



REZ
Ressourceneffizienz-
Zentrum Bayern

Effizienz zahlt sich aus

Zahlen, Daten und Fakten zur
Ressourceneffizienz in Bayern





Effizienz zahlt sich aus

**Zahlen, Daten und Fakten zur
Ressourceneffizienz in Bayern**

IMPRESSUM

Effizienz zahlt sich aus – Zahlen, Daten und Fakten zur Ressourceneffizienz in Bayern

Herausgeber:

Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU)
Bürgermeister-Ulrich-Straße 160
86179 Augsburg
Telefon: 0821 9071-0
E-Mail: poststelle@lfu.bayern.de
Internet: www.lfu.bayern.de

Konzept und Text:

Prognos AG
Nymphenburger Straße 14
80335 München

Redaktion:

LfU

Bildnachweis:

Siehe Seite 66

Stand:

Januar 2025
2. überarbeitete Auflage: 300 Exemplare

Druck:

bonitasprint gmbh
Max-von-Laue-Straße 31,
97080 Würzburg
03/2025



Dieses Druckerzeugnis ist mit dem Blauen Engel ausgezeichnet.

Diese Publikation wird kostenlos im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit der Bayerischen Staatsregierung herausgegeben. Jede entgeltliche Weitergabe ist untersagt. Sie darf weder von den Parteien noch von Wahlwerbern oder Wahlhelfern im Zeitraum von fünf Monaten vor einer Wahl zum Zweck der Wahlwerbung verwendet werden. Dies gilt für Landtags-, Bundestags-, Kommunal- und Europawahlen. Missbräuchlich ist während dieser Zeit insbesondere die Verteilung auf Wahlveranstaltungen, an Informationsständen der Parteien sowie das Einlegen, Aufdrucken und Aufkleben parteipolitischer Informationen oder Werbemittel. Untersagt ist gleichfalls die Weitergabe an Dritte zum Zweck der Wahlwerbung. Auch ohne zeitlichen Bezug zu einer bevorstehenden Wahl darf die Publikation nicht in einer Weise verwendet werden, die als Parteinahme der Staatsregierung zugunsten einzelner politischer Gruppen verstanden werden könnte. Den Parteien ist es gestattet, die Publikation zur Unterrichtung ihrer eigenen Mitglieder zu verwenden.

Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Alle Rechte sind vorbehalten. Die publizistische Verwertung der Veröffentlichung – auch von Teilen – wird jedoch ausdrücklich begrüßt. Bitte nehmen Sie Kontakt mit dem Herausgeber auf, der Sie – wenn möglich – mit digitalen Daten der Inhalte und bei der Beschaffung der Wiederabgaberechte unterstützt.

Diese Publikation wurde mit großer Sorgfalt zusammengestellt. Eine Gewähr für die Richtigkeit und Vollständigkeit kann dennoch nicht übernommen werden. Für die Inhalte fremder Internetangebote sind wir nicht verantwortlich.



BAYERN | DIREKT ist Ihr direkter Draht zur Bayerischen Staatsregierung. Unter Tel. 089 12 22 20 oder per E-Mail unter direkt@bayern.de erhalten Sie Informationsmaterial und Broschüren, Auskunft zu aktuellen Themen und Internetquellen sowie Hinweise zu Behörden, zuständigen Stellen und Ansprechpartnern bei der Bayerischen Staatsregierung.

INHALT

Vorwort	4	Kobalt	31
Einleitung	5	Kupfer	32
Zusammenfassung	6	Lithium	33
Kreislaufwirtschaft – Chancen für bayerische Unternehmen	8	Magnesium	34
Was ist die Circular Economy beziehungsweise die Kreislaufwirtschaft?	8	Platin/-gruppe	35
Warum ist die (Weiter-)Entwicklung der Kreislauf- wirtschaft von großer Bedeutung?	8	Seltene Erden	36
Welche politischen Rahmenbedingungen wurden bereits geschaffen?	10	Silizium	37
Welche Materialien werden bereits im Kreislauf geführt und in welchem Umfang?	11	Tantal	38
Wie lässt sich die Kreislauffähigkeit messen?	11	Zinn	39
Wie entwickelt sich der Sekundärrohstoffeinsatz beziehungsweise die Substitution ausgewählter Rohstoffe in bayerischen Unternehmen?	12	Zukunftstechnologien	40
Maß nehmen – Stand und Entwicklung der Ressourceneffizienz in Bayern	13	Chancen ergreifen – Rohstoffverbrauchs-Szenarien für die fünf bayerischen Leitbranchen	41
Rohstoffverbrauch	13	Charakterisierung der Rohstoffnähe unterschiedlicher Branchen	41
Exkurs: Relevante Stoffstromindikatoren im Überblick	14	Rohstoffnähe der bayerischen Industriebranchen	41
Entwicklung des Verbrauchs	15	Rohstoffbedarf der bayerischen Industrie	42
Rohstoffproduktivität	15	Blick auf die bayerischen Leitbranchen: Rohstoffbedarf und Einsparpotenziale	43
Außenhandel mit Rohstoffen	16	Methodisches Vorgehen der Szenarien	44
Bayerns Import von Rohstoffen und Rohmaterialien	17	Fokusbetrachtung Metallbranche	46
Bayerns Export von Rohstoffen und Rohmaterialien	18	Fokusbetrachtung Fahrzeugbau	48
Die zirkuläre Nutzungsrate	18	Fokusbetrachtung Maschinenbau	50
Potenziale aufdecken – Schlüsselrohstoffe für die bayerische Wirtschaft	21	Fokusbetrachtung Elektrobranche	52
Industrierohstoffe im Überblick	21	Fokusbetrachtung Baubranche	54
Ausgewählte Schlüsselrohstoffe für die bayerische Industrie	26	Effizienz zahlt sich aus – werden auch Sie aktiv!	56
Aluminium	28	Kontakt	57
Eisen und Stahl	29	Anhang	58
Indium	30	Endnoten	58
		Literaturverzeichnis	61
		Abbildungsverzeichnis	64
		Bildnachweis	66

VORWORT



Liebe Leserinnen und Leser,
die nachhaltige und zukunftsfähige Nutzung begrenzter Ressourcen ist in einer industrialisierten und globalisierten Welt ein zentrales Thema unserer Zeit. Durch die wachsende Weltbevölkerung steigt auch die Nachfrage nach Rohstoffen, die für den täglichen Bedarf und für Zukunftstechnologien gebraucht werden.

Deshalb ist es so wichtig, unsere Ressourcen effizienter einzusetzen, um die Umwelt zu schützen und gleichzeitig unseren Wohlstand und die wirtschaftliche Stabilität zu gewährleisten.

Strategische und kritische Rohstoffe sind ein wertvolles Gut. Um ihre Verfügbarkeit sicherzustellen, soll der Primärabbau reduziert und die Kreislaufführung gestärkt werden. Eine gezielte Ausschleusung von Schadstoffen ist dabei unentbehrlich. Sie ermöglicht die Rückführung von Abfällen in den Stoffkreislauf und schont Ressourcen.

Die Neuauflage der vorliegenden Studie, herausgegeben durch das Ressourceneffizienz-Zentrum Bayern (REZ) am Bayerischen Landesamt für Umwelt, zeigt Trends und Entwicklungen zu den wichtigsten Branchen Bayerns für eine ressourceneffiziente Rohstoffnutzung auf und stellt verschiedene Zukunftsszenarien zur weiteren Entwicklung vor. Die Stärkung der Kreislaufwirtschaft ist eine Chance für bayerische Unternehmen und bietet viele Potenziale, die es auszuschöpfen gilt.

Das REZ leistet seit 2016 als zentrale Anlaufstelle für bayerische Unternehmen zum Thema Ressourceneffizienz einen Beitrag für eine nachhaltige und zukunftsfähige Nutzung unserer Rohstoffe.

Liebe Leserinnen und Leser, wir hoffen, dass Ihnen die vorliegende Broschüre neue Impulse und Anknüpfungspunkte zur Ressourceneffizienz in Bayern liefert und Sie Ihre Ideen für den Erhalt unserer Ressourcen und zum Schutz unserer Umwelt ertragreich einbringen können.

Dr. Monika Kratzer
Präsidentin des Bayerischen Landesamtes für Umwelt

EINLEITUNG

Von Ressourceneffizienz profitieren Umwelt und Unternehmen. Konkret beschreibt der Begriff das Verhältnis eines bestimmten Nutzens zum dafür nötigen Ressourceneinsatz. Natürliche Ressourcen umfassen alle Elemente aus der Natur, die der Mensch mit einem bestimmten Nutzen verbindet. Darunter fallen viele Bereiche, wie etwa Wasser, Luft, Boden und Flächen, bis hin zu Ökosystemen und Biodiversität. Das Hauptaugenmerk im Rahmen dieser Studie liegt auf Rohstoffen. Betrachtet werden insbesondere abiotische Schlüsselrohstoffe wie Aluminium, Eisen und Stahl, Indium, Kobalt, Kupfer, Lithium, Magnesium, Platin/-gruppe, Seltenerdmetalle, Silizium, Tantal und Zinn, die für Gewerbe und Industrie sowie für Zukunftstechnologien in Bayern von besonderer Bedeutung sind.

Ressourceneffizienz zu steigern bedeutet, mit weniger mehr zu erreichen. Damit werden nicht nur knappe Ressourcenbestände geschont, sondern auch der häufig mit Umweltauswirkungen verbundene Abbau und die energieintensive Erzeugung von Primärrohstoffen minimiert. Die Entkopplung von Wirtschaftswachstum und Ressourcenverbrauch gehört seit vielen Jahren zu den wichtigsten Zielen einer nachhaltigen industriellen Entwicklung. Bayern hat sich diesem Ziel verschrieben und im Rahmen seiner Ressourcenstrategie unter anderem einen 7-Punkte-Plan zur Steigerung der Ressourceneffizienz beschlossen. Neben dem Schutz der Umwelt hat Ressourceneffizienz auch handfeste Vorteile für Unternehmen: Kosteneinsparungen, Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit sowie eine geringere Abhängigkeit vom Rohstoffmarkt und Preisschwankungen sind zentrale Argumente für ein nachhaltiges Wirtschaften im Sinne eines effizienten Rohstoffeinsatzes.

Neben materialeffizienten Produktionsprozessen stellen auch Recycling und Sekundärrohstoffe eine wichtige Säule der Ressourceneffizienz dar. Durch einen erhöhten Einsatz von rezyklierten Rohstoffen kann der Verbrauch an Primärrohstoffen weiter gesenkt werden. Neue Impulse entstehen auch durch das Konzept der Circular Economy. Dieses sieht ein regeneratives Wirtschaftssystem vor, welches Kreisläufe weitgehend schließt und Materialverluste konsequent minimiert. Ressourceneffizienz beginnt dabei bereits beim Design von Produkten und der Wahl der benötigten Rohstoffe und schließt die Optimierung von Herstellungsprozessen, das Recycling und die effektive Nutzung von Sekundärmaterialien mit ein.

