

Im Auftrag des:



Bundesministerium
für Umwelt, Klimaschutz, Naturschutz
und nukleare Sicherheit

VDI⁷
ZRE

VDI ZRE Publikationen: Kurzpapier Nr. 1

Kreislaufwirtschaft im Maschinen- und Anlagenbau



VDI ZRE Kurzpapier Nr. 1: Kreislaufwirtschaft im Maschinen- und Anlagenbau

Autor:

Vincent Leppak, VDI ZRE

Das Kurzpapier wurde im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Klimaschutz, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMUKN) erstellt.

Die Kurzpapiere des VDI ZRE geben einen Überblick über aktuelle Entwicklungen zu den Themen Ressourceneffizienz und Kreislaufwirtschaft in Forschung und industrieller Praxis. Sie enthalten eine Zusammenstellung relevanter Forschungsergebnisse, neuer Technologien und Prozesse sowie Gute-Praxis-Beispiele. Damit verschaffen die Kurzpapiere einem breiten Publikum aus Wirtschaft, Forschung und Verwaltung einen Einstieg in ausgewählte Themenfelder.

Redaktion:

VDI Technologiezentrum GmbH
VDI-Platz 1
40468 Düsseldorf

Tel. +49 30-27 59 506-505
zre-info@vdi.de
www.ressource-deutschland.de

Titelbild: © VDI ZRE

**VDI ZRE Publikationen:
Kurzpapier Nr. 1**

**Kreislaufwirtschaft im
Maschinen- und Anlagenbau**

INHALTSVERZEICHNIS

ABBILDUNGSVERZEICHNIS	4
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	5
1 EINLEITUNG	6
2 BRANCHENÜBERBLICK	7
2.1 Ökonomische Trends und Kennzahlen	7
2.2 Herausforderungen und Handlungsdruck in der Branche	8
2.2.1 Versorgungssicherheit bei Rohstoffen und Energie	8
2.2.2 Auswirkungen globaler Unsicherheiten auf die Branche	9
2.2.3 Bürokratische und regulatorische Anforderungen	10
2.2.4 Technologischer Wandel und Innovationsdruck	10
3 NEUE GESCHÄFTSMODELLE FÜR DEN MASCHINEN- UND ANLAGENBAU	12
3.1 Die R-Strategien als Leitprinzipien der Kreislaufwirtschaft	12
3.2 Produkt-Service-Systeme	14
3.2.1 Produktorientierte PSS – Erweiterte Angebote rund um das Produkt	14
3.2.2 Nutzungsorientierte PSS – Nutzung statt Besitz	15
3.2.3 Ergebnisorientierte PSS – Verkauf einer Leistung/eines Service statt eines Produkts	16
4 DER PRODUKTLEBENSZYKLUS IM ZIRKULÄREN MASCHINEN- UND ANLAGENBAU	18
4.1 Designprinzipien für die Kreislaufwirtschaft	18
4.2 Optimierung der Betriebsphase durch digitale Technologien	20
4.3 Strategien zur Lebensdauererlängerung und Werterhaltung	20
5 POLITISCHE TREIBER UND VORGABEN IM ÜBERBLICK	22
5.1 Ökodesign-Verordnung	22
6 HANDLUNGSEMPFEHLUNG	24
LITERATURVERZEICHNIS	25

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Die R-Strategien und ihr Zusammenwirken innerhalb eines zirkulären
Wirtschaftsansatzes

13

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

BMUKN	Bundesministerium für Umwelt, Klimaschutz, Naturschutz und nukleare Sicherheit
CAPEX	Capital Expenditures
CEAP	Circular Economy Action Plan
DPP	Digitaler Produktpass
ESPR	Ecodesign for Sustainable Products Regulation
IfM	Institut für Mittelstandsforschung
KI	Künstliche Intelligenz
KMU	Kleine und mittlere Unternehmen
NKWS	Nationale Kreislaufwirtschaftsstrategie
OPEX	Operational Expenditures
VDI	Verein Deutscher Ingenieure e. V.
VDI TZ	VDI Technologiezentrum GmbH
VDMA	Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau

1 EINLEITUNG

Die Kreislaufwirtschaft, im Sinne einer Circular Economy, ersetzt sukzessive das lineare Wirtschaftsmodell von Produktion, Nutzung und Entsorgung. Ihr Ziel ist es, Materialien und Produkte möglichst lange in Wertschöpfungskreisläufen zu halten. Bereits in der Produktentwicklung liegt der Schwerpunkt auf Aspekten wie Langlebigkeit, modular aufgebauten Komponenten, der Integration von Produkt-Service-Systemen sowie der Wiederverwendbarkeit im Sinne einer konsequenten Kreislaufführung.

Für den Maschinen- und Anlagenbau ist der Wandel hin zu einer Kreislaufwirtschaft von besonderer Bedeutung. Die Unternehmen der Branche nehmen dabei eine entscheidende Doppelrolle ein. Sie sind nicht nur Anwendende von Kreislaufstrategien in ihren eigenen Prozessen, sondern agieren gleichzeitig als zentrale Anbieter von Technologien, die es anderen Industriezweigen ermöglichen, zum einen die eigene Ressourceneffizienz zu steigern und zum anderen kreislauffähige Lösungen umzusetzen.

Die Branche steht jedoch vor erheblichen Herausforderungen: Ein großer internationaler Wettbewerbsdruck, hohe Energiekosten, eine angespannte geopolitische Lage, Zollkonflikte sowie kritische Abhängigkeiten bei strategischen Rohstoffen erfordern stetige Innovationen und effizientere Prozesse – und das entlang der gesamten Wertschöpfungskette. Ressourcenschonende Produktionsverfahren, eine effiziente Produktgestaltung ebenso wie innovative Geschäftsmodelle, wie zum Beispiel die Vermarktung des Nutzens anstelle der Maschine oder Anlage, können nicht nur die unternehmenseigene Wirtschaftlichkeit verbessern und somit die Wettbewerbsfähigkeit stärken, sondern erhöhen gleichermaßen die Resilienz gegenüber unvorhersehbaren äußeren Einflüssen.

Damit Deutschland als Wirtschaftsstandort seine technologische Vorreiterrolle sichern kann, ist es aus diesem Grund essenziell, dass Unternehmen jetzt die Initiative ergreifen. Der Schlüssel liegt dabei in der konsequenten Umstellung auf zirkuläre Geschäftsmodelle und der gezielten Förderung von Innovationen im eigenen Betrieb.

2 BRANCHENÜBERBLICK

Der Maschinen- und Anlagenbau bildet eine tragende Säule der deutschen Wirtschaft. Er gilt als Treiber für Innovationen und ist eng mit weiteren Wirtschaftszweigen verflochten. Gleichzeitig bestehen jedoch erhebliche Unterschiede je nach Branche.

Während sich für einige Unternehmen neue Chancen auftun – etwa in der Rüstungsindustrie, die zunehmend auch für mittelständische Maschinenbauunternehmen zum Zielmarkt wird¹, stehen andere vor teils existenziellen Hürden. Das betrifft insbesondere Zulieferunternehmen der Automobilindustrie, die massiv unter wegbrechenden Absatzmärkten leiden.²

Diese volatilen Marktbedingungen treffen auf eine Unternehmenslandschaft, die weiterhin stark mittelständisch geprägt ist. Von den über 6.600 Unternehmen entlang der gesamten Wertschöpfungskette zählen nahezu 90 % zum Mittelstand.³ Kleine und mittlere Unternehmen (KMU) spielen dabei eine entscheidende Rolle für Innovationen in Bezug auf Kreislaufwirtschaft. Ihre oft flexibleren Strukturen ermöglichen es ihnen häufig, agiler auf Marktveränderungen und spezifische Wünsche der eigenen Kundschaft zu reagieren als Großunternehmen. Im technologischen Bereich nutzen sie diese Agilität, um Entwicklungen gezielt für ihre Spezialgebiete anzupassen oder Nischeninnovationen voranzutreiben. Somit sind viele dieser KMU hochspezialisiert und

besetzen – dank ihrer Innovationstärke – wichtige Positionen in globalen Lieferketten.⁴

2.1 Ökonomische Trends und Kennzahlen

Der Maschinenbau erzielte 2023 einen Rekordumsatz in Höhe von 262,9 Milliarden Euro.⁵ Für das Jahr 2024 meldete die Branche zwar einen Branchenumsatz von 254,4 Milliarden Euro, was einem nominalen Rückgang von rund 3 % gegenüber dem Vorjahr entspricht⁶, der reale Produktionsrückgang fiel mit -6,9 % jedoch deutlich stärker aus. Politische und wirtschaftliche Unsicherheiten erschweren eine verlässliche Vorhersage der zukünftigen Entwicklung. Nach einer korrigierten Prognose wird ein zusätzlicher Produktionsrückgang um 5 % erwartet, da die Branche weiterhin mit globalen Herausforderungen wie Zollkonflikten und Investitionszurückhaltungen konfrontiert ist.⁷

Arbeitsmarkt und Qualifikation

Als einer der größten industriellen Arbeitgeber Deutschlands beschäftigt der Maschinenbau rund eine Million Menschen. Im Jahr 2024 waren etwa 952.000 Beschäftigte im deutschen Maschinenbau tätig – nach einem Anstieg im Vorjahr ist diese Zahl wieder leicht zurückgegangen.⁸ Die zukünftige Entwicklung der Beschäftigungszahlen hängt hier insbesondere stark vom jeweiligen Marktsegment ab. Die aktuellen Erwartungen der Unternehmen fallen verhalten aus: Nur 19 % planen einen Personalaufbau, während 26 % mit Stellenabbau

¹ Vgl. Fasse, M. (2025).

