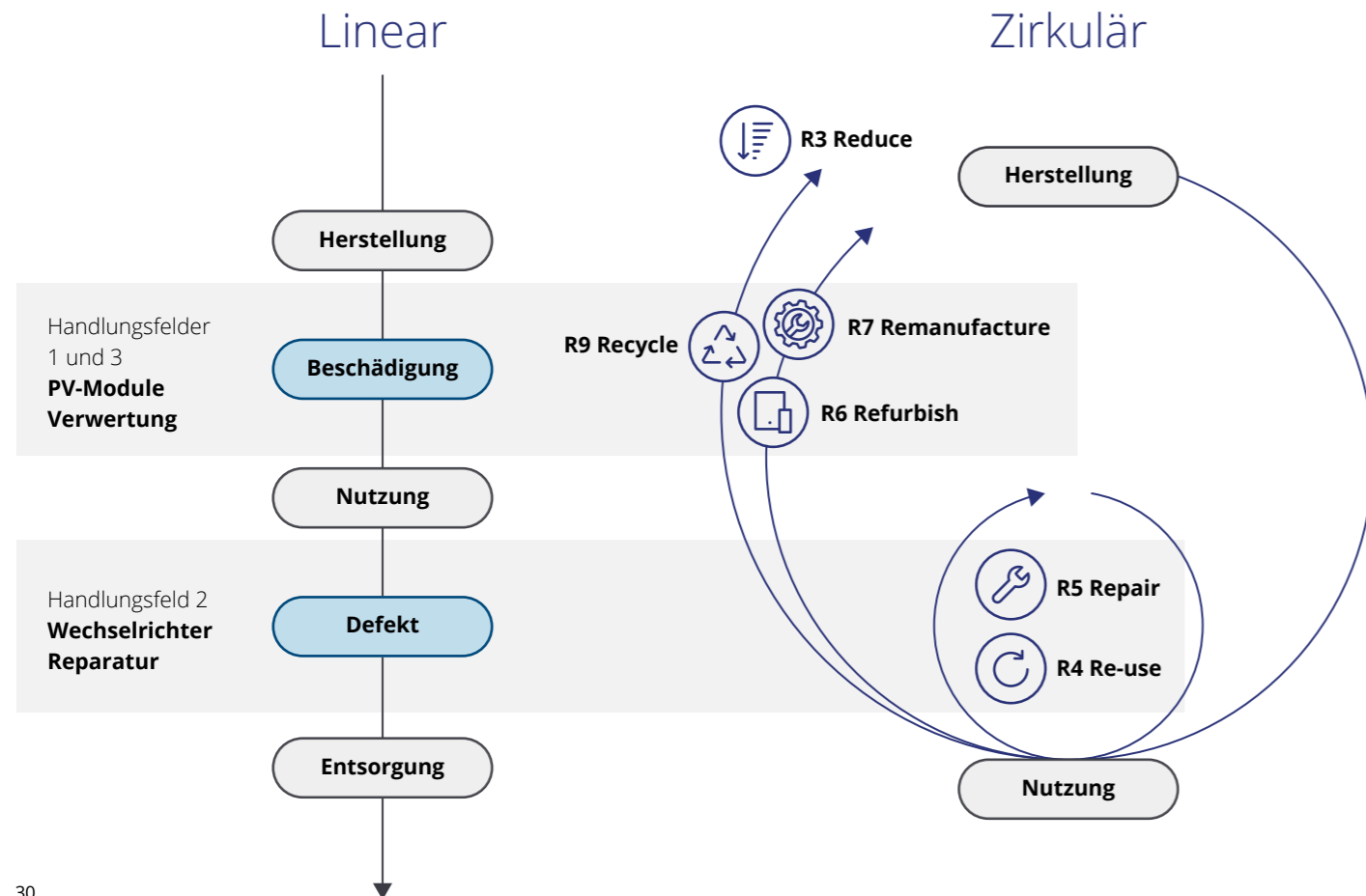
PV-Module machen einen Großteil des Materialgewichts eines PV-Parks aus – Maßnahmen, die die Kreislauffähigkeit der Module adressieren, haben ein entsprechend hohes Potenzial.