Die vorliegende Studie bezieht sich auf amtliche, wissenschaftliche und wirtschaftsstatistische Daten, die ein umfassendes Bild der bayerischen Ressourceneffizienz geben. Die Studie gliedert sich in folgende Kapitel:

- **Kapitel 1 „Kreislaufwirtschaft“** umfasst eine Einführung in das Thema, die regulatorischen Grundlagen sowie gängige Methoden zu Erfassung und Messung. Anhand von sechs Fragen wird den Leserinnen und Lesern erläutert, in welchem Kontext die nachfolgenden Kapitel stehen.
- **Kapitel 2 „Maß nehmen“** beleuchtet die Ausgangssituation für Bayern auf übergeordneter Ebene. Nach einer einordnenden Betrachtung des Gesamtverbrauchs und der Rohstoffproduktivität konzentriert sich die weitere Analyse auf den Aspekt der Material- und Rohstoffeffizienz von abiotischen Rohstoffen zur stofflichen, daher nicht-energetischen, Nutzung sowie auf den Einsatz von Sekundärrohstoffen. Hierbei werden unter anderem die Im- und Exporte von Rohstoffen in Bayern betrachtet und die zirkuläre Nutzungsrate (bekannt als „Circular Material Use Rate“ CMU) beleuchtet.
- In **Kapitel 3 „Potenziale aufdecken“** wird ein dezidierter Blick auf bedeutende Rohstoffe und Leitbranchen gerichtet. Dabei wird zunächst ein umfassender Überblick über eine Vielzahl von Industrierohstoffen gegeben. Anschließend werden zwölf Schlüsselrohstoffe näher betrachtet und neue Rohstoffbedarfe im Kontext von Zukunftstechnologien behandelt und Potenziale aufgezeigt.
- **Kapitel 4 „Chancen ergreifen“** zeigt Chancen für mehr Ressourceneffizienz auf. Dabei werden die aktuellen Verbräuche und mögliche Einsparpotenziale in den verschiedenen Leitbranchen eingängig untersucht. Zudem werden die Angebote des Ressourceneffizienz-Zentrums Bayern (REZ) vorgestellt.

ZUSAMMENFASSUNG

Kreislaufwirtschaft – Chancen für bayerische Unternehmen

In der vorliegenden Studie werden die Begriffe Circular Economy und Kreislaufwirtschaft synonym verwendet.

Die Circular Economy ist das Leitbild eines ganzheitlichen Lösungsansatzes für eine nachhaltige Wirtschaft, in der Produkte und Materialien in weitestgehend geschlossenen Kreisläufen geführt werden und dabei Schadstoffe aus dem Stoffkreislauf ausgeschleust werden. Gesamtwirtschaftlich betrachtet können dadurch natürliche Ressourcen möglichst lange genutzt und effizient eingesetzt werden, sodass insgesamt der Verbrauch von fossilen beziehungsweise primären, also nicht recycelten, Rohstoffen minimiert wird. Damit werden die negativen Effekte des Ressourcenverbrauchs in konventionellen Lieferketten wie Eingriffe in die Natur, Treibhausgasemissionen, Biodiversitätsverluste und soziale Risiken verringert.

Der deutsche Begriff der Kreislaufwirtschaft entwickelte sich im Kontext des Abfallrechts. In Deutschland wurde das Thema Abfallbeseitigung mit dem Abfallbeseitigungsgesetz (AbfG) von 1972 rechtlich verankert. 1994 wurde der Begriff mit dem Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz aufgenommen und später durch das Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) abgelöst, welches 2012 in Kraft trat.

Zur erfolgreichen Umsetzung einer Circular Economy sind Innovationen in fast allen Branchen und Produktlebensphasen notwendig. Hieraus ergeben sich vielfältige Chancen für bayerische Unternehmen. Durch Kreativität und schnelles Handeln können im wirtschaftlichen Wandel Wettbewerbsvorteile genutzt und ausgebaut werden.

Ein Ansatzpunkt zur Messung der Kreislauffähigkeit ist die CMU-Rate (engl. Circular Material Use Rate), die im Rahmen dieser Studie für Bayern ermittelt wurde (siehe Kapitel 2 „Maß nehmen“). Darüber hinaus setzen Unternehmen bereits weitergehende Messkonzepte mit Blick auf ihre Prozesse um, beispielsweise über die Erhebung der Sekundärrohstoffeinsatz-Quote (End-of-Life Recycling Input Rate), also dem Anteil sekundärer Rohstoffe an ihrer Produktion oder an einzelnen Produkten.

Maß nehmen

Positive Signale für mehr Ressourceneffizienz zeigen sich in Bayern bei der Betrachtung der Rohstoffproduktivität. Von 1994 bis 2020 ist der absolute Rohstoffverbrauch der bayerischen Wirtschaft nahezu konstant geblieben, wobei der Anteil biotischer Rohstoffe leicht gestiegen ist. Vor dem Hintergrund des anhaltenden Wirtschaftswachstums ist dies jedoch gleichbedeutend mit einem kontinuierlichen Anstieg der Rohstoffproduktivität. Der bayerischen Wirtschaft gelingt es folglich, mit gleichbleibendem Rohstoffeinsatz mehr Güter bereitzustellen.

Um Umweltauswirkungen zu reduzieren, wird es in den kommenden Jahren darum gehen, eine absolute Reduktion der Rohstoffverbräuche zu erreichen.

Zusätzlich zeigt die Analyse der Im- und Exportströme, dass die bayerische Wirtschaft zunehmend in den internationalen Handel eingebunden ist und Rohstoffe sowie Materialien aus dem Ausland bezieht beziehungsweise dorthin liefert. In den Jahren 2021 und 2022 kam es zu einem sprunghaften Anstieg der Preise für die gehandelten Rohstoffe, der auf unterbrochene Lieferketten im Zuge der Coronapandemie zurückgeführt werden kann.

Um Umweltauswirkungen zu reduzieren und unternehmerische Risiken durch Preisschwankungen zu mindern, bietet die Entwicklung in Richtung einer Circular Economy einen Lösungsansatz, der Rohstoffkreisläufe weitestgehend schließt. Die Analyse der bayerischen CMU-Rate, die als Indikator für den Erreichungsgrad einer Circular Economy gilt, zeigt jedoch, dass lediglich 11,3 % der heutigen wirtschaftlichen Aktivitäten dem Zielbild einer Circular Economy entsprechen.



Potenziale aufdecken

Die Studie beleuchtet die wichtigsten Rohstoffe für die bayerische Industrie im Detail. Anhand verschiedener Kriterien – von Rohstoffversorgung und Umweltauswirkungen bis hin zu Nachfrage und Rohstoffpreisen – werden 49 Industrierohstoffe im Kontext der Ressourceneffizienz betrachtet.

Für die bayerische Industrie sind im Hinblick auf die Ressourceneffizienz die folgenden zwölf Schlüsselrohstoffe von besonderer Relevanz: Aluminium, Eisen und Stahl, Indium, Kobalt, Kupfer, Lithium, Magnesium, die Platingruppe, Seltene Erden, Silizium, Tantal und Zinn. Bei diesen Rohstoffen ist ein effizienter Umgang besonders geboten, da sie als Volumenrohstoffe in hohem Maße nachgefragt werden, über ein hohes Versorgungsrisiko verfügen oder von besonderer Relevanz für Zukunftstechnologien sind.

Der Abschnitt „Zukunftstechnologien“ erfasst darüber hinaus wichtige Technologietrends, wie etwa die Markthochläufe der Erneuerbaren Energien oder der E-Mobilität, sowie die damit verbundenen zusätzlichen Rohstoffbedarfe, die sich in den kommenden Jahren voraussichtlich ergeben werden.



Chancen ergreifen

Je nach Branche und Unternehmenstätigkeit variieren die Möglichkeiten, Rohstoffe effizient einzusetzen und die Ressourceneffizienz aktiv zu fördern. Im Rahmen dieser Studie werden fünf bayerische Leitbranchen – Bauindustrie, Fahrzeugbau, Metallindustrie, Elektroindustrie, Maschinenbau – näher auf die jeweiligen Rohstoffeinsparpotenziale hin untersucht.

Die Baubranche weist mit etwa 134 Millionen Tonnen den mit Abstand höchsten Rohstoffverbrauch auf und beschäftigt knapp 420.000 Personen. Mit Blick auf die Bruttowertschöpfung steht die Baubranche an zweiter Stelle. Die höchste Bruttowertschöpfung leistet der Fahrzeugbau, bei gleichzeitig deutlich geringerem Rohstoffverbrauch. Die Metallbranche weist den zweithöchsten Rohstoffverbrauch auf, stellt jedoch von allen fünf Leitbranchen die geringste Bruttowertschöpfung bereit. Im Ergebnis zeigt sich in der Metallbranche die geringste Rohstoffproduktivität. Die Elektrobranche und der Maschinenbau zeigen die geringsten Materialverbräuche bei gleichzeitig hoher Bruttowertschöpfung, beide Branchen weisen somit die höchste Rohstoffproduktivität auf.

Je Leitbranche wurden drei Szenarien bis 2035 gebildet, die mögliche zukünftige Entwicklungspfade zeichnen. Die erste Szenariorechnung unterstellt eine Fortführung der bisherigen Trends und zeigt in allen Leitbranchen einen deutlich erhöhten Rohstoffverbrauch bis 2035. Im zweiten Szenario werden erhöhte Einsätze von Sekundärrohstoffen modelliert, entsprechend den jeweils bestehenden Potenzialen. Im Ergebnis wird eine leichte Reduktion der absoluten Rohstoffverbräuche gegenüber dem Wert von 2020 erreicht. Signifikante Verbrauchsreduktionen können schließlich im dritten Szenario erreicht werden, das ambitionierte branchenspezifische Maßnahmen zur Ressourceneffizienz annimmt, beispielsweise der Einsatz neuer Technologien und digitalisierter Produktionsprozesse, das Vermindern von geplantem Verlust und Ausschuss, die Verlängerung der technischen Produktlebensdauer oder eine fertigungs-, nutzungs- und recyclinggerechte Produktgestaltung.



Kreislaufwirtschaft – Chancen für bayerische Unternehmen

Was ist die Circular Economy beziehungsweise die Kreislaufwirtschaft?

Die Circular Economy ist das Leitbild eines Wirtschaftsmodells, in dem Produkte und Materialien in weitgehend geschlossenen Kreisläufen geführt werden (siehe Abbildung 1). Im aktuell vorherrschenden Wirtschaftssystem überwiegen lineare Wertschöpfungsketten und Nutzungsstrukturen: Produkte werden produziert, benutzt und dann entsorgt. In einer zirkulären Wirtschaft werden durch Wiederverwendung, Reparatur, Rückgewinnung und Recycling, die Nutzungsphase und damit die Lebensdauer von Produkten, ihrer Bestandteile oder enthaltenen Materialien verlängert. Gesamtwirtschaftlich betrachtet kann dadurch der Verbrauch von fossilen beziehungsweise primären, also nicht recycelten, Rohstoffen minimiert werden. Abfälle werden in der Circular Economy soweit möglich vermieden beziehungsweise als Ressourcen verstanden und möglichst umfassend zurück in den Kreislauf geführt. Gleichwohl muss die Abfallwirtschaft ein sicheres Ausschleusen von Schadstoffen gewährleisten.