² Vgl. Stürzer, G. (2024).

³ Vgl. Germany Trade and Invest Gesellschaft für Außenwirtschaft und Standortmarketing mbH (2025).

⁴ Vgl. Visable GmbH (2023).

⁵ Vgl. VDMA (2025a).

⁶ Vgl. VDMA (2025a).

⁷ Vgl. Ciupek, M. (2025).

⁸ Vgl. Statista (2025).

rechnen. Viele Betriebe reagieren auf den anhaltenden Fachkräftemangel, indem sie freierwerdende Stellen nicht mehr nachbesetzen. Entsprechend gehen 46 % der Unternehmen von einem Rückgang der offenen Positionen aus.⁹

Der Großteil der Beschäftigten ist im Werkzeugmaschinenbau tätig, gefolgt von der Antriebstechnik und dem Bereich der Fördertechnik.¹⁰ Aktuell berichten weniger Unternehmen als in den vorangegangenen Jahren über einen akuten Fachkräftemangel, sodass auf eine sich verändernde Arbeitsmarktsituation geschlossen werden kann. Neue Qualifikationsprofile gewinnen an Bedeutung, insbesondere in den Bereichen der digitalen Transformation, künstlichen Intelligenz und datengetriebenen Fertigungsprozesse.¹¹

Exportentwicklung und internationaler Wettbewerb

Als eine der führenden Exportnationen für hochwertige Maschinen und Anlagen verzeichnete der deutsche Maschinenbau 2024 einen nominalen Exportrückgang von 5 % gegenüber dem Vorjahr.¹² Der Export von Maschinen und Anlagen erreichte einen Gesamtwert von 199,6 Milliarden Euro. Vor allem die schwache Nachfrage aus Europa (Rückgang von 8,5 %) und China (minus 4,5 %) belastete die Branche. Die USA bleiben mit einem Exportrückgang von 2,1 % weiterhin der wichtigste Einzelmarkt für Deutschland. Geopolitische Spannungen und Handelskonflikte wirken sich zunehmend negativ auf das Exportgeschäft aus. Für Unternehmen bedeutet das, die internationalen

Strategien anpassen und diversifizieren zu müssen, um Risiken zu minimieren und neue Absatzmärkte zu erschließen. Gleichzeitig verschärft sich der Wettbewerbsdruck durch aufstrebende Industrienationen, die massiv in technologische Entwicklungen und den Ausbau ihrer Produktionskapazitäten investieren.¹³

2.2 Herausforderungen und Handlungsdruck in der Branche

Der Maschinen- und Anlagenbau sieht sich gegenwärtig mit weitreichenden Herausforderungen konfrontiert, die sowohl wirtschaftliche, technologische als auch regulatorische Aspekte betreffen.

Mehr als ein Drittel der Unternehmen bewertet laut einer Umfrage aus dem Jahr 2024 die Geschäftslage als „schlecht“ oder „sehr schlecht“. Rund 80 % erwarten in nächster Zeit keine signifikante Verbesserung, während 20 % sogar von einer weiteren Verschlechterung der Lage ausgehen. Diese angespannte Situation ist auf eine Kombination aus globalen Unsicherheiten, steigenden Betriebskosten und sich wandelnden Marktbedingungen zurückzuführen. Besonders exportorientierte sowie energieintensive Unternehmen sind von diesen Entwicklungen betroffen. Zudem führen regulatorische Anpassungen zu neuen Anforderungen, die auch die strategische Ausrichtung vieler Betriebe maßgeblich beeinflussen.¹⁴

2.2.1 Versorgungssicherheit bei Rohstoffen und Energie

Die Auswirkungen der COVID-19-Pandemie haben die Anfälligkeit der Branche für

⁹ Vgl. VDMA (2025c).

¹⁰ Vgl. verlag moderne industrie GmbH (2025).

¹¹ Vgl. Meier Miles (2024).

¹² Vgl. Dietsche, F. (2025).

¹³ Vgl. Dietsche, F. (2025).

¹⁴ Vgl. Markt Pilot (2025).

Abhängigkeiten von globalen Lieferketten offengelegt. Eine aktuelle Untersuchung identifiziert mindestens neun kritische Rohstoffe – darunter Kobalt, Lithium, Graphit, Silizium und Seltene Erden, deren sichere und wirtschaftliche Bereitstellung für die Wettbewerbsfähigkeit der Industrie unerlässlich ist. Diese Rohstoffe sind auch im Maschinen- und Anlagenbau von zentraler Bedeutung, beispielsweise bei Hochleistungsmotoren, Sensorik und weiteren Schlüsseltechnologien, die auf Seltene Erden und andere kritische Rohstoffe angewiesen sind.¹⁵

Neben der Rohstoffversorgung stellt die Energiekostenentwicklung eine weitere Herausforderung für die Branche dar. Produktionsprozesse im Maschinenbau sind häufig energieintensiv, weshalb planbare und bezahlbare Energiepreise essenziell für den internationalen Wettbewerb sind. Die geopolitischen Entwicklungen haben strukturelle Schwächen im Energiesektor offengelegt und insbesondere in Deutschland eine Energiekrise ausgelöst. Die damit einhergehenden Unsicherheiten auf den Energiemärkten führten zu volatilen Preisen, die im internationalen Vergleich noch immer signifikante Wettbewerbsnachteile nach sich ziehen.¹⁶

Hohe Energiekosten wirken sich zudem hemmend auf Investitionen aus, insbesondere in den energieintensiven Zulieferbranchen wie der Metallverarbeitung, Chemieindustrie und Werkstofftechnik. Da diese Sektoren integraler Bestandteil der industriellen Wertschöpfungskette sind, resultieren aus den steigenden Energiepreisen auch erhöhte Rohstoffkosten,

die sich in weiterer Konsequenz in der gesamten Branche niederschlagen.

2.2.2 Auswirkungen globaler Unsicherheiten auf die Branche

Der internationale Handel unterliegt zunehmenden Spannungen, die sich negativ auf die Planbarkeit und den Marktzugang deutscher Maschinenbauunternehmen auswirken. Vor allem die geopolitischen Spannungen zwischen China und den USA sowie die damit einhergehenden protektionistischen politischen Maßnahmen erschweren den Zugang zu wichtigen Exportmärkten. Als Beispiel für diese Hürden führen die jüngsten US-Zölle zu gravierenden Risiken: Stand September 2025 sind etwa 30 % der EU-Maschinenlieferungen von einem Zoll in Höhe von 50 % auf den Metallanteil betroffen. Da die US-Behörden die zugrundeliegenden Produktlisten anpassen können, entsteht eine volatile Situation, die langfristige Geschäftsplanungen erschwert und als hohes Risiko für die Branche gilt.¹⁷

China und die USA zählen zu den bedeutendsten Absatzmärkten für deutsche Maschinenbauprodukte. Gleichzeitig setzen diese Länder gezielt wirtschaftspolitische Anreize, um ausländische Unternehmen zu einer verstärkten lokalen Wertschöpfung zu bewegen. Dies geschieht durch Investitionsvorteile, Steuererleichterungen und Subventionen für Produktionsstandorte vor Ort. Für deutsche Unternehmen stellt das eine zunehmende Herausforderung dar, da Exportmöglichkeiten eingeschränkt werden und höhere Markteintrittshürden bestehen.¹⁸

¹⁵ Vgl. Flach, L.; Teti, F.; Gourevich, I. und Grandum, L. (2022).

¹⁶ Vgl. Salcher, M. (2022).

¹⁷ Vgl. VDMA (2025d).

¹⁸ Vgl. Institut der deutschen Wirtschaft Köln e.V. (2021).

Ein weiteres Problem ergibt sich aus der globalen Inflation, die die Investitionsbereitschaft vieler Abnehmerindustrien dämpft. Insbesondere im Premiumsegment von Neumaschinen zeigt sich eine verstärkte Nachfrage nach kostengünstigeren Alternativen. Da der deutsche Maschinenbau traditionell durch technologische Exzellenz und Qualität geprägt ist, stellt dieser Wandel eine fundamentale Herausforderung dar, die innovative Anpassungsstrategien erfordert.¹⁹

2.2.3 Bürokratische und regulatorische Anforderungen

In der VDMA-Umfrage 2023 gaben 76 % der befragten Unternehmen an, dass die Bürokratiebelastung der dringendste zu verbessernde Standortfaktor sei. Weitere 21 % stuften die Belastung als „hoch“ ein und bezeichneten sie als wesentliches Hemmnis für Wettbewerbsfähigkeit und Wachstum.²⁰ Diese Einschätzungen verdeutlichen, dass bürokratische Anforderungen für viele Unternehmen des Maschinenbaus eine erhebliche Herausforderung darstellen.