### 4.2.3 Schritt 3: Wirtschaftliches Potenzial

Im finalen Bewertungsschritt lag der Fokus auf der Bewertung der Wirtschaftlichkeit. Alle grundsätzlich als realisierbar identifizierten Maßnahmen lassen sich dabei in drei Handlungsfelder clustern. Die Handlungsfelder dienen der Bündelung thematisch ähnlicher Maßnahmen entlang der jeweiligen Stufen der Wertschöpfungskette.



Abb. 7 – Die Handlungsfelder und ihre Zuordnung im linearen und im zirkulären Modell



Die Größe von PV-Parks und die Menge des darin verbauten Materials verdeutlichen ihr Kreislaufpotenzial.

**4.2.3.1 Handlungsfeld 1: „No Regret“-Maßnahmen**

Das erste Handlungsfeld umfasst Maßnahmen, die kurzfristig sowie mit geringem Aufwand und begrenzten Risiken umgesetzt werden können („no regret“). Im Fokus stehen PV-Module, die beim Bau eines PV-Parks durch den beauftragten Generalunternehmer beschädigt wurden. Solche Schäden können beispielsweise durch unsachgemäße Handhabung, Witterungseinflüsse, Produktionsfehler oder andere externe Faktoren entstehen. Je nach Art des Defekts bestehen unterschiedliche Weiterverwertungsoptionen – von der Aufbereitung für den Zweitmarkt bis zur stofflichen Verwertung.

Beschädigte Module werden derzeit ohne Leistungsprüfung dem Generalunternehmer überlassen. Die EnBW erhält vom Generalunternehmer einen Entsorgungsnachweis gemäß KrWG und hat keinen Einfluss auf die Art der Verwertung der Module. Potenziell wiederverwendbare oder reparierbare Module werden dadurch mitunter direkt dem Recycling zugeführt. Künftig könnte die EnBW beschädigte Module systematisch gezielt an qualifizierte Dienstleister für Reparatur, Refurbishment und Remanufacturing (R5, R6 und R7) oder höherwertiges Recycling (R9) übergeben und damit höherwertige Verwertungswege erschließen.

Zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit wurde ein Praxistest mit rund 150 beschädigten Modulen aus einem im Bau befindlichen PV-Park durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass die EnBW bei einer Zusammenarbeit mit Dienstleistern die funktionsfähigen PV-Module auf dem Zweitmarkt verkaufen und auf diesem Wege geringe Erlöse erzielen kann. Sind die Module nicht funktionsfähig, führt die Zuführung zu einem höherwertigen Recycling kurzfristig zu zusätzlichen Kosten. Mindestens eine

**Tab. 4 – Maßnahmen im Handlungsfeld 1 – „No Regret“-Maßnahmen**

ID	R-Strategie	Maßnahme
M10	R6 Refurbish, R7 Remanufacture	<b>Verkauf von gebrauchten/beschädigten Modulen an Dienstleister (Wiederaufbereitung)</b>
M12	R9 Recycle	<b>Höherwertiges Recycling nicht-reparierbarer PV-Module und Wechselrichter</b>

Kostenneutralität gegenüber dem bisherigen Status quo erscheint jedoch erreichbar, sofern zukünftig die Details der Zusammenarbeit mit den Partnern auf dieses Vorgehen ausgerichtet werden.

Vor einem kurzfristigen Zeithorizont sind die Maßnahmen M10 und M12 also „No Regret“-Optionen: Sie sind risikoarm, schnell implementierbar und erfordern nur geringe Anpassungen bestehender Abläufe. Kurzfristig generieren sie moderate ökologische und wirtschaftliche Vorteile. Ihre wirtschaftliche Relevanz wird jedoch im Zuge künftiger Rückbaumengen stark zunehmen (siehe Handlungsfeld 3). Damit bilden diese Maßnahmen heute die Grundlage für eine zukunftsorientierte und wirtschaftlich tragfähige Kreislaufwirtschaft für den Umgang mit PV-Modulen.

„No Regret“-Optionen generieren kurzfristig moderate ökologische und wirtschaftliche Vorteile, die im Zuge künftiger Rückbaumengen jedoch stark zunehmen werden.