Im deutschen Sprachraum wie auch in dieser Studie werden die Begriffe Circular Economy und Kreislaufwirtschaft synonym verwendet, je nach Verständnis unterscheiden sie sich jedoch. Das Konzept der Kreislaufwirtschaft beschreibt im engeren Sinne Dienstleistungen und Prozesse rund um die Sammlung, Sortierung, Aufbereitung und Verwertung von Abfällen. Zunehmend geht mit dem Begriff der Kreislaufwirtschaft ein umfassenderes Verständnis einher, das über die Leistungen der Abfallwirtschaft hinaus geht. Mit der Erarbeitung einer Nationalen Kreislaufwirtschaftsstrategie prägt die Politik auf Bundesebene das Konzept aktuell im weiteren Sinne, indem auf ein ganzheitliches zirkuläres Wirtschaften in einer Circular Economy abgezielt wird. Die traditionelle Aufgabe der Abfall-/Kreislaufwirtschaft, die Entsorgung von Abfällen, wird ergänzt und erweist sich als „Motor“ der Circular Economy. Neben der Abfallwirtschaft gibt es weitere Treiber der Circular Economy wie beispielsweise Lieferengpässe und Verfügbarkeiten von Rohstoffen, steigende Kosten und soziale Bedingungen und Umweltstandards in den rohstoffproduzierenden Ländern.

Warum ist die (Weiter-)Entwicklung der Kreislaufwirtschaft von großer Bedeutung?

Während die Weltbevölkerung wächst, bleibt der Wunsch nach einem hohen Lebensstandard für möglichst viele Menschen bestehen. Die anhaltende Steigerung des Lebensstandards steht jedoch vor einer grundlegenden Herausforderung; Rohstoffverfügbarkeiten sind natürlich begrenzt und endlich. Hinzu kommt der Klimawandel, hervorgerufen durch einen industriellen Lebensstil, durch emissionsintensive Prozesse, darunter die Extraktion von Rohstoffen, Transport und Verarbeitung als auch industrielle Produktionsprozesse und weitere Herausforderungen in den Lieferländern, die zu Lieferengpässen führen können.

Die Circular Economy tritt an dieser Stelle als ganzheitlicher Lösungsansatz für eine nachhaltige Wirtschaft auf. Sie stellt ein industrielles System dar, in dem natürliche Ressourcen möglichst lange genutzt und effizient eingesetzt werden, sodass insgesamt möglichst wenige Ressourcen verbraucht werden.

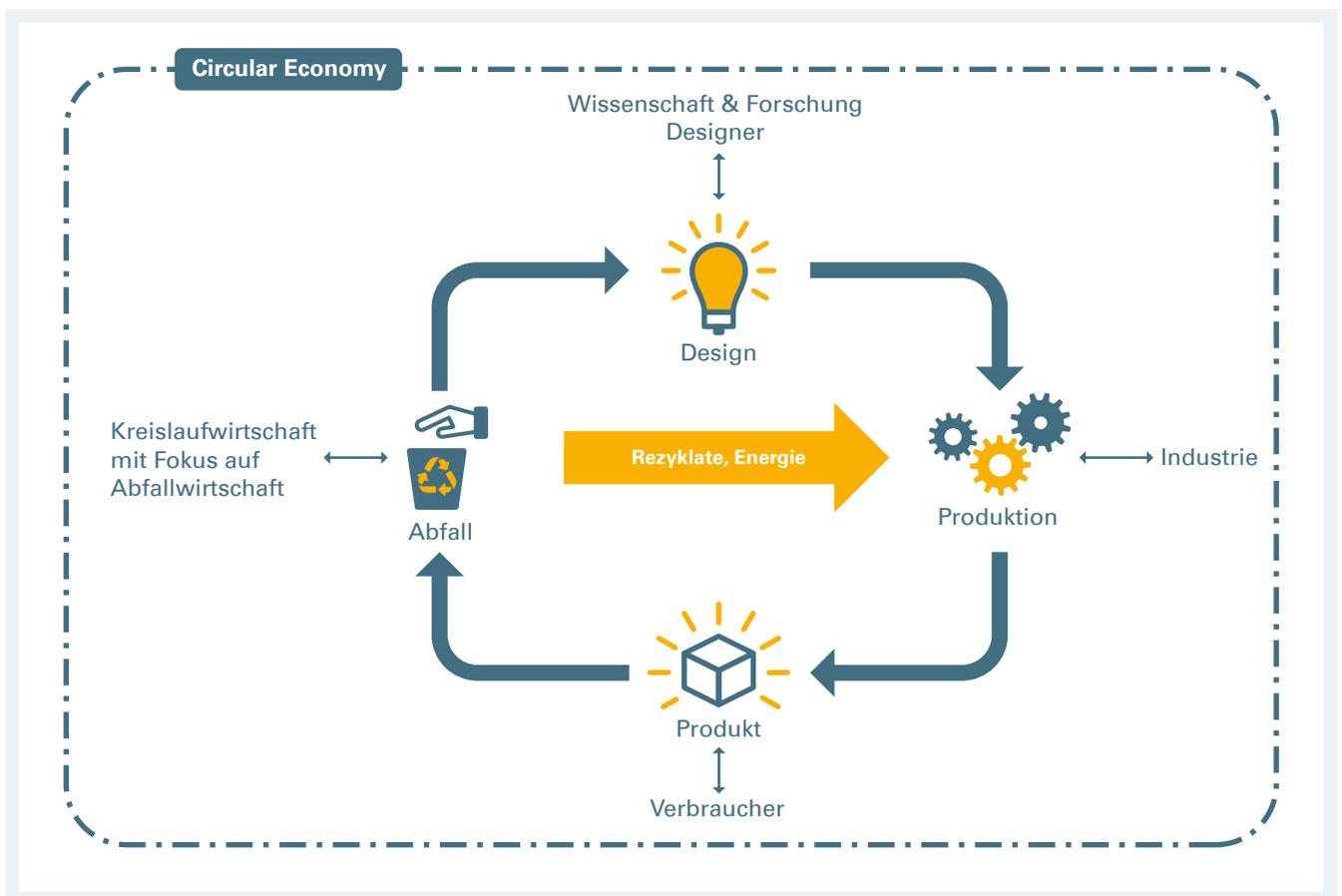


Abb. 1: Schematische Darstellung der Circular Economy; Kreislaufwirtschaft mit Fokus auf die Abfallwirtschaft als „Motor“ der Circular Economy¹

Damit werden die negativen Effekte des Ressourcenverbrauchs in konventionellen Lieferketten sowie Eingriffe in die Natur, Treibhausgasemissionen, Biodiversitätsverluste und soziale Risiken minimiert.

Ökonomisch bedeutet die Circular Economy keinen Stillstand – Wertschöpfung und insbesondere Wertschutz finden weiterhin statt: durch ein materialsparendes und recyclingfähiges Design von Produkten und einer Verschiebung hin zu Dienstleistungen und innovativen Geschäftsmodellen in den Bereichen Sharing, Leasing, Reparatur und Aufbereitung/Wiederverwendung, (Re-)Produktion und Recycling.

Für Unternehmen bringt zirkuläres Wirtschaften in vielerlei Hinsicht ökonomische Vorteile mit sich. Durch die Einsparung von Ressourcen

können Herstellungskosten reduziert, durch den Wiedereinsatz oder den Weiterverkauf von Produktionsabfällen Abfallgebühren vermieden werden. Zirkuläre Geschäftsmodelle bringen zudem neue Wertschöpfungsmöglichkeiten mit sich. Bleibt ein Produkt auch in der Nutzungsphase im Besitz des Herstellers, wie es in „Produkt-as-a-Service“ oder „Nutzen-statt-Besitzen“ Geschäftsmodellen üblich ist, kann es bei Defekt oder Rückgabe von diesem repariert und wiedereingesetzt werden. Der Zugriff auf die enthaltenen Rohstoffe bleibt erhalten. Dies kann insbesondere bei kritischen Rohstoffen von Vorteil sein. Die Coronapandemie und nicht zuletzt der russische Angriffskrieg auf die Ukraine haben gezeigt, wie wichtig Resilienz und Unabhängigkeit von (kritischen) Rohstoffimporten für die hiesige Wirtschaft sind.

Zur erfolgreichen Umsetzung einer Circular Economy sind Innovationen in fast allen Branchen und Produktlebensphasen notwendig. Hieraus ergeben sich vielfältige Chancen für bayerische Unternehmen. Durch Kreativität und schnelles Handeln können im wirtschaftlichen Wandel Wettbewerbsvorteile genutzt und ausgebaut werden.

(Wirtschafts-) Akteure können im Sinne der Circular Economy handeln, indem sie verschiedene R-Strategien verfolgen. Unter dem lateinischen Präfix „re“ (deutsch: „wieder“ oder „zurück“) werden verschiedene solcher **R-Strategien** zusammengefasst. Sie lassen sich nach ihrer Zirkularität (vs. Materialverlust) und ihrem Innovationsbedarf ordnen (siehe Abbildung 2).

R 0 bis R 2 (refuse, rethink, reduce) beziehen sich auf Ansätze zur

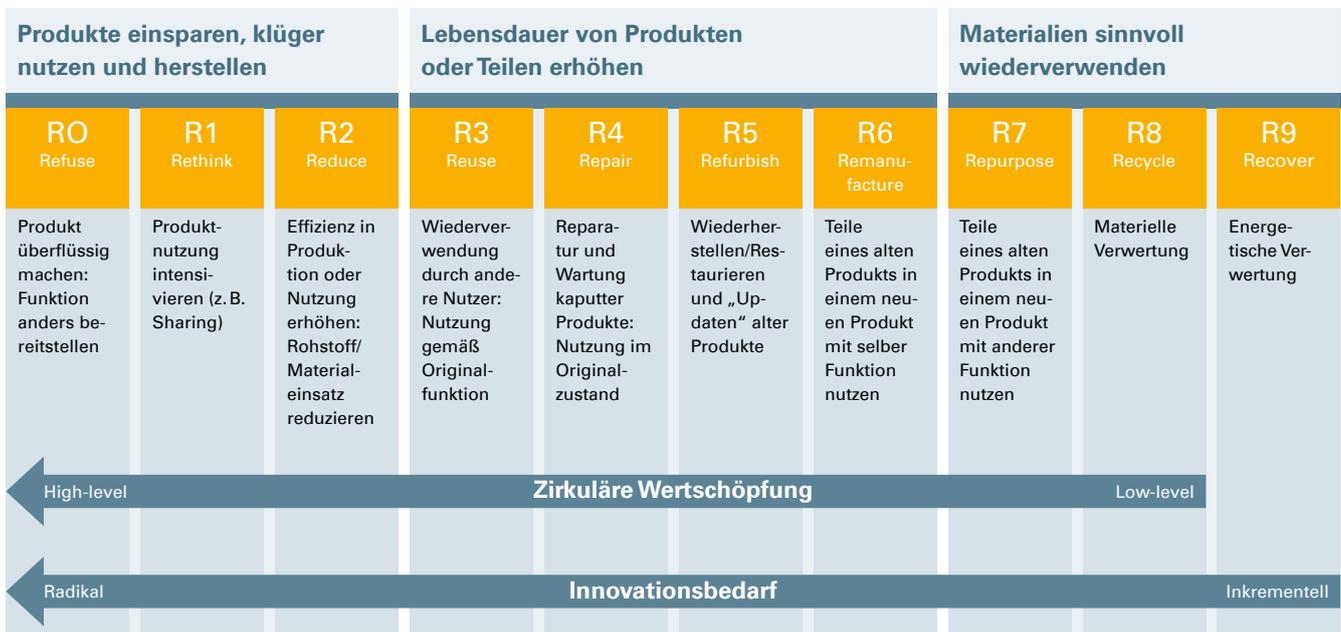


Abb. 2: Strategien der Circular Economy: das „9R Framework“²

Abfallvermeidung und zur Stärkung der Rohstoff- und Materialeffizienz und beginnen bereits bei der Konsumentscheidung und dem Bewusstsein für Ressourcenschonung. Gleichzeitig kann „reduce“ auch durch recyclingfähiges Design und Herstellung von Dienstleistungen und Produkten erreicht werden. Die R-Strategien 3–7 zielen darauf ab, bereits genutzte Rohstoffe und Materialien im Kreislauf zu halten und deren Produktlebenszyklus zu verlängern (reuse, repair, refurbish, remanufacture, repurpose). R8 (recycle) und R9 (recover) beziehen sich auf eine Stärkung des Recyclings und der sonstigen Verwertung. Diese können in Ergänzung zur im Kreislaufwirtschaftsgesetz festgeschriebenen fünfstufigen Abfallhierarchie gesehen werden. Für die Umsetzung der R-Strategien sind Innovationen, von inkrementell, also Veränderungen oder Entwicklungen an bereits bestehenden Produkten bis zu radikal, also grundlegende Veränderungen mögliche Hebel. Zusätzlich ist die Etablierung einer zirkulären Wertschöpfungskette unter Ausschließung von Schadstoffen zu berücksichtigen.