Auch über die Branche hinaus ist der Aufwand zur Einhaltung gesetzlicher und regulatorischer Vorgaben beträchtlich. Nach Angaben des KfW-Mittelstandspanels entfallen im deutschen Mittelstand durchschnittlich 3,9 % der jährlichen Personalkosten auf Tätigkeiten, die mit der Erfüllung rechtlicher Vorschriften verbunden sind. Diese Belastungen binden sowohl personelle als auch finanzielle Ressourcen und schränken dadurch die Investitionsfähigkeit vieler Unternehmen ein. In der Folge kann ebenso die Innovationskraft der Betriebe

beeinträchtigt werden, was ihre Anpassungsfähigkeit in einem zunehmend dynamischen Marktumfeld reduziert.²¹

2.2.4 Technologischer Wandel und Innovationsdruck

Der Übergang zu einer Kreislaufwirtschaft im Maschinen- und Anlagenbau ist untrennbar mit dem technologischen Wandel verbunden. Die aktuellen Herausforderungen üben einen erheblichen Innovationsdruck auf die Unternehmen aus, der jedoch gleichzeitig essenzielle Werkzeuge für die Transformation bereitstellt. Insbesondere die Digitalisierung fungiert hier als Schlüsseltechnologie.

Einen zentralen Aspekt dieser Entwicklung stellt der stetig wachsende Softwareanteil in Maschinen und Anlagen dar. Moderne Maschinen sind längst keine reinen Hardwareprodukte mehr, sondern komplexe Systeme, in denen Software eine entscheidende Rolle spielt. Diese Verlagerung erfordert auch einen tiefgreifenden Wandel in den Unternehmen. Es werden neue Kompetenzen in den Bereichen Softwareentwicklung, Datenanalyse und Systemintegration benötigt. Die Identität der Unternehmen verschiebt sich von ausschließlichen Maschinenherstellern hin zu Anbietern integrierter Hard- und Software-Lösungen sowie digitaler Dienstleistungen.²²

Das Fundament, um zirkuläre Geschäftsmodelle zu etablieren, bildet derweil eine robuste und durchgängige Datenbasis. Ohne lebenszyklusübergreifende Daten – von der Konstruktion über die Nutzung und Wartung bis hin zur Demontage und Wiederverwertung – sind

¹⁹ Vgl. Roland Berger GmbH (2022).

²⁰ Vgl. VDMA (2023).

²¹ Vgl. VDMA (2023).

²² Vgl. VDMA (2025b).

eine effektive Optimierung und die Entwicklung neuer Dienstleistungen wie „Pay-per-Use“ oder vorausschauende Wartung (Predictive Maintenance) kaum bis gar nicht möglich. Daten bilden die Grundlage, um fundierte Entscheidungen zu treffen, Materialflüsse nachzuvollziehen, den Zustand von Komponenten zu bewerten und Potenziale für die Wiederverwendung oder das Recycling zu identifizieren.²³ Diese datengetriebene Ausrichtung stellt viele Unternehmen jedoch vor organisatorische Herausforderungen. Das häufig noch vorherrschende „Silo-Denken“ in einzelnen Abteilungen behindert den für die Kreislaufwirtschaft notwendigen abteilungsübergreifenden Informationsfluss.

Um erfolgreich zu sein, müssen diese Silos aufgebrochen werden. Es bedarf vernetzter Strukturen und einer Kultur der Zusammenarbeit, in der Daten als gemeinsames Gut verstanden und genutzt werden, um ganzheitliche, zirkuläre Wertschöpfungsketten zu schaffen.

Eine weitere technologische Dimension mit enormem Potenzial ist die künstliche Intelligenz (KI). Einerseits stellt der Einsatz von KI eine Herausforderung dar, da er qualitativ hochwertige Daten und spezifisches Fachwissen erfordert. Andererseits eröffnet KI immense Möglichkeiten für die Kreislaufwirtschaft und Effizienzsteigerung von Prozessen. So können KI-Algorithmen beispielsweise komplexe Materialflüsse optimieren, den idealen Zeitpunkt für Wartungsarbeiten vorhersagen oder durch den Einsatz von Bilderkennung die Sortenreinheit in Recyclingprozessen entscheidend verbessern.

Diese notwendige technologische und organisatorische Transformation erfordert jedoch erhebliche Investitionen und unternehmerische Agilität. Das sind genau die Ressourcen, die durch die zuvor beschriebenen Belastungen (hohe Betriebskosten, unsichere Märkte und eine als überlastend wahrgenommene Bürokratie) zunehmend gebunden werden.²⁴

²³ Vgl. VDMA (2025e).

²⁴ Vgl. Markt Pilot (2025).

3 NEUE GESCHÄFTSMODELLE FÜR DEN MASCHINEN- UND ANLAGENBAU

Der Maschinen- und Anlagenbau ist ein entscheidender Hebel für Material- und Energieflüsse – sowohl beim Bau der Maschinen als auch während ihres oft jahrzehntelangen Betriebs. Wachsende Anforderungen an Ressourcenschonung, Langlebigkeit und Klimaschutz erfordern daher ein Umdenken. Um den Übergang in eine zirkuläre Wirtschaft erfolgreich zu gestalten, müssen traditionelle, produktbasierte Geschäftsmodelle überdacht und gegebenenfalls durch neue Wertschöpfungsansätze ersetzt werden.

3.1 Die R-Strategien als Leitprinzipien der Kreislaufwirtschaft

Das Fundament der zirkulären Wertschöpfung bilden die sogenannten R-Strategien (Abbildung 1).²⁵ Sie definieren eine klare Hierarchie von Maßnahmen, um den Wert von Produkten und Materialien bestmöglich zu erhalten. Die Regel lautet: Je höher eine Strategie in der Hierarchie steht, desto größer ist das Potenzial, Ressourcen einzusparen. Die R-Strategien können grob in die drei Kategorien Vermeiden, Wiederverwenden sowie Recycling und sonstige Verwertung differenziert werden.

Vermeiden

Der entscheidende Hebel für die folgenden Vermeidungsstrategien liegt, wie in Kapitel 4 genauer beleuchtet werden wird, in der Design- und Entwicklungsphase eines Produkts.

- **R0 (Refuse/Ablehnen) & R1 (Rethink/ Überdenken):** Diese wirkungsvollsten Strategien hinterfragen die Notwendigkeit eines Produkts, ersetzen es durch ressourcenärmere Modelle oder implementieren neuer Geschäftsmodelle.
- **R2 (Reduce/Reduzieren):** Hierbei wird die Effizienz in der Herstellung und Nutzung von Produkten gesteigert, um den Einsatz von Primärrohstoffen und Energie von Beginn an zu minimieren.

Wiederverwenden

Diese Kategorie umfasst Maßnahmen, die die Lebensdauer bestehender Produkte und Komponenten verlängern. Im langlebigen und wertintensiven Maschinen- und Anlagenbau sind diese Strategien von zentraler Bedeutung.

- **R3 (Reuse/Wiederverwenden):** Eine komplette Maschine wird ohne wesentliche Veränderung für denselben Zweck weitergenutzt.
- **R4 (Repair/Reparieren):** Defekte Komponenten werden instandgesetzt, um die Funktion des Gesamtprodukts zu erhalten.
- **R5 (Refurbish/Aufarbeiten):** Gebrauchte Maschinen werden qualitativ hochwertig überholt und modernisiert.
- **R6 (Remanufacture/Wiederherstellen):** Ein Altprodukt wird industriell zu einem neuwertigen Produkt mit voller Gewährleistung wiederaufgebaut.
- **R7 (Repurpose/Umwidmen):** Eine Maschine oder Komponente wird für einen neuen Zweck eingesetzt.

²⁵ Vgl. Potting, J.; Hekkert, M.; Worrell, E.; Hanemaaijer, A. (2017) S. 5.