**4.2.3.2 Handlungsfeld 2: Kreislaufmaßnahmen im Betrieb der PV-Parks stärken**

Das zweite Handlungsfeld adressiert die Kreislaufwirtschaftspotenziale im Betrieb von PV-Anlagen. Das besondere an diesem Handlungsfeld ist, dass zwei der drei zugehörigen Maßnahmen bei der EnBW bereits teilweise umgesetzt werden. Wechselrichter werden bereits standardmäßig repariert und wieder als Ersatzteile eingelagert (M7). Auch für die Reparatur von Modulen läuft zum Zeitpunkt der Fallstudie bereits ein Pilot (M7). Darüber hinaus werden umfassende Daten gesammelt, die zukünftig einen projektübergreifenden internen Markt ermöglichen können (M8). Da diese beiden Maßnahmen bereits in der Umsetzung sind, stand die Maßnahme M6 im Fokus der Bewertung der Wirtschaftlichkeit: die gezielte Beschaffung von besser bzw. selbst reparierbaren Wechselrichtern.

Maßnahme M6 ist grundsätzlich realisierbar, da Unterschiede in der Reparierbarkeit zwischen verschiedenen Herstellern von Wechselrichtern bestehen. Da Wechselrichter über die Lebensdauer eines Parks gemittelt mindestens einmal repariert werden und damit einen wesentlichen OpEx-Posten darstellen, ist ihre Reparierbarkeit außerdem sehr relevant.

Besonders wirtschaftlich wird Reparierbarkeit, wenn ausgewählte Defekte durch geschultes Personal selbst behoben werden können. Das spart Transport- und Handhabungskosten, verkürzt Stillstandszeiten und reduziert Abhängigkeiten von Erstausrüstern. Einige Hersteller erlauben diese Selbst-Reparatur bereits (sogar innerhalb der Garantiezeit).

Eine konservative Beispielrechnung auf Basis eines exemplarischen EnBW-PV-Parks zeigt, dass der Einsatz von Wechselrichtern mit (Selbst-)Reparaturmöglichkeit – nach Ablauf der Garantie – den NPV des Parks zum Zeitpunkt der Investitionsentscheidung leicht erhöhen kann. Dieses „NPV-Plus“ kann umgekehrt etwas höhere Anschaffungskosten für besser reparierbare Wechselrichter rechtfertigen.

**Tab. 5 – Maßnahmen im Handlungsfeld 2 – Kreislaufmaßnahmen im Betrieb der PV-Parks stärken**

ID	R-Strategie	Maßnahme
M6	R5 Repair	Beschaffung <b>modular</b> aufgebauter, besser/selbst <b>reparierbarer Wechselrichter</b>
M7	R5 Repair	Reparatur eigener <b>Wechselrichter und Module</b> zur eigenen Wiederverwendung als <b>Ersatzkomponenten</b>
M8	R4 Re-use	Projektübergreifenden, <b>internen Markt</b> schaffen für wiederverwendbare/übrige Ersatzkomponenten (dadurch weniger Materialverbrauch durch weniger Neubeschaffung)

Insgesamt erweist sich eine bessere Reparierbarkeit als mindestens kostenneutral und in der konkreten Beispielrechnung als wirtschaftlich vorteilhaft.

Für die systematische Umsetzung der Maßnahme M6 (Beschaffung modular aufgebauter, besser/selbst reparierbarer Wechselrichter) kann die Reparierbarkeit als Beschaffungskriterium etabliert werden, beispielsweise durch die standardisierte Einholung relevanter Informationen.

Ergänzend können eigenständige Tests der Geräte im Prüflabor durchgeführt werden, um die Reparierbarkeit vor Auftragsvergabe zu prüfen. Zudem können Mitarbeitende gezielt geschult werden, um Reparaturen an Geräten ausgewählter Hersteller eigenständig vorzunehmen. Mit zunehmender Erfahrung lassen sich diese Faktoren künftig noch gezielter in Beschaffung, Controlling und operativen Prozessen berücksichtigen, sodass Potenziale systematisch identifiziert und umgesetzt werden.

Wechselrichter werden bereits standardmäßig repariert und wieder als Ersatzteile eingelagert (M7).

Eine bessere Reparierbarkeit erweist sich als mindestens kostenneutral und in der konkreten Beispielrechnung als wirtschaftlich vorteilhaft.



Auch auf unebenen Untergründen ermöglicht eine individuelle Unterkonstruktion die optimale Ausrichtung der PV-Module.