Welche politischen Rahmenbedingungen wurden bereits geschaffen?

Vor dem Hintergrund ihrer ökonomischen, ökologischen und sozialen Vorteile ist die Circular Economy als politisches Ziel ausgegeben worden. Auf europäischer Ebene steht seit 2020 der *EU-Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft* (englisch: Circular Economy Action Plan (CEAP))³ im Mittelpunkt des *Europäischen Grünen Deals*⁴. Mit ihm zielt die EU darauf ab, den Übergang zu einer modernen, ressourceneffizienten und wettbewerbsfähigen Wirtschaft zu schaffen. Der CEAP umfasst mehrere legislative und nicht-legislative Initiativen und Maßnahmen entlang des gesamten Lebenszyklus von Produkten. Darunter z. B. die *Initiative für nachhaltige Produkte*⁵ zur Ausweitung der *Ökodesign Richtlinie*⁶, das *Kreislaufwirtschaftspaket*⁷ mit ambitionierten EU-weiten Zielvorgaben für Recycling und weitere Abfallbehandlung als auch mehrere Forschungs- und Förderprogramme zum

nachhaltigen Ressourcenverbrauch und zur Vermeidung von Abfällen. Weitere EU-Strategien, wie die *Industrie-, Chemikalien- und Kunststoff- und Bioökonomiestrategie*⁸, greifen die Prinzipien des CEAP auf und unterstützen seine Ziele. So verfolgt die Kunststoffstrategie der EU einen ganzheitlichen Ansatz und deckt Produktdesignanforderungen genauso ab wie die Förderung eines Markts für recycelte Kunststoffe. Mit der viel diskutierten *Einwegkunststoffrichtlinie*⁹ wurde ein EU-weites Verbot für besonders kurzlebige Produkte, wie Einweggeschirr, beschlossen.

Grundlage des Abfallrechts in der EU ist die *Abfallrahmenrichtlinie*¹⁰ (AbfRRL). Sie definiert grundlegende Abfallbegriffe und Pflichten. Ihr Kernelement ist die fünfstufige *Abfallhierarchie*, die festlegt, nach welcher Priorität Abfall zu behandeln ist. Vermeidung und Wiederverwendung stehen in der Hierarchie ganz oben, die stoffliche Verwertung (Recycling) ist einer thermischen Verwertung vorzuziehen und eine Beseitigung von Abfällen soll nur dann erfolgen, wenn keine Verwertung

mehr möglich ist. In Deutschland wird die AbfRRL durch das *Kreislaufwirtschaftsgesetz*¹¹ (KrWG) umgesetzt, in Bayern durch das Bayerische *Abfallwirtschaftsgesetz*¹² (BayAbfG). Übergeordnet gilt die rahmengebende Gesetzgebung der EU.

In Deutschland wird aktuell eine *Nationale Kreislaufwirtschaftsstrategie*¹³ (NKWS) erarbeitet. Als Rahmenstrategie soll die NKWS rohstoffpolitische Ziele, grundlegende Prinzipien und strategische Maßnahmen der Bundesregierung festlegen und das Ziel verfolgen, den absoluten primären Rohstoffbedarf Deutschlands zu senken.

Bayern hat seit 2020 eine eigene Bioökonomiestrategie und greift darin die Potenziale eines Teilbereichs der Circular Economy auf. Zudem wurde als Teil der *Bayerischen Ressourcenstrategie* der *7-Punkte-Plan für einen effizienten Ressourceneinsatz in der bayerischen Wirtschaft*¹⁴ aufgelegt. Das bestehende Ressourceneffizienz-Zentrum (REZ) Bayern wird zum „CleanTech Hub für Kreislaufwirtschaft der Zukunft“¹⁵ ausgebaut. Darüber hinaus hat Bayern mit der „Nachhaltigkeitsstrategie“ auch die von der UN formulierten „Sustainable Development Goals“ verankert.¹⁶ Zusätzliche Impulse entstehen durch das *Klimapaket*¹⁷ und darüber hinaus aus den laufenden Arbeiten zur *Ressourcenstrategie*¹⁸ des Landes Bayern.

Im Januar 2023 haben DIN, DKE und VDI die „Normungsroadmap Circular Economy“¹⁹ herausgeben. Diese beschreibt den Status Quo, Anforderungen und Herausforderungen für sieben Schwerpunktthemen im Bereich Circular Economy und formuliert konkrete Handlungsbedarfe für zukünftige Normen und Standards.

Welche Materialien werden bereits im Kreislauf geführt und in welchem Umfang?

Das Ziel der Kreislaufwirtschaft ist möglichst viele Materialien im Rohstoffkreislauf zu halten. Dies übersetzt sich in der Praxis in die verstärkte Verwendung von Sekundärrohstoffen. Je nach Rohstoff sind die Recyclingfähigkeit und die technischen Gegebenheiten unterschiedlich stark ausgeprägt, sodass einige Rohstoffe zu einem Großteil als Sekundärrohstoffe nachgefragt werden (können) und andere kaum recycelt und daher sehr begrenzt als Sekundärrohstoff erworben werden (können). Auf Rohstoffebene gibt es verschiedene Quellen, die eine Aussage darüber zulassen, inwieweit Rohstoffe sekundär beziehungsweise recycelt eingesetzt werden.

- Für Massenmetalle wie etwa Eisen, Aluminium oder Kupfer gilt schon heute, dass ein relevanter Teil der Abfallmengen zurückgewonnen und in eine neue Verwendung geführt wird. Der Indikator der *End-of-Life Recycling Input Rate (EOL-RIR)* weist aus, dass etwa 31 % der Rohstoffnachfrage nach Eisen durch recycelte Materialien gedeckt wird, beim Aluminium 32 % und beim Kupfer 55 %.²⁰
- Neben dem Indikator der *End-of-Life Recycling Input Rate* finden sich weitere Quellen, die eine Aussage darüber zulassen, welche Materialien bereits heute im Kreislauf geführt werden. Für Kunststoffe gilt, dass zwar fast die gesamte Abfallmenge verwertet wird, jedoch zu großen Teilen in der energetischen Verwertung. Der Anteil der eingesetzten Rezyklate in

der Kunststoffverarbeitung beträgt lediglich knapp 12 %.²¹

- Für die Abfälle aus Altpapier oder Altglas zeigt sich, dass ein großer Teil bereits in Kreisläufen geführt wird. Der Anteil des Altpapiers an der in Deutschland geleisteten Papierproduktion beträgt etwa 78 %, bei der Glasproduktion sogar 85 %.^{22 23}

Weiterhin lässt sich über die Außenhandelsdaten für Bayern feststellen, welche Menge und welcher Wert von einem Rohstoff als Primär- oder Sekundärrohstoff im- und exportiert wird (siehe Rohstoffsteckbriefe im Kapitel Industrierohstoffe im Überblick für Daten zum Jahr 2022).

Wie lässt sich die Kreislauffähigkeit messen?

Eine Überwachung des Status beziehungsweise Fortschritts hinsichtlich einer Kreislaufwirtschaft steht vor der Herausforderung fehlender Daten und uneinheitlicher Messkonzepte. Zu differenzieren ist dabei zwischen einer volkswirtschaftlichen und betrieblichen Betrachtung.

Für den schon lange regulierten Bereich der Abfallwirtschaft wurden Berichtspflichten für die von den zuständigen Betrieben erfassten Siedlungsabfällen aus Haushalten und Kleingewerbe inklusive ihrer Verwertungswege (Vorbereitung zur Wiederverwendung, Recycling und thermische Verwertung) eingeführt. Damit liegen statistische Daten, zum Beispiel die Recyclingraten, zu den getrennt erfassten Stoffströmen (Altglas, Papier, Metalle, Leichtverpackungen) und Restabfällen bis auf Kreisebene vor.

Auch für von produktbezogener Regulatorik betroffene Stoffströme (EAG, Batterien und Altfahrzeuge) werden Daten zum Abfallaufkommen erfasst. Für Abfälle aus dem Industriegewerbe gelten diese Berichtspflichten nicht.

Zudem ist die Datenlage zum tatsächlichen Wiedereinsatz der Abfälle, also wo und in welcher Qualität dieser stattfindet, nach wie vor sehr begrenzt. Eine weitere Betrachtung ermöglicht die CMU-Rate, die im Rahmen dieser Studie für Bayern ermittelt wurde (siehe Kapitel 2 „Maß nehmen“).

Um Kreislauffähigkeit umfassend im Sinne der Circular Economy zu messen, müsste zum einen die Datenlage über den tatsächlichen Verbleib von Abfällen verbessert werden bzw. zur Verfügung gestellt werden. Zum anderen müssten auch Produkte und Stoffströme gezählt werden, die rückgeführt, aber nie zu Abfall werden. Für sie gibt es bisher keine Berichtspflichten. Da zirkuläre Ansätze in allen Branchen, teilweise in ein und demselben Unternehmen an der Seite herkömmlicher Geschäftsmodelle angewandt werden beziehungsweise in der Produktionsphase nicht abgrenzbar sind, werden sie von der bisherigen Statistik nicht erfasst.