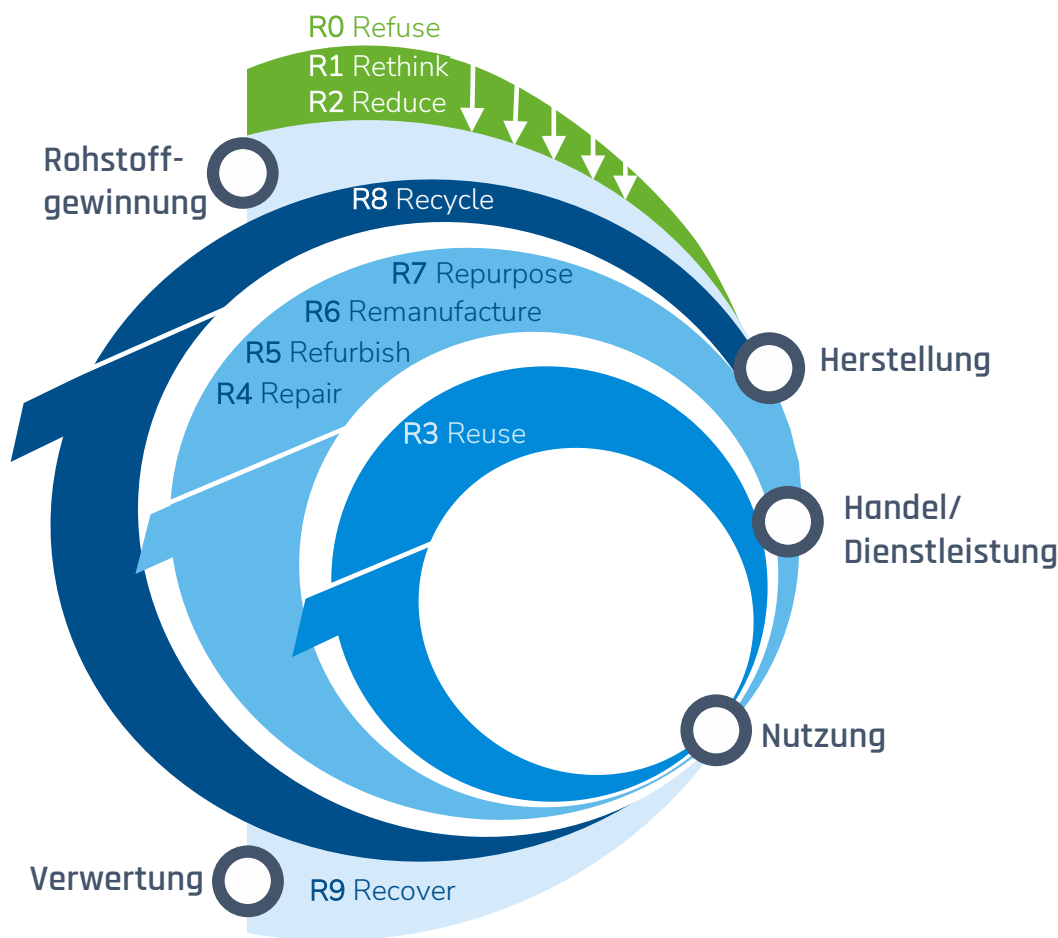
Recycling und sonstige Verwertung

Am Ende der Hierarchie stehen die Strategien, die zur Anwendung kommen, wenn eine Wiederverwendung des Produkts oder seiner Komponenten nicht mehr möglich ist.

- **R8 (Recycle/Recyclen):** Produkte werden in ihre stofflichen Bestandteile zerlegt, um die

Rohstoffe für neue Güter zurückzugewinnen. Dieser Vorgang ist oft mit Qualitätsverlusten verbunden.

- **R9 (Recover/Energierückgewinnung):** Als am wenigsten erstrebenswerte Option werden Materialien verbrannt, um zumindest ihren Energiegehalt zu nutzen.²⁶



- R0 – Refuse (Verzichten)
- R1 – Rethink (Überdenken)
- R2 – Reduce (Reduktion (durch Design))
- R3 – Reuse (Wiederverwendung)
- R4 – Repair (Reparatur)

- R5 – Refurbish (Instandsetzung/Aufarbeitung)
- R6 – Remanufacture (Wiederaufarbeitung)
- R7 – Repurpose (Umnutzung)
- R8 – Recycle (Recycling)
- R9 – Recovery (energetische Verwertung)

Abbildung 1: Die R-Strategien und ihr Zusammenwirken innerhalb eines zirkulären Wirtschaftsansatzes²⁷

²⁶ Vgl. RWTH Aachen (2025).

²⁷ Eigene Darstellung auf Basis von Potting et al. (2017).

3.2 Produkt-Service-Systeme

Die beschriebenen R-Strategien bilden das theoretische Gerüst einer zirkulären Wirtschaft. Um diese Prinzipien jedoch in der Praxis erfolgreich und wirtschaftlich tragfähig umzusetzen, ist in vielen Fällen eine grundlegende Neuausrichtung der etablierten Geschäftsmodelle erforderlich.

Hier können Produkt-Service-Systeme (PSS) ansetzen. PSS kombinieren physische Produkte mit gezielten Dienstleistungen und schaffen so die Grundlage für ressourceneffiziente und zielgruppenorientierte zirkuläre Geschäftsmodelle. Statt Maschinen nur zu verkaufen, werden sie durch Leistungen wie Wartung, Verfügbarkeitsgarantien oder Performance-Verträge langfristig im Lebenszyklus begleitet. Dies schafft nicht nur Anreize auf Seiten der Produzierenden, Produkte langlebiger zu gestalten, sondern erschließt auch neue Einnahmequellen und stärkt die Bindung zwischen Kundschaft und herstellendem Unternehmen.

PSS lassen sich in drei grundlegende Typen unterteilen:

- (1) **Produktorientierte Systeme:** Das Produkt steht im Mittelpunkt, Dienstleistungen werden ergänzend herangezogen.
- (2) **Nutzungsorientierte Systeme:** Das Produkt bleibt im Besitz des Anbieters, die Nutzung wird verkauft.
- (3) **Ergebnisorientierte Systeme:** Verkauft wird ein bestimmtes Ergebnis oder eine Funktion, nicht mehr das Produkt selbst.

Diese Differenzierung hilft, passende Geschäftsmodelle entlang des Produktlebenszyklus zu identifizieren und strategisch einzuordnen.²⁸

3.2.1 Produktorientierte PSS – Erweiterte Angebote rund um das Produkt

Bei produktorientierten PSS steht das physische Produkt weiterhin im Zentrum des Geschäfts. Der Verkauf wird von Dienstleistungen wie Instandhaltung, Ersatzteilmanagement, Beratung oder Schulung begleitet.

Diese Modelle sind im Maschinen- und Anlagenbau weit verbreitet und stellen oft den Einstieg in serviceorientierte Geschäftsmodelle dar. Das Produkt geht dabei nach dem Erwerb in das Eigentum der Kundschaft über, während diese ergänzend begleitende Leistungen von Seiten des herstellenden Unternehmens angeboten bekommt.²⁹

Typische Beispiele:

- Wartungsverträge für Produktionsanlagen
- Ersatzteil- und Verschleißteilservices
- Fernüberwachung und Zustandsdiagnostik (Condition Monitoring)
- Retrofit-Angebote zur Modernisierung bestehender Maschinen

²⁸ Vgl. Tukker, A. (2004), S. 248.

²⁹ Vgl. Tukker, A. (2015), S.246 ff.

Praxisbeispiel: Die Modernisierung von Werkzeugmaschinen als Strategie der Kreislaufwirtschaft

Eine wirkungsvolle Strategie in diesem Bereich ist das sogenannte Retrofit. Hierbei wird das Potenzial bestehender Maschinen durch eine gezielte Modernisierung reaktiviert.

So ging auch die Rottler Maschinenbau GmbH für die eigene Kundschaft vor: Anstatt eine große Werkzeugmaschine komplett zu ersetzen, wurde der massive und wertvolle mechanische Grundkörper erhalten, wodurch der hohe Ressourcen- und Energieaufwand einer Neufertigung vermieden werden konnte. Die Modernisierung umfasste die komplette Erneuerung der elektrischen Ausrüstung, eine moderne CNC-Steuerung, neue digitale Antriebe und energieeffiziente Motoren. Für den Eigentümer entstand so eine Anlage, die hinsichtlich Produktivität und Präzision einer Neumaschine gleicht und dabei deutlich energieeffizienter arbeitet als die ursprüngliche Anlage

Diese Lösung führte zum einen zur Reduktion der Investitionskosten auf einen Bruchteil des Neanschaffungspreises und verlängerte zum anderen die Lebensdauer einer wertvollen Anlage um viele weitere Jahre.³⁰

3.2.2 Nutzungsorientierte PSS - Nutzung statt Besitz

In nutzungsorientierten PSS verbleibt das Produkt, anders als bei produktorientierten PSS, im Eigentum des herstellenden Unternehmens. Die Kundschaft zahlt ausschließlich für die Nutzung der Maschinen oder Anlagen, beispielsweise via Leasing, Pay-per-Use oder über Sharing-Modelle.

Da die Funktionsverantwortung beim Anbieter liegt und dieser zugleich Eigentümer der eingesetzten Rohstoffe bleibt, entsteht ein massiver Anreiz für langlebige Designs und eine systematische Rückführung der Komponenten am Ende des Lebenszyklus.³¹

Typische Beispiele:

- Maschinenleasing inkl. Wartung
- Nutzungsbasierte Abrechnungen (z. B. pro Betriebsstunde)
- Anlagenpools für mehrere Nutzende
- Plattformmodelle für Maschinenverleih

³⁰ Vgl. Rottler, P. (2025).