#### 4.2.3.3 Handlungsfeld 3: Zukünftige Resilienz und Wertschöpfung

Das dritte Handlungsfeld adressiert Maßnahmen, deren wirtschaftliches Potenzial heute zwar noch begrenzt ist, die aber zunehmend an strategischer Relevanz gewinnen. Die erste Maßnahme betrifft den Aufbau einer robusten Datenbasis für künftige Kreislaufwirtschaft. Wie in 4.2.2 beschrieben, scheitert die Realisierbarkeit einer Maßnahme häufig an fehlenden Daten: Eine Auswahl von Komponenten basierend auf Kreislaufprinzipien (z.B. dem Recyclinganteil) ist aktuell nicht möglich, weil diese Daten nicht standardmäßig zur Verfügung gestellt werden. Ohne belastbare Daten über Recyclinganteil und Herkunft können auch mögliche Potenziale nicht genutzt werden. Zum Beispiel ist es denkbar, dass zukünftig ein allgemeiner Ausbau der lokalen Zirkulation von Rohstoffen inklusive Rezyklat stattfindet; die gezielte Beschaffung von Komponenten aus lokal zirkulierten Rezyklaten würde dann eine größere Resilienz und Unabhängigkeit von geopolitischen Risiken ermöglichen. Eine Steuerung dahingehend ist allerdings nur möglich, wenn die entsprechende Datenbasis vorhanden ist. Eine entsprechende Datenabfrage bei Herstellern und Lieferanten würde außerdem einen Impuls für den Aufbau solch lokaler Rohstoffkreisläufe geben.

Damit diese Daten zukünftig als Entscheidungsgrundlage zur Verfügung stehen, sollten standardisierte Informationen unter anderem zu Recyclinganteilen relevanter Komponenten erhoben werden. Zudem kann die Analyse von Supply-Chain-Risiken (in Bezug auf die aktuelle Lieferkette der Rohstoffe in den Komponenten) durch Risiko- und Szenarioanalysen ausgebaut werden. Dadurch würden strategische Entscheidungen zu Materialsubstitution, Lieferantenauswahl und entsprechender Risikoreduktion ermöglicht. Kurzfristig entsteht daraus kein direkter wirtschaftlicher Nutzen; langfristig jedoch ein wichtiger Beitrag zu Resilienz und Betriebskontinuität.

Eine weitere Maßnahme ist die Vorbereitung auf den Rückbau von PV-Parks. Zwar ist das heutige wirtschaftliche Potenzial der höchstmöglichen Verwertung beschädigter PV-Module noch gering, mit wachsendem

Tab. 6 – Maßnahmen im Handlungsfeld 3 – Zukünftige Resilienz und Wertschöpfung

ID	R-Strategie	Maßnahme
M1	R9 Recycle	Erhöhung des <b>Recyclinganteils</b> in den Inputs Stahl-Unterkonstruktion, PV-Module, Wechselrichter etc.
M10	R6 Refurbish, R7 Remanufacture	<b>Verkauf von gebrauchten/beschädigten Modulen an Dienstleister (Wiederaufbereitung)</b>
M12	R9 Recycle	<b>Höherwertiges Recycling</b> nicht-reparierbarer <b>PV-Module und Wechselrichter</b>

Volumen rückzubauender PV-Parks wird dieses jedoch deutlich steigen. Obwohl der Rückbau des EnBW-PV-Portfolios erst ab ca. 2035 beginnt und die allermeisten der heutigen PV-Kapazitäten der EnBW erst nach 2050 ihr Lebensende erreichen, bestehen erhebliche Chancen. Erste Modellierungen zeigen, dass allein Stahl, Aluminium und Kupfer beim Rückbau des aktuellen Bestands einen signifikanten Restmaterialwert haben, dessen Erlöspotenzial insbesondere bei steigenden Rohstoffpreisen in der Zukunft noch wächst. Die Erlöse aus PV-Modulmaterialien sind dabei noch nicht eingerechnet.

Im Rahmen dieser Maßnahme könnten also die EnBW-internen Verwertungsprozesse weiterentwickelt werden, sodass erweiterte Erkenntnisse über Materialwerte am Lebensende eines PV-Parks stärker in Investitionsentscheidungen einfließen

können. Gleichzeitig könnte die EnBW durch die gezielte Verwertung zur regionalen Ressourcenverfügbarkeit beitragen und im Gegenzug bei Neubau- oder Repoweringprojekten davon profitieren. Die exakte Wirkung dieser Rückkopplung lässt sich allerdings derzeit nicht beziffern und wird maßgeblich von der Entwicklung der Recyclingmärkte beeinflusst.