Einzelne Unternehmen setzen weitergehende Messkonzepte mit Blick auf ihre Prozesse um, beispielsweise über die Erhebung der Sekundärrohstoffeinsatz-Quote (End-of Life Recycling Input Rate), also dem Anteil sekundärer Rohstoffe an ihrer Produktion oder einzelner Produkte. Zudem werden Kreislaufwirtschaftsindikatoren im Kontext der kommenden EU-Nachhaltigkeitsberichtspflicht für große Unternehmen (Corporate Social Responsibility Directive,

CSRD) in die European Sustainability Reporting Standards (ESRS) integriert. Weiterführende Informationen zur Messung von Kreislaufwirtschaft im betrieblichen Kontext bieten verschiedene Leitfäden, unter anderem:

- World Business Council for Sustainable Development (2023): Circular Transition Indicators v4.0, www.wbcsd.org/Programs/Circular-Economy/Metrics-Measurement/Resources/Circular-Transition-Indicators-v4.0-Metrics-for-business-by-business
- Circle Economy (2020): Circular Metrics for Businesses, www.circle-economy.com/resources/metrics
- Circle Economy/KPMG (2021): Circular Transition Indicators (CTI) framework, www.circle-economy.com/resources/introduction-to-the-circular-transition-indicators-framework
- Circle Economy/BCG (2021): CIRCelligence indicators framework, www.circle-economy.com/resources/introduction-to-the-circelligence-indicators-framework

Zusätzlich kann man mithilfe des ESTEM-Tools das Treibhausgas-einsparpotenzial von Materialeffizienzmaßnahmen, die z. B. zur Kreislaufwirtschaft im Betrieb beitragen, ermitteln. Weitere Informationen zum Tool erhalten sie unter www.ressource-deutschland.de/service/estem/.

Wie entwickelt sich der Sekundärrohstoffeinsatz beziehungsweise die Substitution ausgewählter Rohstoffe in bayerischen Unternehmen?

Die Entwicklung des Sekundärmaterialeinsatzes in bayerischen Unternehmen lässt sich aufgrund fehlender Daten nur näherungsweise untersuchen. Die bayerischen Abfallbilanzen zeigen, dass über die letzten Jahre der bayerischen Industrie mehr Sekundärrohstoffe zur Verfügung gestellt wurden.

Für die bayerischen Restabfallaufkommen (Hausmüll, Gewerbeabfall, Sperrmüll, Sortierreste) zeigt sich über die vergangenen Jahre ein steigender Anteil an Abfällen, der in die stoffliche Verwertung überführt wird und anschließend entsprechend als Sekundärrohstoff eine neue Verwendung findet. Zwischen 2010 und 2021 stieg der Anteil von 33,6 % auf 40,4 %.²⁴ Gleichzeitig stieg im selben Zeitraum (siehe Kapitel „Rohstoffverbrauch“) der Materialeinsatz der bayerischen Industriebetriebe, sodass der Anteil des Sekundärrohstoffeinsatzes vermutlich konstant geblieben ist. Diese Annahme deckt sich mit der Entwicklung der CMU-Rate in Bayern (siehe Kapitel 2 „Maß nehmen“). Für das Jahr 2020 lag der Wert bei 11,3 %. Mit Blick auf die Entwicklung der letzten Jahre zeigt sich, dass der Wert nahezu konstant geblieben ist. Im Jahr 2010 lag der Wert bei 11,03 %.



Maß nehmen – Stand und Entwicklung der Ressourceneffizienz in Bayern

Rohstoffverbrauch

Rohstoffe bilden die Grundlage wirtschaftlicher Aktivitäten. Zu unterscheiden ist dabei zwischen abiotischen Mineralien, wie Erzen und Steinen, und biotischen Rohstoffen pflanzlichen oder tierischen Ursprungs. Der Abbau und der Verbrauch von Rohstoffen sind mit einer Reihe von Belastungen für Mensch und Natur verbunden. Zum einen entstehen direkte Umweltwirkungen bei der Gewinnung der Rohstoffe durch den Eingriff in ökologische Systeme, etwa im Bergbau. Zusätzlich entstehen Umwelteffekte durch den Verbrauch der Rohstoffe, zum Beispiel bei der Produktion von Gütern und Produkten, bei der Verbrennung fossiler Energieträger oder durch entstehende Abfallmengen. Aufgrund der Umweltwirkungen und der begrenzten Verfügbarkeit von Rohstoffen ist die Weiterentwicklung einer nachhaltigen Kreislaufwirtschaft²⁵ von hoher Bedeutung. Ziel ist dabei, die Menge der verbrauchten Primärrohstoffe so weit wie möglich zu reduzieren und diese möglichst zirkulär zu nutzen. In der Konsequenz bedeutet dies auch eine Reduktion von Abfällen. Gleichzeitig müssen Schadstoffe zur Vermeidung von Gefahren für Mensch und Umwelt sicher ausgeschleust werden.

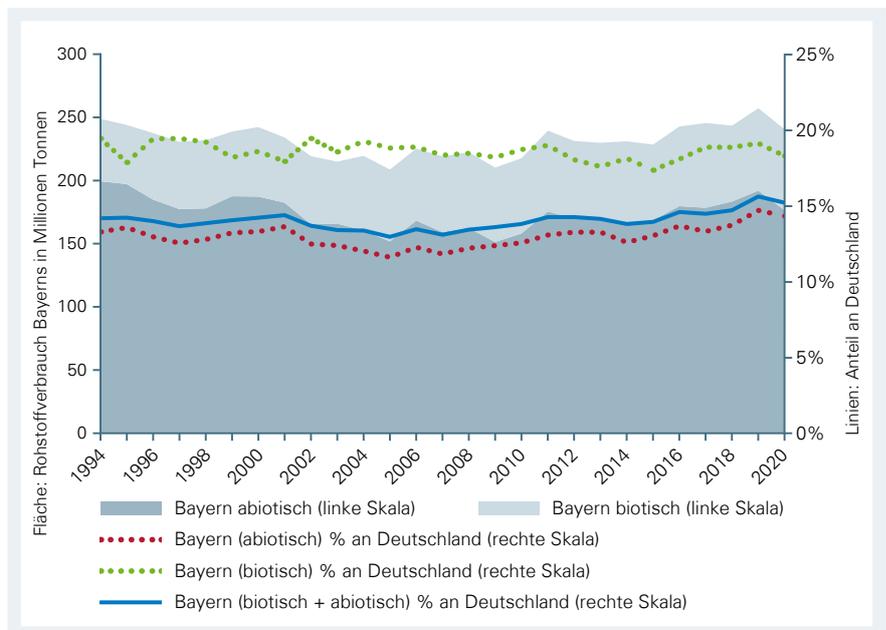


Abb. 3: Rohstoffverbrauch biotischer und abiotischer Stoffe in Bayern (DMI einschließlich Saldo des Intrahandels (=Empfang abzüglich des Versands aus dem Handel zwischen den Bundesländern))²⁶
 Lesehilfe: Im Jahr 2020 betrug der Materialeinsatz in Bayern insgesamt 240 Millionen Tonnen an Rohstoffen, davon 73 % abiotische und 27 % biotische Rohstoffe. Umgerechnet ergibt sich daraus eine Pro-Kopf-Menge von rund 18,3 Tonnen pro Jahr.

Um den Rohstoffbedarf der bayerischen Volkswirtschaft zu messen, können verschiedene Indikatoren herangezogen werden. Ein gängiger Indikator ist der direkte Materialeinsatz (DMI), der den Umweltökonomischen Gesamtrechnungen der Länder entnommen werden kann. Dieser betrachtet die Summe aus heimischer

Materialextraktion (also die Rohstoffmengen, die in Bayern gewonnen wurden) und dem Import von Rohstoffen aus dem Ausland sowie den übrigen Bundesländern. Daraus ergibt sich die Gesamtsumme aller Rohstoffe, die in die bayerische Volkswirtschaft gelangen (Abbildung 3).

Der Gesamtrohstoffverbrauch Bayerns im Jahr 2020 befindet sich auf einem ähnlichen Niveau wie 1994, nachdem er Mitte der 2000er-Jahre zunächst leicht zurückgegangen, nach 2011 aber wieder etwas angestiegen ist. Dabei hat sich jedoch das relative Verhältnis

von abiotischen und biotischen Rohstoffen verändert (siehe nächster Abschnitt).

Gemessen an den bundesdeutschen Werten entfallen rund 15 % des gesamten Materialeinsatzes auf Bayern.

Dieser Anteil der biotischen Rohstoffe im Vergleich zu den bundesdeutschen Werten lässt sich auf den hohen Anteil der Land- und Forstwirtschaft in Bayern zurückführen.

Exkurs: Relevante Stoffstromindikatoren im Überblick

Neben dem direkten Materialeinsatz (DMI) gibt es weitere Indikatoren, mit denen die Rohstoffnutzung einer Volkswirtschaft beschrieben werden können. Einige dieser sogenannten Stoffstromindikatoren sind in nachfolgender Tabelle aufgeführt.

Welche Stoffstromindikatoren für die Betrachtung der Rohstoffnutzung verwendet werden, hängt im Allgemeinen von der intendierten Aussagekraft des Indikators als auch der Datenverfügbarkeit ab. Stoffstromindikatoren unterscheiden sich in diversen Charakteristika und werden unter anderem danach differenziert, ob sie zum Beispiel einen Materialinput oder Materialverbrauch darstellen (Indikatorart) oder welchen Teil eines Stoffstromsystems sie umfassen beziehungsweise welche Systemgrenzen sie aufweisen (Bilanzierungsregel). Eine weitere Differenzierung ist durch die Beschaffenheit beziehungsweise Art der betrachteten Rohstoffe (biotisch/abiotisch) möglich.

Aufgrund verschiedener Erhebungsmethoden und indikatorspezifischer Einheiten können Stoffstromindikatoren nicht zwangsläufig miteinander in Relation gesetzt werden. Geläufig ist jedoch die Angabe in Tonnen oder Rohstoffäquivalenten, wobei bei letzterem die vorgelagerte Wertschöpfungskette in der Rohstoffbereitstellung beziehungsweise Güterherstellung ebenfalls berücksichtigt wird.

Indikatorart	Deutsche Bezeichnung	Englische Bezeichnung	Abk.	Bilanzierungsregel	Einheit
Input	Direkter Materialeinsatz	direct material input	DMI	DMI = Inländische verwertete Rohstoffentnahme + Importe	Tonnen
Input	Direkter abiotischer Materialeinsatz	direct material input abiotic	DMIa	DMIa = Inländische verwertete abiotische Rohstoffentnahme + abiotische Importe	Tonnen
Verbrauch	Inländischer Materialverbrauch	domestic material consumption	DMC	DMC = DMI – Exporte	Tonnen
Verbrauch	Rohstoffverbrauch	raw material consumption	RMC	RMC = Inländische Rohstoffentnahme + Importe – Rohstoffe zur Herstellung von Exportgütern	Tonnen Rohstoffäquivalente

Tabelle 1: Exkurs: Relevante Stoffstromindikatoren im Überblick²⁷

Entwicklung des Verbrauchs

Um die Entwicklung des abiotischen und biotischen Materialverbrauches näher zu beleuchten, wird die jeweilige Verbrauchsentwicklung im Verhältnis zum Basisjahr 1994 (=100) dargestellt. In Abbildung 4 wird deutlich, dass der Verbrauch von abiotischen Rohstoffen seit 1994 abgenommen hat. Im Jahr 2020 liegt der Verbrauch 11 % unter dem Referenzwert. Für biotische Rohstoffe zeigt sich hingegen eine

deutliche Zunahme des Verbrauches um knapp 30 %. Da es sich hierbei in der Regel um nachwachsende Rohstoffe handelt, kann diese Verlagerung als grundsätzlich positive Entwicklung für die Ressourceneffizienz angesehen werden. Gleichwohl sollte eine noch deutlichere Senkung des Verbrauchs nicht-nachwachsender abiotischer Rohstoffe angestrebt werden.