³¹ Vgl. Tukker, A. und Tischner, U. (2006), S. 32 ff.

Praxisbeispiel: Vom Produktverkäufer zum strategischen Partner

Das Werkzeugmaschinen-Unternehmen Heller verdeutlicht mit dem hauseigenen Modell „HELLER4Use“ den Wandel vom Produktverkäufer hin zum strategischen Partner.

Die Kundschaft von Heller erwirbt nun nicht mehr die Maschine selbst, sondern zahlt lediglich für deren produktiven Einsatz, zum Beispiel in Form von „Spindelstunden“. Dieses Vorgehen wandelt hohe Investitionsausgaben (CAPEX) in flexible Betriebskosten (OPEX) um und beinhaltet ein Servicepaket, das die Wartung und eine definierte technische Verfügbarkeit garantiert.

Heller agiert nicht mehr nur als einmaliges Zulieferunternehmen, sondern etabliert sich als langfristiger strategischer Partner. Für das Unternehmen bedeutet das eine Abkehr von schwankenden Verkaufserlösen hin zu stabilen, wiederkehrenden Umsätzen, die eine verlässliche Zukunftsplanung ermöglichen.

Da das Unternehmen zudem Eigentümer der Maschine bleibt, behält es die volle Kontrolle über den gesamten Lebenszyklus. Das ermöglicht eine geplante Rückführung, eine professionelle Wiederaufbereitung und die anschließende Wiedervermarktung der Anlage, wodurch der Kreislauf geschlossen und der Wert der Maschine langfristig gesichert wird.³²

3.2.3 Ergebnisorientierte PSS - Verkauf einer Leistung/eines Service statt eines Produkts

Ergebnisorientierte Systeme stellen die radikalste Form der PSS dar. Die Kundschaft kauft in diesem Fall weder das Produkt noch dessen Nutzung, sondern ein vertraglich vereinbartes Ergebnis. Im Maschinenbau könnte das beispielsweise statt einer Pumpe als Produkt selbst eine festgelegte, garantierte Förderleistung ebendieser Pumpe sein.

Die gesamte Verantwortung für den Betrieb, die Effizienz und Instandhaltung liegt beim anbietenden Unternehmen.³³

Typische Beispiele:

- „Compressed Air as a Service“ (z. B. bei Druckluftsystemen)
- Stückkostenmodelle in der Fertigung („Pay-per-Part“)
- Verfügbarkeitsgarantien von Anlagen im Bereich Produktion oder Energieversorgung

³² Vgl. Gebr. Heller Maschinenfabrik GmbH (2022).

³³ Vgl. Tukker, A. und Tischner, U. (2006), S.32 ff.

Praxisbeispiel: Ergebnisse kaufen, statt Anlagen zu besitzen

Ein Beispiel ist das Betriebsmodell von Kaeser Kompressoren.

Die Kundschaft kauft keine Druckluftanlage, sondern schließt einen Vertrag über die Lieferung von Druckluft in einer definierten Menge und Qualität. Kaeser analysiert den Bedarf, errichtet vor Ort eine maßgeschneiderte Druckluftstation und übernimmt die volle Verantwortung für deren Betrieb, Wartung und Effizienz. Da Kaeser die kompletten Service- und Instandhaltungskosten trägt und für die Gesamteffizienz der Station geradesteht, hat das Unternehmen den größtmöglichen Anreiz, die Anlage maximal langlebig und energieeffizient zu gestalten. Für die Kundschaft bedeutet das höchste Versorgungssicherheit bei voller Kostenkontrolle, ohne dabei selbst hohe Summen in Anlagen investieren zu müssen.

Gleichzeitig stellt der Anbieter und Hersteller sicher, dass alle Komponenten professionell gewartet und am Ende ihres Lebenszyklus wieder dem Wertstoffkreislauf zugeführt werden.³⁴

³⁴ Vgl. Kaeser Kompressoren. (2022).

4 DER PRODUKTLEBENSZYKLUS IM ZIRKULÄREN MASCHINEN- UND ANLAGENBAU

Damit zirkuläre Geschäftsmodelle im Maschinen- und Anlagenbau ihr volles Potenzial entfalten können, müssen auch die Produkte selbst entsprechend gestaltet sein. Die Produktentwicklung wird somit zum entscheidenden Hebel für eine funktionierende Kreislaufwirtschaft.

Gerade im Maschinen- und Anlagenbau, wo Produkte oft über Jahrzehnte im Einsatz sind und eine hohe Kapitalbindung verursachen, zahlt sich eine frühzeitige Berücksichtigung zirkulärer Prinzipien ökologisch wie ökonomisch aus. Dabei geht es nicht nur um die Verlängerung von Lebenszyklen, sondern auch um die Vereinfachung der Wartung, Rückführung und Wiederverwendung.

4.1 Designprinzipien für die Kreislaufwirtschaft

Die folgenden Gestaltungsprinzipien helfen dabei, Produkte so zu entwickeln, dass sie zirkuläre Geschäftsmodelle ermöglichen und fördern:

Materialien: Der Fokus liegt auf dem Einsatz recycelbarer Materialien, um den Bedarf an Primärrohstoffen zu senken. Ebenso wichtig ist die Auswahl langlebiger, schadstoffarmer und möglichst sortenreiner Werkstoffe, durch die eine spätere Wiederverwertung vereinfacht und die Umweltbelastung minimiert wird.³⁵

Produktkennzeichnung: Alle relevanten Bauteile und Materialien sollten klar gekennzeichnet werden, um Reparaturen und ein sortenreines Recycling zu ermöglichen. Technologien wie der Digitale Produktpass (DPP) stellen dabei sicher, dass Informationen zu Werkstoffen und zur Demontage über den gesamten Lebenszyklus verfügbar bleiben.³⁶

Modularität: Ein modularer Aufbau aus austauschbaren Baugruppen ist entscheidend, um die Lebensdauer von Maschinen zu erhöhen. So können technologisch veraltete Komponenten gezielt modernisiert werden, ohne die gesamte Anlage ersetzen zu müssen.

Standardisierung: Die Verwendung von einheitlichen Bauteilen und Schnittstellen vereinfacht den Umgang mit der Maschine über ihre gesamte Lebensdauer. Durch die Standardisierung von Komponenten wird die Ersatzteilbeschaffung erleichtert und die Kompatibilität zwischen verschiedenen Systemen sichergestellt.

Demontagegerecht: Maschinen werden so konstruiert, dass sie am Ende ihres Lebenszyklus einfach und idealerweise zerstörungsfrei zerlegt werden können. Bevorzugt werden dafür lösbare Verbindungen und eine zugängliche Anordnung der Bauteile, um die Rückgewinnung wertvoller Komponenten und Materialien zu maximieren.³⁷

Nutzungsgerecht: Das Maschinendesign wird gezielt auf das jeweilige Geschäftsmodell und die vorgesehene Nutzungsintensität abgestimmt. Im Fokus stehen dabei eine robuste Auslegung, eine hohe Energieeffizienz zur

³⁵ Vgl. Göbel, I. (2025).

³⁶ Vgl. Bachmann, Y. (2025).

³⁷ Vgl. Kirchner, J.-S. und Prumbohm, M. (2015), S. 2 ff.

Senkung der Betriebskosten und einfache Wartungszugänglichkeit, um den Wert der Maschine im Einsatz zu maximieren.³⁸

Wie die Gestaltungsprinzipien erfolgreich umgesetzt werden können, zeigt das Beispiel des Pumpenherstellers Wilo aus Dortmund.

Praxisbeispiel: Produktentwicklung als Basis der Kreislaufwirtschaft

Der Pumpenhersteller Wilo aus Dortmund verankert die Kreislauffähigkeit der eigenen Produkte bereits in der Entwicklung. Da die Pumpen für eine Lebensdauer von bis zu 20 Jahren ausgelegt sind, wird die Schließung der Materialkreisläufe bereits bei der Produktkonzeption mitgedacht.

Ein etabliertes Rücknahmesystem für Partner-Fachbetriebe bildet dafür die Basis. Das Installationsfachpersonal sammelt alle Altpumpen – unabhängig von Hersteller oder Zustand – und führt so jährlich rund 100 Tonnen Material in das unternehmenseigene Recyclingcenter zurück. Dort zahlt sich das vorausschauende Design aus: Die Pumpen sind so konstruiert, dass sie effizient zerlegt werden können. Neuwertige Komponenten aus Garantiefällen werden geprüft und direkt in der Fertigung wiederverwendet. Ältere Geräte werden demontiert und die Materialien sortenrein getrennt. Hieraus entstehen dem Unternehmen zusätzlich jährliche Erlöse.