Die Bewertung der Wirtschaftlichkeit der Maßnahmen zeigt: Jene Maßnahmen, die vor einem kurzfristigen Zeithorizont als realisierbar bewertet wurden, sind mindestens kostenneutral, eher sogar mit einem geringen wirtschaftlichen Plus umzusetzen (Handlungsfelder 1 und 2). Weitere wirtschaftliche Potenziale liegen für den Bereich PV allerdings in der Zukunft und sind deswegen heute weniger genau quantifizierbar (Handlungsfeld 3).

Erste Modellierungen zeigen, dass allein Stahl, Aluminium und Kupfer beim Rückbau des aktuellen Bestands einen signifikanten Restmaterialwert haben, dessen Erlöspotenzial insbesondere bei steigenden Rohstoffpreisen in der Zukunft noch wächst.

# 5. Ergebnis

## Der Business Case Kreislaufwirtschaft bei einem Energieunternehmen

### 5.1 Übergeordnete Erkenntnisse: Handlungsspielräume der EnBW

Während viele Kreislaufstrategien grundsätzlich im Kontext der PV-Energieerzeugung anwendbar sind, liegt ihre Umsetzung oft außerhalb des unmittelbaren Handlungsspielraums einzelner Unternehmen. Insbesondere die Strategien zur höchstmöglichen Verwertung von Komponenten und Materialien erfordern eine Zusammenarbeit über verschiedene Stufen der Wertschöpfungskette hinweg und hängen dadurch von systemischen Faktoren ab. Auch für die EnBW sind deswegen Handlungsspielräume für kurzfristig umsetzbare Maßnahmen begrenzt – aber dennoch existent.

EnBW's größter Einfluss besteht in der Nutzungsphase der Anlagen. Reparaturen (R5) elektronischer Komponenten wie Wechselrichter ermöglichen bereits heute eine Verlängerung der Lebensdauer. Erste Pilotprojekte zeigen zudem, dass auch beschädigte PV-Module oft repariert oder aufbereitet werden können – dadurch entstehen neue Optionen für Wiederverwendung und Wertschöpfung. Zusätzlich lassen sich Re-use-Potenziale (R4) intakter Komponenten im Betrieb direkt steuern, unterstützt durch im Aufbau befindliche, parkübergreifende Datenstrukturen.

Auf das Produktdesign, den Materialeinsatz und Herstellungsprozesse kann die EnBW hingegen nur indirekten Einfluss ausüben. Entscheidungen zu modularer Bauweise oder erhöhten Recyclinganteilen in den Komponenten liegen bei den Herstellern. Zudem werden relevante Mengen an

Sekundärmaterialien erst mit den kommenden Rückbauwellen verfügbar sein. Auch Aufbereitungsverfahren wie Refurbishment (R6), Remanufacturing (R7) oder hochwertiges Recycling (R9) hängen von externen Akteuren ab, deren Technologien und Geschäftsmodelle sich zum Teil noch in der Entwicklung befinden. Die Spielräume der EnBW beschränken sich hier primär auf die Auswahl geeigneter Partner sowie den Aufbau potenziell langfristiger Kooperationen.

Insgesamt zeigt sich am Beispiel der PV-Energieerzeugung bei der EnBW: Ein einzelnes Energieunternehmen kann nur in wenigen Bereichen der Wertschöpfungskette direkt auf die Kreislaufwirtschaft einwirken. Für eine wirksame Umsetzung der Kreislaufwirtschaft auf gesamtwirtschaftlicher

Ebene sind branchenweite Initiativen und politische Rahmenbedingungen erforderlich, die Innovationen, Märkte und digitale Infrastrukturen unterstützen.

So könnten systemische Rahmenbedingungen auf europäischer Ebene, wie die Etablierung eines funktionierenden Binnenmarkts für Abfälle oder die Förderung eines innereuropäischen Recyclingsektors, grenzüberschreitende Stoffströme erleichtern. Darüber hinaus wären Anreize für die Verwertung und Nutzung sekundärer strategischer und kritischer Rohstoffe zuträglich. Solche Rahmenbedingungen würden dabei helfen, die regulatorische Fragmentierung der einzelnen Mitgliedsstaaten durch eine harmonisierte Umsetzung zu reduzieren.

Ein einzelnes Energieunternehmen kann nur in wenigen Bereichen der Wertschöpfungskette direkt auf die Kreislaufwirtschaft einwirken; für eine wirksame Umsetzung der Kreislaufwirtschaft sind branchenweite Initiativen und politische Rahmenbedingungen erforderlich.