Auf Bundesebene kam es zwischen 1994 und 2020 zu einer ähnlichen

Trendentwicklung, sowohl für biotische als auch abiotische Rohstoffe. Der Trend des biotischen Verbrauches liegt oberhalb der bayerischen Werte. Bei den abiotischen Verbräuchen zeigt sich hingegen, dass Bayern bis 2016 einen stärkeren Rückgang verzeichnen konnte als der Bund. Seit 2016 hat sich dieser Trend jedoch umgekehrt und der bayerische Verbrauchstrend liegt wieder oberhalb des Bundeswertes.

Rohstoffproduktivität

Der zuvor dargestellte Indikator des Rohstoffverbrauches erfasst den Materialeinsatz in der bayerischen Volkswirtschaft, berücksichtigt jedoch nicht, in welchem Umfang daraus Güter und Produkte bereitgestellt werden. Der Indikator der Rohstoffproduktivität stellt den Materialverbrauch in ein Verhältnis zum volkswirtschaftlichen Output. Konkret wird erfasst, wie viel Bruttowertschöpfung mit Hilfe der Rohstoffe geleistet wird. Im Rahmen dieser Darstellung wird, aufgrund der hohen Relevanz der Verbräuche, ausschließlich die abiotische Rohstoffproduktivität betrachtet.

Wie zuvor gezeigt, sind die absoluten abiotischen Materialverbräuche in den vergangenen Jahren nur geringfügig gesunken. Die Entwicklung der Rohstoffproduktivität in Abbildung 5 zeigt jedoch, dass es gelungen ist mit der etwa gleichen Rohstoffmenge deutlich mehr Güter und Produkte zu produzieren. Die bayerische Volkswirtschaft ist folglich deutlich rohstoffeffizienter geworden.

Vergleicht man das Basisjahr 1994 mit dem Wert für 2020 zeigt sich ein Anstieg um 76 %. Zum Vergleich, im selben Zeitraum stieg die abiotische Rohstoffproduktivität auf Bundesebene um etwa 64 % an.

Da sich der absolute Materialverbrauch nur geringfügig verändert hat, ist die

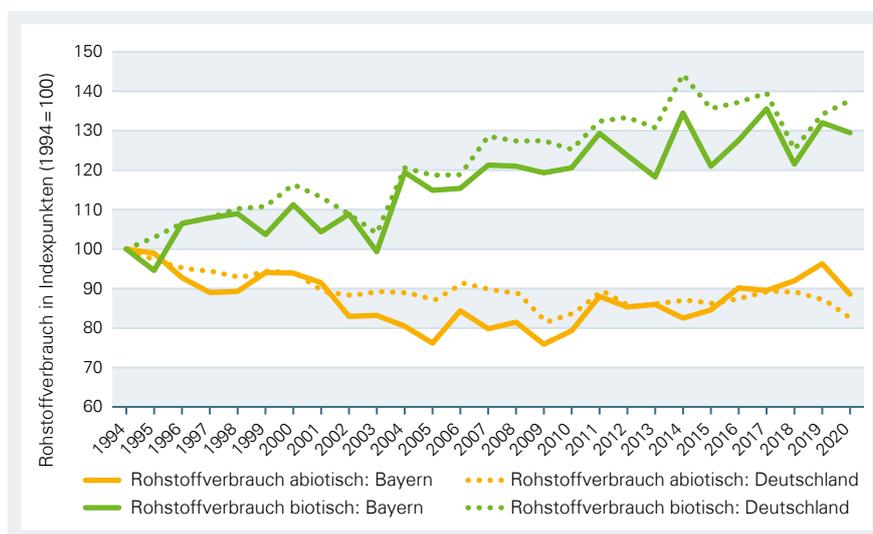


Abb. 4: Entwicklung des abiotischen und biotischen Rohstoffverbrauchs (DMI) in Bayern und Deutschland, gegenüber 1994 (=100)²⁸

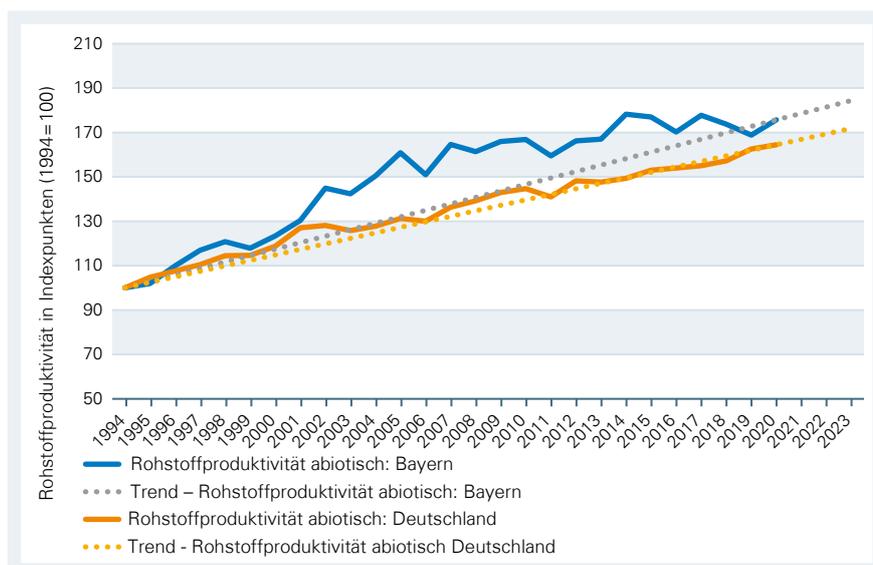


Abb. 5: Entwicklung der abiotischen Rohstoffproduktivität in Bayern und Deutschland, gegenüber 1994 (=100)²⁹

Entwicklung insbesondere auf das anhaltende Wirtschaftswachstum zurückzuführen. Im Zeitraum von 1994 bis 2020 wuchs die Wirtschaftsleistung Bayerns um 56 % (preisbereinigtes BIP). Damit ist in den letzten Jahren ein Trend zur relativen Entkopplung von Wirtschaftswachstum und Materialverbrauch erkennbar.

Außenhandel mit Rohstoffen

Eine Vielzahl relevanter Rohstoffe können nicht in Bayern und auch nicht in Deutschland, abgebaut werden. Die bayerische Volkswirtschaft ist auf Importe angewiesen, zum Beispiel von Erzen oder anderen Industriematerialien. Gleichzeitig exportiert Bayern Primärrohstoffe, Sekundärrohstoffe und weiterverarbeitete Rohmaterialien.

Auf der Grundlage verfügbarer Import- und Exportdaten können die Handelsverflechtungen Bayerns detailliert dargestellt werden (Abbildung 6). Im Jahr 2022 importierte Bayern Rohstoffe und Rohmaterialien im Wert von fast 9,2 Milliarden Euro. Der Export im gleichen Jahr liegt unterhalb dieses Wertes bei 8,7 Milliarden Euro.

Betrachtet man den Trend zwischen 2010 und 2020, lässt sich eine Zunahme sowohl des Import- als auch des Exportwertes feststellen. 2010 importierte Bayern Rohstoffe und Materialien im Wert von etwa 4,3 Milliarden Euro, im Jahr 2020 etwa 5,8 Milliarden Euro. Der Export stieg von 4,1 Milliarden auf etwa 5,2 Milliarden Euro. Im selben Zeitraum stieg auch der Anteil Bayerns an den bundesdeutschen Im- und Exporten.

In den Jahren 2021 und 2022 kam es zu einem sprunghaften Anstieg der Im- und Exportwerte für Bayern (gemessen in Euro). Der Importwert von Bayern stieg von 2020 auf 2021 um 47 %, der Exportwert um 55 %. Im selben Zeitraum blieb jedoch die tatsächlich gehandelte Menge an Rohstoffen und Materialien, gemessen in Tonnen, auf einem weitgehend konstanten Niveau (siehe Abbildung 7).

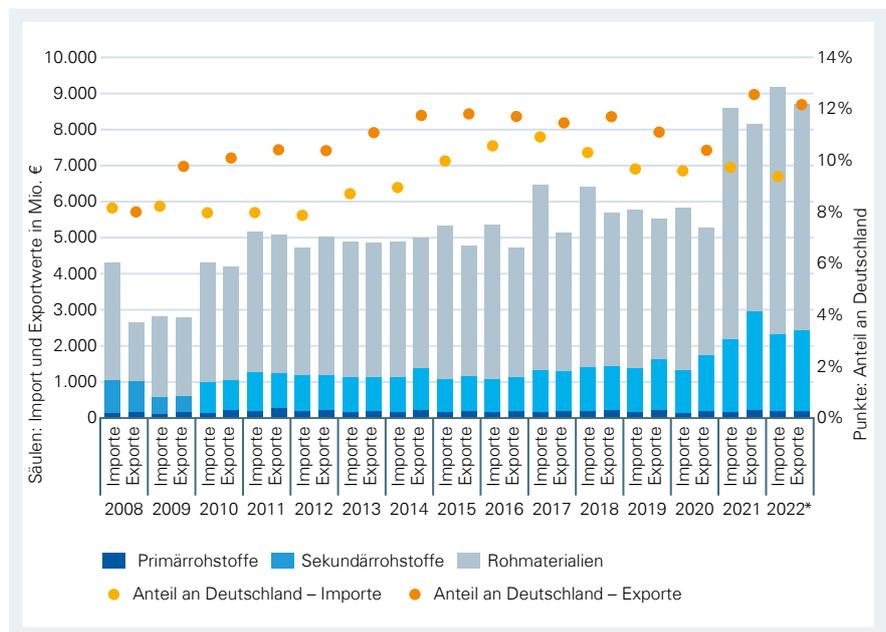


Abb. 6: Bayerns Außenhandel mit Rohstoffen und Rohmaterialien in Millionen Euro und Anteil an Deutschland in Prozent 2008–2022³⁰

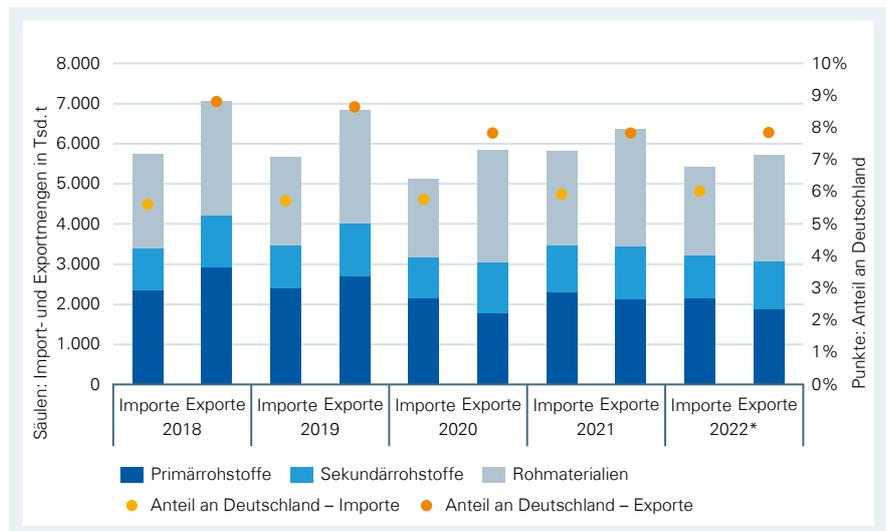


Abb. 7: Bayerns Außenhandel mit Rohstoffen und Rohmaterialien in Tausend Tonnen und Anteil an Deutschland in Prozent 2018–2022³¹

der Exportwert um 55 %. Im selben Zeitraum blieb jedoch die tatsächlich gehandelte Menge an Rohstoffen und Materialien, gemessen in Tonnen, auf einem weitgehend konstanten Niveau (siehe Abbildung 7).