Ein besonderes Augenmerk liegt zudem auf der Rückgewinnung kritischer Rohstoffe. Dank des demontagegerechten Designs können beispielsweise wertvolle Neodym-Magnete aus den Elektromotoren zerstörungsfrei ausgebaut werden. Je nach Zustand werden sie direkt wiederverwendet oder zu neuen Magneten aufbereitet. Dieser Prozess reduziert nicht nur Kosten, sondern auch die strategische Abhängigkeit von externen Zulieferunternehmen.

Das Beispiel Wilo belegt, dass eine auf das Lebensende ausgerichtete Produktentwicklung im Maschinenbau technisch machbar ist und vielfältige Vorteile bringt: Durch die konsequente Umsetzung von Designprinzipien wie der Modularität, der Kennzeichnung und einfachen Demontage schließt das Unternehmen erfolgreich Materialkreisläufe und schafft so zugleich einen ökologischen und ökonomischen Mehrwert.³⁹

Mit der Fertigstellung einer Maschine verlagert sich der Fokus von der Entwicklung auf den realen Lebenszyklus. Nun zählt vor allem ein maximal effizienter Betrieb – sowohl bei Verbrauch von Energie als auch im Hinblick auf andere Ressourcen.

Die Strategien am Ende der Nutzungsdauer entscheiden folglich darüber, wie erfolgreich der materielle Wert im Kreislauf gehalten

werden kann. Die notwendige Brücke zwischen der effizienten Nutzung und der späteren Wiederverwendung schlägt dabei die Digitalisierung: Sie macht den „Gesundheitszustand“ der Maschine transparent.

Durch die kontinuierliche Erfassung von Betriebsdaten wird dokumentiert, welche Bauteile noch funktionsfähig sind, direkt wiederverwendet werden können und welche stofflich

³⁸ Vgl. Kirchner, J.-S. und Prumbohm, M. (2015), S. 2 ff.

³⁹ Vgl. VDI ZRE (2025).

verwertet werden müssen. Zudem stellt sie Informationen über die verbauten Materialien bereit, wodurch der Recyclingprozess planbar und effizient wird.

4.2 Optimierung der Betriebsphase durch digitale Technologien

Die Digitalisierung ist der Schlüssel zur aktiven Steuerung der Nutzungsphase. Im Zentrum steht hier oft der Digitale Zwilling, ein virtuelles Abbild der physischen Maschine, das kontinuierlich mit realen Betriebsdaten gespeist wird. Dieser ermöglicht nicht nur die Simulation und Optimierung von Prozessen, sondern schafft auch eine transparente Datengrundlage für neue Services und eine tiefere Integration der Kundschaft.

Für Partner in der Lieferkette wird ein Unternehmen so zu einem verlässlichen Garanten für Performance, da Zustände und Potenziale der Maschine jederzeit nachvollziehbar sind.⁴⁰

Auf dieser digitalen Basis lassen sich verschiedene hocheffiziente Betriebsstrategien umsetzen. Beispielhaft hierfür sind:

- **Vorausschauende Instandhaltung (Predictive Maintenance):** Anstatt auf Ausfälle zu reagieren, wird die Wartung proaktiv. Integrierte Sensorik erfasst Zustandsdaten, KI-Analysen erkennen Verschleißmuster und prognostizieren Ausfälle, bevor sie geschehen. So werden Wartungseinsätze bedarfsgerecht geplant, was Stillstände minimiert und die Lebensdauer von Komponenten maximiert.⁴¹

- **Effiziente Reparatur und Modernisierung:** Tritt dennoch ein Defekt auf, ermöglichen digitale Daten eine schnelle Ferndiagnose und effiziente Reparatur. Zudem können Maschinen durch Software-Updates oder den modularen Austausch von Komponenten technologisch auf dem neusten Stand gehalten werden. Die Unternehmen können diese Upgrades proaktiv anbieten, um die Performance zu gewährleisten und die Nutzungsdauer der Maschine zu verlängern.⁴²

4.3 Strategien zur Lebensdauererlängerung und Werterhaltung

Die in der Produktentwicklung und Betriebsphase gesammelten Daten sind nun entscheidend, um den Zustand von Komponenten exakt zu bewerten und die optimale Strategie für den Werterhalt zu wählen. Erreicht eine Maschine das Ende ihrer Nutzungsphase, zielen zirkuläre Strategien darauf ab, den in ihr gebundenen Wert bestmöglich zu erhalten.

- **Refurbishment** bezeichnet im Maschinen- und Anlagenbau die Wiederaufbereitung gebrauchter Komponenten oder Systeme, meist durch Reinigung, Reparatur und Austausch einzelner Bauteile. Ziel ist die Wiederherstellung der Funktionalität, jedoch nicht zwingend der Neuzustand. Dies verlängert die Nutzungsdauer und reduziert den Ressourcenverbrauch bei geringerem Aufwand.⁴³
- **Remanufacturing** geht einen Schritt weiter. Hier werden Maschinen vollständig demontiert, alle Teile geprüft, verschlissene Komponenten ersetzt und das System gemäß der

⁴⁰ Vgl. Pfeiffer, B.-M.; Bozek, E.; Oppelt, M. und Kempf, J. (2020).

⁴¹ Vgl. Pfeiffer, B.-M.; Bozek, E.; Oppelt, M. und Kempf, J. (2020).

⁴² Vgl. Pfeiffer, B.-M.; Bozek, E.; Oppelt, M. und Kempf, J. (2020).

⁴³ Vgl. Bungard, P. (2018), S. 131.

Spezifikation neu aufgebaut. Das Ergebnis entspricht einem neuwertigen Produkt. Dieser Ansatz erhöht die Produktlebensdauer signifikant, spart Material und Energie und ermöglicht Qualitätsgarantien.⁴⁴

Diese werterhaltenden Strategien entfalten ihr volles Potenzial nur, wenn sie von Anfang an in die Produktentwicklung integriert werden.

Gleichzeitig schaffen zirkuläre Geschäftsmodelle die wirtschaftlichen Anreize, um Langlebigkeit und Service-Lösungen profitabel zu machen. So bietet der Maschinen- und Anlagenbau sukzessive ganzheitliche Lifecycle-Lösungen, bei denen Entwicklung, Betrieb und Rücknahme als ein zusammenhängendes System verstanden und optimiert werden.

⁴⁴ Vgl. Bungard, P. (2018), S. 131.

5 POLITISCHE TREIBER UND VORGABEN IM ÜBERBLICK

Die Entwicklung einer Kreislaufwirtschaft hängt nicht nur von technologischen Innovationen und wirtschaftlichen Anreizen ab, sondern wird maßgeblich durch politische und regulatorische Rahmenbedingungen geprägt. Internationale und nationale Strategien setzen Impulse, schaffen verbindliche Vorgaben und unterstützen Unternehmen bei der Transformation. Eine zunehmende Transparenz durch Berichtspflichten lenkt zudem Finanzströme gezielter in nachhaltige Geschäftsmodelle.

Im Rahmen des European Green Deals wurde 2020 der Circular Economy Action Plan (CEAP) veröffentlicht, der Europas Rohstoffabhängigkeit adressiert und Materialkreisläufe stärken soll. Darauf basierend hat Deutschland die 2024 vorgelegte Nationale Kreislaufwirtschaftsstrategie (NKWS) verabschiedet. Kernziele der NKWS sind unter anderem:

- eine Halbierung des Primärrohstoffverbrauchs pro Kopf bis 2045,
- die Deckung von 25 % des Bedarfs strategischer Rohstoffe aus Recycling bis 2030 sowie
- eine Reduktion des Abfallaufkommens um 20 % pro Kopf bis 2040.⁴⁵

5.1 Ökodesign-Verordnung

Da etwa 80 % der Umweltauswirkungen eines Produkts bereits im Zuge des Designs festgelegt werden, ist die neue Verordnung (EU) 2024/1781 (Ecodesign for Sustainable

Products Regulation – ESPR) der zentrale rechtliche Hebel für den Binnenmarkt.⁴⁶

Während die bisherige Richtlinie vor allem die Energieeffizienz energieverbrauchsrelevanter Produkte in den Mittelpunkt stellte, erweitert die neue Verordnung den Fokus deutlich: Sie schreibt nun umfassende ökologische Anforderungen für nahezu alle Produktgruppen vor.

Damit können künftig produktspezifische Vorgaben festgelegt werden, die insbesondere auf eine höhere Lebensdauer, eine leichtere Instandhaltung sowie eine verbesserte Wieder- und Weiterverwertung abzielen. Für den Maschinen- und Anlagenbau ergeben sich daraus mehrere besonders relevante Handlungsfelder:⁴⁷

- **Verlängerung der Nutzungsdauer:** Ein Schwerpunkt liegt auf der Reparierbarkeit, die durch konstruktive Maßnahmen, die Verfügbarkeit von Ersatzteilen und Reparaturinformationen verbessert werden soll. Eng damit verbunden ist die Upgradefähigkeit, die es ermöglicht, langlebige Maschinen durch Software-Updates oder modularen Austausch technologisch aktuell zu halten und so ihre Lebensdauer weiter zu verlängern.⁴⁸
- **Materialkreisläufe schließen:** Durch die Verordnung können Vorgaben zur Recyclingfähigkeit realisiert werden, wodurch beispielsweise Materialauswahl, angewendete Verbindungstechniken und die sortenreine Trennbarkeit am Lebensende beeinflusst werden. Zudem soll mithilfe von Mindestquoten der Einsatz von Rezyklaten in neuen Produkten gefördert werden. Dieser Schritt

⁴⁵ Vgl. BMUV (2024) S. 3 ff.