Abb. 8 – Ergebnis: Handlungsfelder und ihre Potenziale



### 5.2 Konkrete Kreislaufwirtschaftspotenziale: Identifizierte Handlungsfelder

Der „Business Case Kreislaufwirtschaft“ besteht für die EnBW – trotz begrenzter Einflussmöglichkeiten auf Teile der PV-Wertschöpfungskette. Bereits kurzfristig kann die EnBW mehrere Kreislaufmaßnahmen umsetzen. Insbesondere im Betrieb ermöglichen diese Maßnahmen direkte Kosteneinsparungen und adressieren mit Re-use (R4) und Repair (R5) gleichzeitig hochwertige Kreislaufstrategien, auf die die EnBW einen unmittelbaren Einfluss hat (Handlungsfeld 2, s. Abb. 7). Auch die Entscheidung über die Weiterverwertung beschädigter Komponenten ermöglicht einen Beitrag zur Kreislaufwirtschaft, der mindestens kostenneutral, oftmals auch erlösbringend für die EnBW ist (Handlungsfeld 1).

Außerdem kann die EnBW durch Kreislaufmaßnahmen entscheidende Weichen stellen, um langfristig zu profitieren. Dazu gehört, sich in den entstehenden Märkten für die Wiederverwertung von Materialien und Komponenten zu positionieren und frühzeitig Erfahrungen mit Dienstleistern für Refurbishment (R6), Remanufacturing (R7) und innovatives Recycling (R9) aufzubauen (kurzfristig: Handlungsfeld 1; langfristig: Handlungsfeld 3). Dies ermöglicht, Anlagen am Ende ihrer Lebensdauer sowohl ökonomisch als auch ökologisch bestmöglich zu verwerten. Ebenso wichtig ist der Aufbau einer Datenbasis zu Recyclinganteilen – insbesondere kritischer Rohstoffe – und zur genauen Herkunft der Bestandteile eingekaufter Komponenten. Diese Daten schaffen auch hinsichtlich der Risiken in der Lieferkette weitere Transparenz und ermöglichen

eine gezielte Steuerung. Ein wachsender Anteil lokal zirkulierter Materialien kann Energieunternehmen wie der EnBW größere Resilienz und Unabhängigkeit von geopolitischen Risiken ermöglichen.

Der „Business Case Kreislaufwirtschaft“ besteht trotz begrenzter Einflussmöglichkeiten auf Teile der PV-Wertschöpfungskette.

## 6. Fazit

Diese Fallstudie zeigt, wie Kreislaufwirtschaft auf der Ebene eines Einzelunternehmens konkret umgesetzt werden kann. Die Übertragung von Kreislaufstrategien auf die eigene Wertschöpfungskette macht den eigenen Einflussbereich sichtbar. Darauf basierend lassen sich potenzielle Maßnahmen identifizieren und mithilfe unternehmensspezifischer Bewertungskriterien nach Realisierbarkeit und Wirtschaftlichkeit bewerten – stets unter Einbindung der relevanten internen Fachbereiche. Die entwickelte Vorgehensweise ist branchenunabhängig einsetzbar und bietet Unternehmen eine Blaupause, wie sie die Integration von Kreislaufwirtschaft in ihr bestehendes Geschäftsmodell stärken können. So können erste individuelle Kreislaufwirtschaftspotenziale erschlossen und wirtschaftliche Vorteile realisiert werden.

Unsere Untersuchung zeigt allerdings auch, dass Einzelunternehmen durch ihre Abhängigkeit von systemischen Faktoren wie z.B. Markt- und Datenverfügbarkeiten sowie Technologien nur begrenzte unmittelbare Spielräume haben. Die großen versprochenen Wertschöpfungs- und Resilienzpotenziale der Kreislaufwirtschaft sind im Wesentlichen noch Zukunftsmusik – vorausgesetzt, wirtschaftliche und politische Akteure stellen jetzt die entsprechenden Weichen.

Wirtschaftliche Akteure wie Einzelunternehmen können das hier beschriebene Vorgehen nutzen, um die organisationsindividuelle Relevanz von Kreislaufwirtschaft

unternehmensintern sichtbar zu machen. Dies schafft Akzeptanz und hinterfragt bereits die Logiken linearer Geschäftsmodelle – etwa die unzureichende Berücksichtigung der Total Cost of Ownership.