Daraus wird deutlich, dass der Anstieg der Im- und Exporte maßgeblich auf

Preissteigerungen zurückzuführen ist, welche sich unter anderem auf die ökonomischen Implikationen der Coronapandemie und des russischen Angriffskriegs auf die Ukraine zurückführen lassen. Aus volkswirtschaftlicher Perspektive konnten die höheren Importpreise für Rohstoffe zwar durch höhere Exportpreise weitergegeben

werden. Für einzelne Betriebe wird jedoch deutlich, dass hohe Materialverbräuche mit ökonomischen Risiken verbunden sind, da auch in Zukunft weitere Preisschwankungen möglich sind.

Bayerns Import von Rohstoffen und Rohmaterialien

Die bayerische Volkswirtschaft ist auf den Import verschiedenster Rohstoffe und Materialien angewiesen. In Abbildung 8 werden die zehn Rohstoffe beziehungsweise Materialien dargestellt, die im Jahr 2021 jeweils den höchsten Anteil an der Importmenge in Tonnen und am Importwert in Euro (Abbildung 9) ausgemacht haben. Zusätzlich werden die jeweiligen Werte der Jahre 2009, 2013 und 2017 dargestellt.

Sowohl mit Blick auf die importierten Mengen als auch die Importwerte zeigt sich, dass Kunststoffe von besonderer Bedeutung sind und den mit Abstand größten Anteil ausmachen. Die Importmenge von Kunststoff ist seit 2009 um etwa 176 % gestiegen, gemessen in Euro stieg der Import sogar um 280 %. Dabei sind insbesondere Importe von Polyethylen, Propylen und Ethylen von hoher Bedeutung. Hohe Importmengen ergeben sich zusätzlich für Eisen und Stahl, die insbesondere im Fahrzeugbau, dem Maschinenbau sowie der Baubranche zum Einsatz kommen. Ebenfalls hohe Bedeutung hat der Import von Kalk, Quarz und Sand mit überwiegender Verwendung in der Baubranche. Jeweils zeigt sich eine deutliche Zunahme der importierten Mengen seit 2009. Im Allgemeinen sind diese Stoffe auch in Bayern verfügbar, weshalb vor allem wirtschaftliche Gründe für die Zunahme der Importmenge angenommen werden können. Blickt man auf die

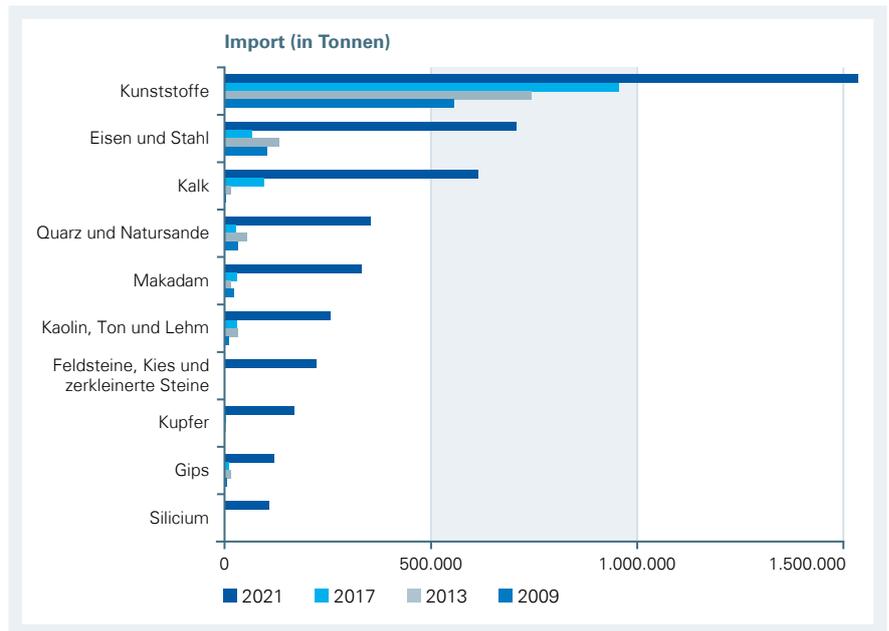


Abb. 8: Bayerns Top 10 Importe von Rohstoffen und Rohmaterialien in Tonnen 2009, 2013, 2017 und 2021³²

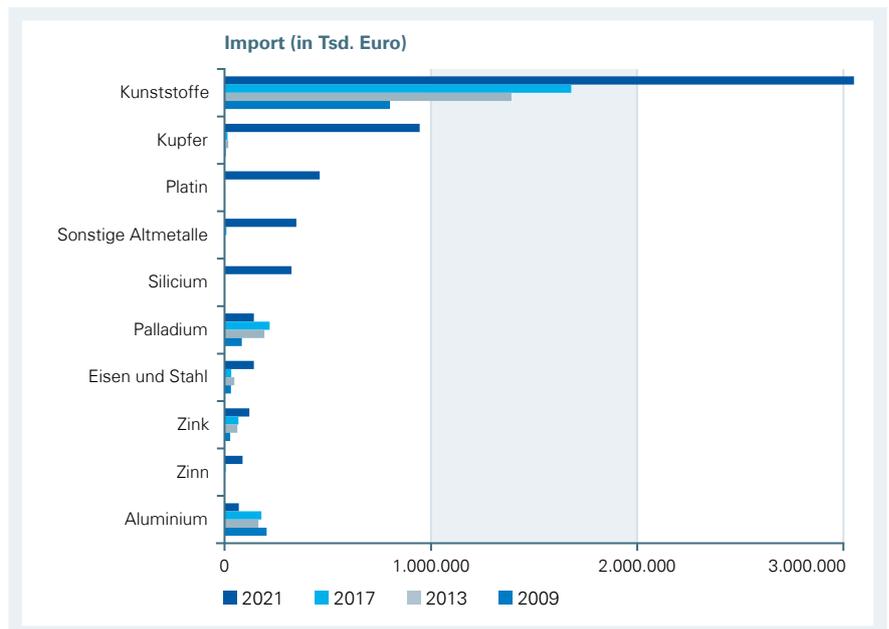


Abb. 9: Bayerns Top 10 Importe von Rohstoffen und Rohmaterialien in Tausend Euro 2009, 2013, 2017 und 2021³³

Importwerte, gemessen in Euro, wird die Relevanz von Kupfer- und Platinmetallen deutlich, die aufgrund höherer Preise einen gesteigerten Anteil an den Importwerten verzeichnen. Im Jahr 2021 ist der Importwert von Silizium, sowohl in Tonnen als auch in Euro,

gegenüber den Vorjahren deutlich gestiegen. Silizium ist ein Halbmetall, das von zentraler Bedeutung in der Elektronik ist. Aufbereitet und zu hochreinem Polysilizium verarbeitet, wird es bei der Herstellung von Solarzellen und Halbleitern verwendet.

Bayerns Export von Rohstoffen und Rohmaterialien

Die Verflechtung der bayerischen Wirtschaft in den internationalen Handel wird auch mit Blick auf die exportierten Rohstoffe und Materialien deutlich. In Abbildung 10 sind die jeweils relevantesten Exportmengen beziehungsweise Exportwerte der Jahre 2009, 2013, 2017 und 2021 dargestellt. Betrachtet werden mehrere Verarbeitungsgrade von Rohstoffen (z. B. Erze oder Metalle in Rohform) Metalle in Rohform) und Sekundärrohstoffen.

Der Export von Kunststoffen bestimmt ebenfalls deutlich den bayerischen Rohstoff- und Materialhandel. Gemessen in exportierten Mengen stieg der Wert von 2021 um 83 % gegenüber 2009. In Eurowerten erhöhte sich der Export um 96 %. In Hinblick auf die exportierten Mengen sind zudem Eisen und Stahl, Zement sowie Feldsteine von zentraler Bedeutung. Betrachtet man die Exportwerte, gemessen in Euro, überwiegt der Anteil der Metalle beziehungsweise Halbmetalle, darunter Platin, Silizium, Eisen und Stahl sowie Kupfer. Zwischen 2009 und 2021 sind die Exportwerte jeweils signifikant gestiegen.

Die zirkuläre Nutzungsrate

Die in den vorangegangenen Unterkapiteln thematisierten Verbrauchs- und Handelsströme Bayerns sind nicht nur für sich stehend relevante ökonomische Indikatoren, sondern spielen auch in der quantitativen Erfassung der Zirkularität der bayerischen Wirtschaft eine maßgebliche Rolle.

Die Europäische Kommission hat zur Messung der Kreislaufwirtschaft den Indikator der zirkulären Nutzungsrate (engl. Circular Material Use Rate – kurz: CMU) entwickelt. Mit Hilfe des

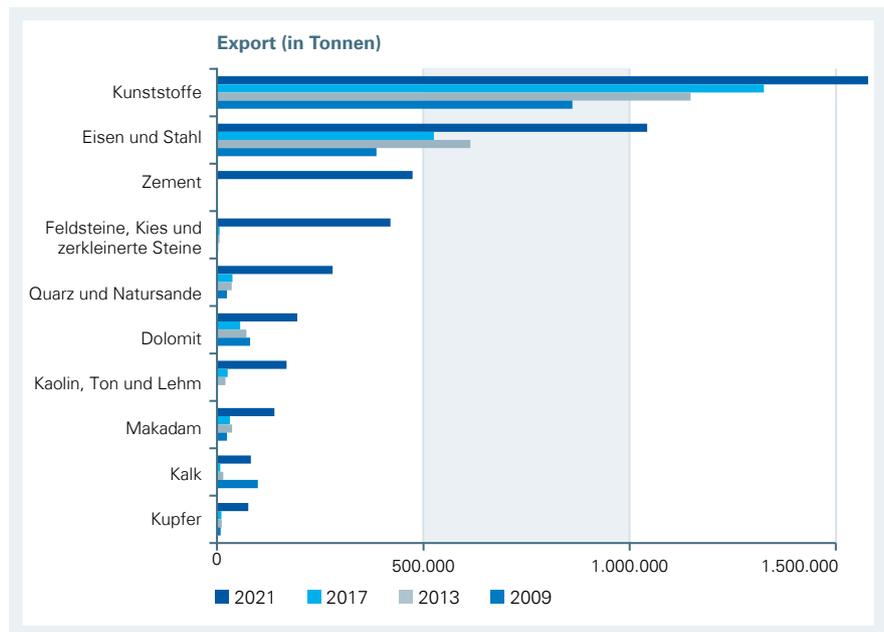


Abb. 10: Bayerns Export von Rohstoffen und Rohmaterialien in Tausend Euro und Tonnen 2009, 2013, 2017 und 2021³⁴