⁴⁶ Vgl. Ehrlenspiel, K.; Kiewert, A.; Lindemann, U. und Mörtl, M. (2020), S. 15.

⁴⁷ Vgl. European Union (2024).

⁴⁸ Vgl. BMUV (2024) S. 6.

erfordert von Unternehmen die Identifizierung und Validierung geeigneter Sekundärrohstoffe.⁴⁹

- **Transparenz durch den Digitalen Produktpass (DPP):** Als zentrales Instrument dient der Digitale Produktpass (DPP). Er soll Zugang zu relevanten Informationen über den gesamten Lebenszyklus bieten, die digital mit dem Produkt verknüpft sind – von der Materialzusammensetzung über Reparaturanleitungen und den Rezyklatanteil bis hin zum ökologischen Fußabdruck.

Die Einführung erfolgt stufenweise: Zwar können DPP ab 2027 grundsätzlich für nahezu alle physischen Produkte auf dem EU-Markt eingeführt werden, die tatsächliche Umsetzung entscheidet die Europäische Kommission jedoch schrittweise. Die Pflicht zur Datenbereitstel-

lung gilt ab 2027 zunächst verbindlich für Batterien. Die Kommission plant, innerhalb von fünf Jahren die Details für lediglich sechs Produktkategorien in sog. delegierten Rechtsakten festzulegen. Dabei wird auch definiert, ob die Informationen auf Produkt-, Modell- oder Articlebene bereitgestellt werden müssen. Für Herstell- und Importunternehmen dieser Güter wird die systematische Datenerfassung und -verwaltung ab Inkrafttreten der jeweiligen Rechtsakte verbindlich.⁵⁰

Andere Aspekte wie generelle Haltbarkeit, Zuverlässigkeit, Wiederverwendbarkeit, die Beschränkung problematischer Stoffe sowie die allgemeine Rohstoff- und Energieeffizienz sind ebenfalls Teil der ESPR, werden aber oft durch die Kernanforderungen mit beeinflusst und über den DPP transparent gemacht.

⁴⁹ Vgl. BMUV (2024) S. 26.

⁵⁰ Vgl. Denter, L. und Grad, J. (2025) S. 11.

6 HANDLUNGSEMPFEHLUNG

Die voranschreitende Transformation der Wirtschafts- und Industrielandschaft stellt viele kleine und mittlere Unternehmen im Maschinen- und Anlagenbau vor tiefgreifende Herausforderungen. Veränderte internationale Rahmenbedingungen wie Energiekrisen, unsichere Rohstoffverfügbarkeiten oder Zollkonflikte erschweren die Planungssicherheit und verschärfen die wirtschaftliche Situation spürbar. Gleichzeitig führen technologische Umbrüche in wichtigen Abnehmerbranchen zu Veränderungen in den Wertschöpfungsketten, die ein hohes Maß an Anpassungsfähigkeit erfordern. Da diese externen Faktoren kaum beeinflussbar sind, gilt es, Strategien zu entwickeln, die auf Ressourceneffizienz und Kreislauffähigkeit ausgerichtet sind.

Zentral ist dabei die konsequente Integration von Prinzipien des Ökodesigns, die nicht nur ökologische Vorteile mit sich bringt, sondern auch wirtschaftliche Potenziale freisetzt. Aspekte wie Langlebigkeit, Reparierbarkeit sowie die gezielte Aufrüst- und Erweiterbarkeit der Anlagen sind keine Nebenaspekte mehr, sondern werden zu entscheidenden Faktoren für die Wettbewerbsfähigkeit und Zukunftsfähigkeit der Investitionsgüter. Damit der Wandel gelingt, braucht es daher auf Unternehmensebene klare strategische Weichenstellungen:

- Frühzeitige Investitionen in die Digitalisierung, Automatisierung und moderne Fertigungstechnologien sind essenziell, um Produktionsprozesse effizienter, flexibler und transparenter zu gestalten. Digitale Tools ermöglichen eine präzisere Steuerung von Materialflüssen und bieten die Grundlage für zirkuläre Geschäftsmodelle.
- Ein kreislauforientiertes Design von Maschinen und Anlagen muss bereits in der Konstruktionsphase verankert werden. Diese Investitionsgüter sollten modular aufgebaut, sortenrein trennbar und leicht reparierbar gestaltet sein, um eine effiziente Instandhaltung und spätere Wiederverwertung zu ermöglichen.
- Die Abkehr von linearen Verkaufskonzepten erfordert Innovationen und neue Geschäftsmodelle, sodass Nutzungssysteme, Produkt-as-a-Service-Modelle und modulare Erweiterungsoptionen zunehmend an Bedeutung gewinnen. Sie fördern nicht nur eine ökologische Produktnutzung, sondern eröffnen auch neue Einnahmequellen.
- Für den Erfolg im Sinne der Kreislaufwirtschaft ist eine enge und verlässliche Zusammenarbeit entlang der gesamten Wertschöpfungskette entscheidend. Das umfasst die Kooperation mit Zulieferbetrieben und ebenso die Abstimmung mit Partnern über den gesamten Produktlebenszyklus hinweg. Ziel ist es, durch abgestimmte Prozesse und gemeinsame Standards sicherzustellen, dass Rohstoffe und Komponenten nach ihrer Nutzungsphase effizient zurückgeführt, demontiert und für eine Wiederverwendung aufbereitet werden können.
- Kreislaufwirtschaft ist kein Nischenthema mehr, sondern ein strategisches Zukunftsfeld. Unternehmen, die sich frühzeitig anpassen, leisten nicht nur einen Beitrag zur Erreichung nationaler und europäischer Nachhaltigkeitsziele, sondern sichern sich auch wichtige Wettbewerbsvorteile. Sie tragen somit aktiv zur Zukunftsfähigkeit des Industriestandorts Deutschland bei – technologisch, ökologisch und wirtschaftlich.

LITERATURVERZEICHNIS

Bachmann, Y. (2025): Digitaler Produktpass (DPP) – Alles, was du wissen musst [online] [abgerufen am: 21.11.2025], verfügbar unter: <https://www.haendlerbund.de/de/ratgeber/recht/digitaler-produkt-pass-dpp>

BMUV (2024): Die Nationale Kreislaufwirtschaftsstrategie. Das Wichtigste in Kürze – Warum braucht Deutschland eine Nationale Kreislaufwirtschaftsstrategie?, BMUV Informationspapier [abgerufen am: 27.03.2025], verfügbar unter: https://www.kreislaufwirtschaft-deutschland.de/fileadmin/user_upload/Mediathek/NKWS/nationale_kreislaufwirtschaftsstrategie_info.pdf

Bungard, P., Hg. (2018): CSR und Geschäftsmodelle, Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg, Management-Reihe Corporate Social Responsibility, ISBN 978-3-662-52881-5.

Ciupek, M. (2025): Deutscher Maschinenbau schlägt Alarm [online] [abgerufen am: 05.11.2025], verfügbar unter: <https://www.ingenieur.de/technik/fachbereiche/automation/deutscher-maschinenbau-schlaegt-alarm/>

Denter, L. und Grad, J. (2025): Positionspapier: Der Digitale Produktpass für KKMU in der Kreislaufwirtschaft [online] [abgerufen am: 05.12.2025], verfügbar unter: https://www.german-watch.org/sites/default/files/2025-11/Germanwatch_Der%20Digitale%20Produktpass%20f%C3%BCr%20KKMU%20in%20der%20Kreislaufwirtschaft.pdf

Dietsche, F. (2025): Deutsche Maschinenbauexporte 2024 unter Vorjahr - Zerspanungstechnik.de [online] [abgerufen am: 05.11.2025], verfügbar unter: <https://www.zerspanungstechnik.de/blog/2025/02/25/deutsche-maschinenbauexporte-2024-unter-vorjahr/>

Ehrlenspiel, K.; Kiewert, A.; Lindemann, U. und Mörtl, M. (2020): Kostengünstig Entwickeln und Konstruieren – Kostenmanagement bei der Integrierten Produktentwicklung. 8. Auflage, Springer Berlin / Heidelberg, Berlin, Heidelberg, ISBN 9783662625910, verfügbar unter: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/kxp/detail.action?docID=6407565>

European Union (2024): Regulation - EU - 2024/1781 - EN - EUR-Lex [online] [abgerufen am: 21.11.2025], verfügbar unter: <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2024/1781/oj/eng>