Politische Akteure sind gefordert, die Rahmenbedingungen für eine gesamtwirtschaftliche Transformation zu schaffen. Dazu gehört u.a. die (Weiter-)Entwicklung von Märkten und Technologien; es gilt aber beispielsweise auch, eine gemeinsame Sprache zu finden, welche die Messbarkeit von Fortschritten hin zur Kreislaufwirtschaft ermöglicht. Wenn diese Voraussetzungen geschaffen sind, hat Kreislaufwirtschaft zukünftig eine deutlich bessere Chance, einen Beitrag zu Resilienz und Wettbewerbsfähigkeit zu leisten und „Europas neues Erfolgsmodell“ zu werden.

# Abkürzungen

Abkürzung	Bezeichnung
CapEx	Capital Expenditure (Investitionsausgaben)
CEA	Circular Economy Act (EU-Verordnung, geplant)
CRMA	Critical Raw Materials Act (EU-Verordnung)
CSRD	Corporate Sustainability Reporting Directive (EU-Richtlinie)
DPP	Digital Product Passport (EU, Teil der ESPR)
EPR	Extended Producer Responsibility (erweiterte Herstellerverantwortung)
ESPR	Ecodesign for Sustainable Products Regulation (EU-Verordnung)
ESRS	European Sustainability Reporting Standards
GCP	Global Circularity Protocol (Urheber: WBCSD und One Planet Network)
GHG Protocol	Greenhouse Gas Protocol (Urheber: WBCSD und WRI)
IRR	Internal Rate of Return (interne Rendite)
KPI	Key Performance Indicator (Leistungskennzahl)
KrWG	Kreislaufwirtschaftsgesetz (D)
kWp	Kilowattpeak
NPV	Net Present Value (Kapitalwert)
OpEx	Operational Expenditure (Betriebsausgaben)
PV	Photovoltaik
WBCSD	World Business Council for Sustainable Development
WEEE	Waste from Electrical and Electronic Equipment (EU-Richtlinie)
WFD	Waste Framework Directive, EU-Abfallrahmenrichtlinie (EU-Richtlinie)

# Bildverzeichnis

Seite	Bild
04	EnBW PV-Park in Weesow-Willmersdorf
12	EnBW PV-Park in Langenenslingen
16	PV-Park von Valeco in Frankreich
17	PV-Park von Valeco in Frankreich
18	EnBW PV-Park in Eggesin
22	EnBW PV-Park in Leutkirch
26	EnBW PV-Park in Haiterbach Unterschwandorf
29	EnBW PV-Park bei Bruchsal
30	EnBW PV-Park in Haiterbach Unterschwandorf
31	EnBW PV-Park in Haiterbach Unterschwandorf
34	EnBW PV-Park in Leutkirch
38	EnBW PV-Park in Haiterbach Unterschwandorf
39	EnBW PV-Park in Haiterbach Unterschwandorf

# Ansprechpersonen

## EnBW



**Dr. Lothar Rieth**  
Leiter Nachhaltigkeit  
EnBW  
l.rieth@enbw.com



**Vanessa Wickel**  
Managerin Nachhaltigkeit  
EnBW  
v.wickel@enbw.com



**Karen Neumann**  
Managerin Nachhaltigkeit  
EnBW  
ka.neumann@enbw.com

## Deloitte



**Dr. Matthias Schmidt**  
Partner Sustainability Assurance  
Deloitte  
mattschmidt@deloitte.de



**Dr. Jana Coenen**  
Managerin Sustainability Assurance  
Deloitte  
jcoenen@deloitte.de



**Malte Hager**  
Senior Consultant Sustainability Assurance  
Deloitte  
mhager@deloitte.de



## EnBW Energie Baden-Württemberg AG

Nachhaltigkeit  
nachhaltigkeit@enbw.com  
Durlacher Allee 93  
76131 Karlsruhe, Germany

Amtsgericht Mannheim · HRB Nr. 107956  
Vorsitzender des Aufsichtsrats: Lutz Feldmann  
Vorstand: Dr. Georg Stamatelopoulos (Vorsitzender), Thomas Kusterer (Stv. Vorsitzender), Dirk Güsewell, Peter Heydecker, Colette Rückert-Hennen

Mit rund 31.500 Mitarbeiter:innen ist die EnBW eines der größten Energieunternehmen in Deutschland und Europa. Sie versorgt rund 5,5 Millionen Kund:innen mit Energie und ist auf allen Wertschöpfungsstufen von der Erzeugung über den Handel bis hin zum Netzbetrieb und den Vertrieb von Strom, Wärme und Gas aktiv. Im Zuge der Neuausrichtung vom klassischen Energieversorger zum nachhaltigen Infrastrukturunternehmen sind der Ausbau der erneuerbaren Energien sowie der Verteil- und Transportnetze für Strom, Gas und Wasserstoff Eckpfeiler der EnBW-Wachstumsstrategie und Schwerpunkt der Investitionen. Bis 2030 plant die EnBW bis zu 50 Milliarden Euro zu investieren, rund 85 Prozent davon in Deutschland. Bis dahin soll rund 80 Prozent des EnBW-Erzeugungsportfolios aus erneuerbaren Energien bestehen, der Ausstieg aus der Kohle wird bis Ende 2028 angestrebt, sofern die Rahmenbedingungen es zulassen. Dies sind zentrale Meilensteine auf dem Weg zum Netto-Null-Ziel für die unternehmenseigenen Treibhausgasemissionen im Jahr 2040.



Deloitte bezieht sich auf Deloitte Touche Tohmatsu Limited (DTTL), ihr weltweites Netzwerk von Mitgliedsunternehmen und ihre verbundenen Unternehmen (zusammen die „Deloitte-Organisation“). DTTL (auch „Deloitte Global“ genannt) und jedes ihrer Mitgliedsunternehmen sowie ihre verbundenen Unternehmen sind rechtlich selbstständige und unabhängige Unternehmen, die sich gegenüber Dritten nicht gegenseitig verpflichten oder binden können. DTTL, jedes DTTL-Mitgliedsunternehmen und verbundene Unternehmen haften nur für ihre eigenen Handlungen und Unterlassungen und nicht für die der anderen. DTTL erbringt selbst keine Leistungen gegenüber Kunden. Weitere Informationen finden Sie unter [www.deloitte.com/de/UeberUns](http://www.deloitte.com/de/UeberUns).

Deloitte bietet führende Prüfungs- und Beratungsleistungen für nahezu 90% der Fortune Global 500®-Unternehmen und Tausende von privaten Unternehmen an. Rechtsberatung wird in Deutschland von Deloitte Legal erbracht. Unsere Mitarbeitenden liefern messbare und langfristig wirkende Ergebnisse, die dazu beitragen, das öffentliche Vertrauen in die Kapitalmärkte zu stärken, und unsere Kunden bei Wandel und Wachstum unterstützen. Deloitte baut auf eine über 180-jährige Geschichte auf und ist in mehr als 150 Ländern tätig. Erfahren Sie mehr darüber, wie die über 470.000 Mitarbeitenden von Deloitte zusammenarbeiten, um das Leitbild „making an impact that matters“ täglich zu leben: [www.deloitte.com/de](http://www.deloitte.com/de).

Diese Veröffentlichung enthält ausschließlich allgemeine Informationen, und weder die Deloitte GmbH Wirtschaftsprüfungsgesellschaft noch Deloitte Touche Tohmatsu Limited (DTTL), ihr weltweites Netzwerk von Mitgliedsunternehmen noch deren verbundene Unternehmen (zusammen die „Deloitte Organisation“) erbringen mit dieser Veröffentlichung eine professionelle Dienstleistung. Diese Veröffentlichung ist nicht geeignet, um geschäftliche oder finanzielle Entscheidungen zu treffen oder Handlungen vorzunehmen. Hierzu sollten Sie sich von einem qualifizierten Berater in Bezug auf den Einzelfall beraten lassen.

Es werden keine (ausdrücklichen oder stillschweigenden) Aussagen, Garantien oder Zusicherungen hinsichtlich der Richtigkeit oder Vollständigkeit der Informationen in dieser Veröffentlichung gemacht, und weder DTTL noch ihre Mitgliedsunternehmen, verbundene Unternehmen, Mitarbeitende oder Bevollmächtigte haften oder sind verantwortlich für Verluste oder Schäden jeglicher Art, die direkt oder indirekt im Zusammenhang mit Personen entstehen, die sich auf diese Veröffentlichung verlassen. DTTL und jedes ihrer Mitgliedsunternehmen sowie ihre verbundenen Unternehmen sind rechtlich selbstständige und unabhängige Unternehmen.

Stand 06/2026