Fasse, M. (2025): Wie der Mittelstand neue Wege in die Verteidigungsindustrie findet [online] – Der Rüstungsverband der Wirtschaft meldet Rekordzahlen bei den Mitgliedern, vor allem Familienunternehmen treten bei. Der Kurswechsel bietet Chancen – schafft aber auch Probleme., 18.11.2025 [abgerufen am: 19.11.2025], verfügbar unter: <https://www.handelsblatt.com/unternehmen/industrie/ruestung-wie-der-mittelstand-neue-wege-in-die-verteidigungsindustrie-findet/100173177.html>

Flach, L.; Teti, F.; Gourevich, I. und Grandum, L. (2022): Wie abhängig ist Deutschland von Rohstoff importen? – Eine Analyse für die Produktion von Schlüsseltechnologien [online] [abgerufen am: 13.06.2025], verfügbar unter: <https://www.ifo.de/publikationen/2022/monographie-autorenschaft/wie-abhaengig-ist-deutschland-von-rohstoffimporten>

Gebr. Heller Maschinenfabrik GmbH (2022): HELLER Finanzierung: Individuelle Finanzierungs-lösungen für Maschinen [online] [abgerufen am: 05.11.2025], verfügbar unter: <https://www.heller.biz/de/services/finanzierung>

Germany Trade and Invest Gesellschaft für Außenwirtschaft und Standortmarketing mbH (2025): Industry Overview – The Machinery & Equipment Industry in Germany [abgerufen am: 19.11.2025], verfügbar unter: <https://www.gtai.de/en/invest/service/publications/the-machinery-and-equipment-industry-in-germany-64586>

Göbel, I. (2025): Kreislaufwirtschaft im Fokus: Nachhaltige Produktentwicklung [online] [abgerufen am: 25.11.2025], verfügbar unter: <https://www.manz.at/produkte/niu-nachhaltigkeit-im-unternehmen/2025/kreislaufwirtschaft-im-fokus-nachhaltige-produktentwicklung>

Institut der deutschen Wirtschaft Köln e.V. (2021): Deutsche Exportwirtschaft unter Druck [online] [abgerufen am: 13.06.2025], verfügbar unter: <https://www.iwd.de/artikel/deutsche-exportwirtschaft-unter-druck-518924/>

Kaeser Kompressoren. (2022): Betreibermodelle [online] [abgerufen am: 05.11.2025], verfügbar unter: <https://www.kaeser.com/de-de/solutions/operator-models>

Kirchner, J.-S. und Prumbohm, M. (2015): Bewertung der recyclinggerechten Gestaltung von Konstruktionen und Produkten. In: Mitteilungen aus dem Institut für Maschinenwesen der Technischen Universität Clausthal, (Vol. 40), S. 65-78, verfügbar unter: [10.21268/20161111-143654](https://doi.org/10.21268/20161111-143654)

Markt Pilot (2025): Trends im Maschinenbau 2025: Herausforderungen und Chancen [online], 11.06.2025 [abgerufen am: 13.06.2025], verfügbar unter: <https://www.markt-pilot.com/de/ressourcen/blog/maschinenbau-trends-2025>

Meier, M. (2024): Beschäftigung im Maschinen- und Anlagenbau [online] [abgerufen am: 13.06.2025], verfügbar unter: <https://www.antriebstechnik.de/beschaeftigung-im-maschinen-und-anlagenbau/>

Pfeiffer, B.-M.; Bozek, E.; Oppelt, M. und Kempf, J. (2020): Digitale Zwillinge und Prozessmodellierung – wie Sie davon profitieren können [online]. PROCESS, 15.01.2020 [abgerufen am: 17.02.2021], verfügbar unter: <https://www.process.vogel.de/digitale-zwillinge-und-prozessmodellierung-wie-sie-davon-profitieren-koennen-a-896481/?cmp=nl-207&uuid=F4E29846-2CF5-4C68-B86092B1D384A206>

Potting, J.; Hekkert, M.; Worrell, E.; Hanemaaijer, A. (2017): Circular Economy: Measuring innovation in the product chain, verfügbar unter: https://www.researchgate.net/publication/319314335_Circular_Economy_Measuring_innovation_in_the_product_chain

Roland Berger GmbH (2022): Deutscher Maschinenbau unter Transformationsdruck [online] [abgerufen am: 13.06.2025], verfügbar unter: <https://www.rolandberger.com/de/Insights/Publications/Der-deutsche-Maschinen-und-Anlagenbau-im-Umbruch.html>

- Rottler, P. (2025):** Retrofit eines Pegard Bohrwerks | Rottler Maschinenbau GmbH [online] [abgerufen am: 05.11.2025], verfügbar unter: <https://rottler-maschinenbau.de/retrofit-eines-pegard-bohrwerks/>
- RWTH Aachen (2025):** R-Strategien – CirculateD [online] [abgerufen am: 10.09.2025], verfügbar unter: <https://circulated.rwth-aachen.de/index.php?title=R-Strategien>
- Salcher, M. (2022):** Ukraine-Krieg: Dynamische und unsichere Entwicklung im Energiesektor [online] [abgerufen am: 05.11.2025], verfügbar unter: <https://klardenker.kpmg.de/ukraine-krieg-dynamische-und-unsichere-entwicklung-im-energiesektor/>
- Statista (2025):** Beschäftigte im Maschinenbau in Deutschland bis 2024 | Statista [online] [abgerufen am: 24.11.2025], verfügbar unter: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/30821/umfrage/beschaeftigte-im-maschinenbau-in-deutschland/>
- Stürzer, G. (2024):** Diese Herausforderungen treffen Automobilhersteller und -zulieferer 2025 - Handelsblatt Live [online] [abgerufen am: 13.06.2025], verfügbar unter: <https://live.handelsblatt.com/diese-herausforderungen-treffen-automobilhersteller-und-zulieferer/>
- Tukker, A. (2004):** Eight types of product-service system: eight ways to sustainability? Experiences from SusProNet. In: Business Strategy and the Environment, **13** (4), S. 246–260. ISSN 0964-4733. doi:10.1002/bse.414
- Tukker, A. (2015):** Product services for a resource-efficient and circular economy – a review. In: Journal of Cleaner Production, 97, S. 76–91. ISSN 0959-6526. doi:10.1016/j.jclepro.2013.11.049
- Tukker, A. und Tischner, U., Hg. (2006):** New Business for Old Europe – Product-Service Development, Competitiveness and Sustainability, London, New York, Greenleaf Publishing Ltd, ISBN 978-1-874719-92-2.
- VDI ZRE (2025):** Ökodesign bei Heizungspumpen: Ressourcen schonen und im Kreislauf führen [online] [abgerufen am: 05.11.2025], verfügbar unter: <https://www.youtube.com/watch?v=QKGPVL0g6Us>
- VDMA (2023):** Mitglieder-Umfrage Standortfaktoren und Konjunktur – Pressegespräch Maschinenbau-Gipfel, verfügbar unter: https://www.vdma.eu/documents/34570/81293643/23-11-07+Charts+Pressegespr%C3%A4ch_MBG23.pdf/cf9acd5c-b82e-c52f-f25c-59f5b0d9534c?t=1699344291284
- VDMA (2025a):** Maschinenbau in Zahl & Bild [online] [abgerufen am: 09.09.2025], verfügbar unter: <https://www.vdma.eu/de/maschinenbau-zahl-bild>
- VDMA (2025b):** Softwareentwicklung in der Industrie – Status Quo und Ausblick [online] [abgerufen am: 19.11.2025], verfügbar unter: <https://www.vdma.eu/de/viewer/-/v2article/render/137460366>
- VDMA (2025c):** Industriekrise in Deutschland lähmt Maschinenbau [online] [abgerufen am: 21.11.2025], verfügbar unter: <https://www.vdma.eu/de/viewer/-/v2article/render/148711973>

VDMA (2025d): "Zolldeal" mit den USA hat böse Folgen für den Maschinen- & Anlagenbau [online] [abgerufen am: 21.11.2025], verfügbar unter: <https://www.vdma.eu/de/viewer/-/v2article/render/147583827>

VDMA (2025e): Kreislaufwirtschaft 4.0 – Megatrend für den Maschinenbau [online] [abgerufen am: 21.11.2025], verfügbar unter: <https://www.vdma.eu/de/viewer/-/v2article/render/1207091>

verlag moderne industrie GmbH (2025): Das sind die größten Maschinen- und Anlagenbauer Deutschlands [online] [abgerufen am: 13.06.2025], verfügbar unter: <https://www.technik-einkauf.de/technik/top-20-unternehmen-maschinenbau-anlagenbau-deutschland-224602-175.html>

Visible GmbH (2023): Maschinenbau: Motor des Mittelstands [online] [abgerufen am: 19.11.2025], verfügbar unter: <https://www.wlw.de/de/inside-business/branchen-insights/maschinen-anlagen/mittelstand-maschinenbau>

VDI ZRE
Bülowsstraße 78
10783 Berlin
Tel. +49 30-2759506-505

zre-info@vdi.de
www.ressource-deutschland.de