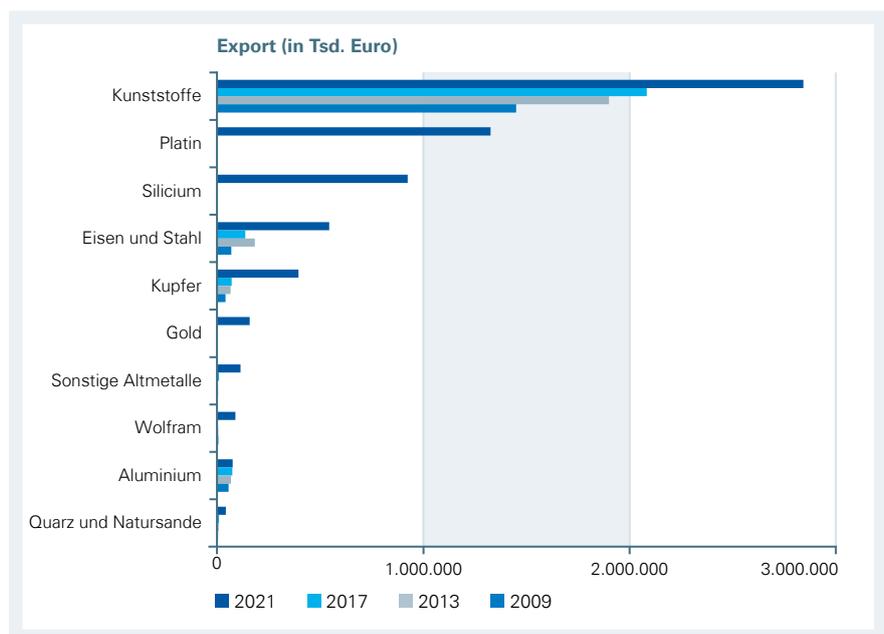


Abb. 11: Bayerns Export von Rohstoffen und Rohmaterialien in Tausend Euro und Tonnen 2009, 2013, 2017 und 2021³⁵

Indikators kann dargestellt werden, wie hoch der Anteil rezyklierter Materialien am gesamten Materialverbrauch eines Landes ist. Genauer misst der Indikator den Anteil der rückgewonnenen und in die Wirtschaft zurückfließenden Materialströme, mit Ausnahme von Wasser, relativ zum gesamten Material-

verbrauch, wodurch die Nutzung von Primärrohstoffen vermieden wird.³⁶ Damit unterscheidet sich die zirkuläre Nutzungsrate von den häufig betrachteten Recyclingquoten, die den Anteil der rückgewonnenen Abfälle an den gesamt erfassten Abfallmengen darstellen.

Die zirkuläre Nutzungsrate ist definiert als das Verhältnis der genutzten rezyklierten Materialien relativ zu der gesamten Ressourcennutzung:

$$CMU = U / M$$

(U = Menge rezyklierter Abfallstoffe, M = Menge der gesamtwirtschaftlichen Rohstoffnutzung)

Es ergeben sich zwei Möglichkeiten die zirkuläre Nutzungsrate zu erhöhen und darüber die Kreisläufe einer Volkswirtschaft weitgehend zu schließen. Zum einen kann die zirkuläre Nutzungsrate durch den erhöhten Einsatz recycelter Abfälle gesteigert werden. Zum anderen kann die Rate erhöht werden, indem Materialverbräuche gesenkt werden.

Grundlage für die CMU ist die sogenannte Materialflussanalyse, die sämtliche Materialinputs in eine Volkswirtschaft, deren weitere Nutzung und die anschließende letzte Verwendung aggregiert erfasst. In Abbildung 13 wurden die verfügbaren Daten der Umweltökonomischen Gesamtrechnung der Länder herangezogen, um die Materialflüsse darzustellen³⁷. Die Materialflüsse sind hierbei in Millionen Tonnen angegeben³⁸.

Ausgangspunkt sind 164 Millionen Tonnen Rohstoffe, die der bayerischen Umwelt entnommen werden („Extraktion“). Darunter fallen zum Beispiel fossile Energieträger, Metallerze, Biomasse und nicht-metallische mineralische Rohstoffe. Die Stoffstromgröße „Import“ setzt sich aus Bayerns Materialimporten aus dem Ausland in Höhe von 71,3 Millionen Tonnen und dem leicht negativen

Handelsbilanzsaldo aus dem inner-deutschen Handel von circa 5,5 Millionen Tonnen zu rund 77 Millionen Tonnen zusammen. In Summe ergibt dies 241 Millionen Tonnen an Materialien, die in die bayerische Volkswirtschaft gelangen, bezeichnet als „Direkter Materialeinsatz (DMI)“.

Zieht man die Materialexporte Bayerns ab, erhält man im nächsten Schritt den „Direkten Materialverbrauch (DMC)“, der tatsächlich in Bayern eingesetzt wird. Zuzüglich der Materialmengen, die aus der Vorperiode zurückgewonnen wurden, ergibt sich die Stoffstromgröße „Verarbeitetes Material“ (DMC + Rücklauf).

Das verarbeitete Material teilt sich in zwei Bestandteile auf, welche vom Rohstoff und der Art des Einsatzes der Letztverwendungen abhängen.

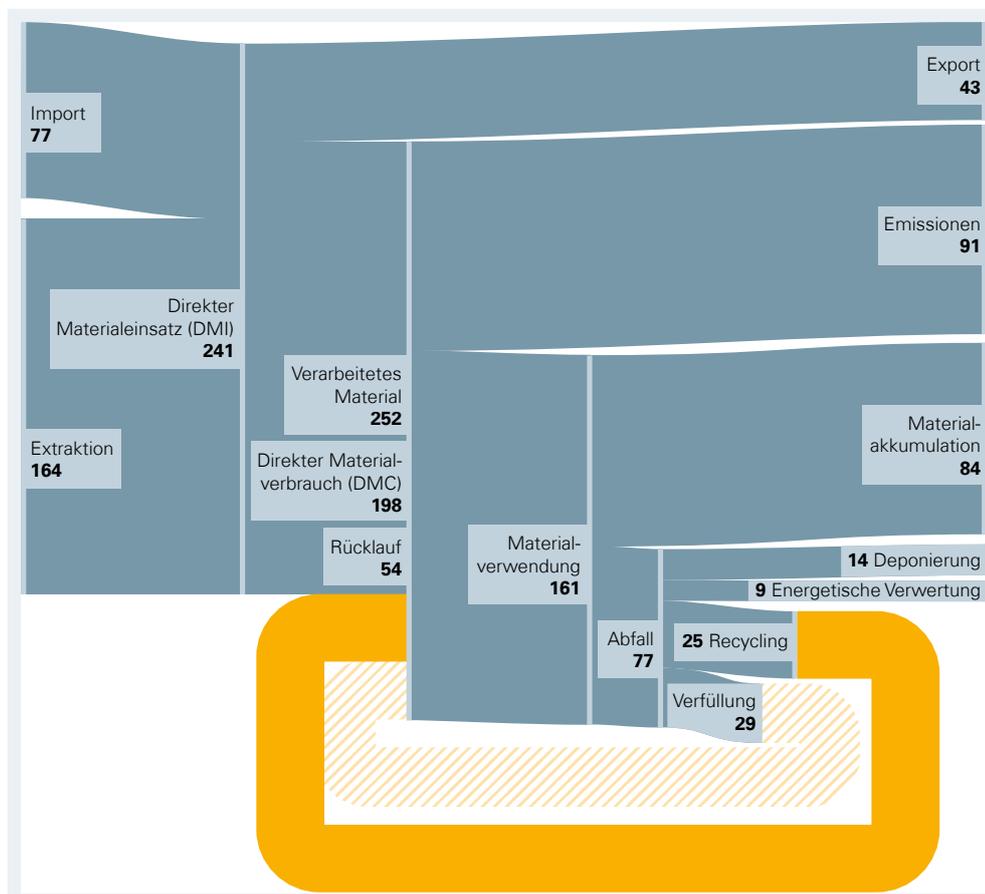


Abb. 12: Zusammenfassung der Materialflüsse auf Basis der Umweltökonomischen Gesamtrechnung der Länder und verfügbaren Abfalldaten für 2020 in Millionen Tonnen⁴⁰

Hinweis: Die Berechnung der CMU wird nicht durch die Darstellung der Verfüllung beeinträchtigt. Verfüllung ist nach § 3 KrWG eine stoffliche Verwertung, aber kein Recycling. Bei einer Verfüllung handelt es sich um geeignete mineralische, nicht gefährliche Abfälle, die i. d. R. zur Rekultivierung von Abgrabungen mineralischer Baustoffe verwendet werden (§ 3 Abs. 25a KrWG). Materialien, die verfüllt wurden, kehren nicht in den Stoffkreislauf zurück.

- Der erste Bestandteil des verarbeiteten Materials ist die Materialverwendung, welche sich wiederum in zwei Materialströme unterteilt. Der erste Materialstrom ist die sogenannte Materialakkumulation (auch als anthropogene Bestände bezeichnet). Darunter werden verbaute Materialmengen verstanden, etwa in Form von Gebäuden, oder in Gütern, wie zum Beispiel Fahrzeugen. Die eingesetzten Materialien sind dort gebunden und stehen erst nach Rückbau beziehungsweise Recycling zum Teil einer neuen Nutzung zu Verfügung. Im Jahr 2020 wurden in Bayern circa 84 Millionen Tonnen an Materialien verbaut. Der zweite Materialstrom, den die Materialverwendung umfasst, ist die Abfallmenge. Die Nutzung verschiedenster Güter und Produkte übersetzt sich nach deren Produktlebensende in aufkommende Abfälle. Im Jahr 2020 betrug der Abfallanteil am bayerischen Materialverbrauch circa 77 Millionen Tonnen, der recycelt, verwertet oder beseitigt wurde. Die Menge der recycelten Materialien beziehungsweise rezyklierten Abfallstoffe betrug im Jahr 2020 etwa 25 Millionen Tonnen.
- Der zweite Bestandteil umfasst die Gesamtemissionen in Höhe von circa 91,3 Millionen Tonnen an CO₂-Äquivalenten. Die Emissionen sind im Wesentlichen auf den Anteil fossiler Energieträger zurückzuführen, die als Teil der verarbeiteten Materialien erfasst werden. Diese werden im Zuge verschiedener Prozesse eingesetzt und zum Beispiel verbrannt, wobei Emissionen an die Atmosphäre abgegeben werden. Beispielhaft importiert Bayern in großem Umfang Mineralöle, die zu Treibstoffen weiterverarbeitet werden. Durch den Verbrennungsprozess

in Fahrzeugen werden Emissionen freigesetzt, die als Letztverwendung in der Materialflussrechnung bilanziert werden.

Im Kontext der vorangegangenen Materialflussanalyse kann die zirkuläre Nutzungsrate bestimmt werden, indem die Recyclingmenge (25 Millionen Tonnen) durch den DMC und die Recyclingmenge (insgesamt 223 (198 + 25) Millionen Tonnen) geteilt wird. Für Bayern ergibt sich eine **zirkuläre Nutzungsrate von knapp 11,3 %**. Der bundesdeutsche Wert liegt bei 12,9 %.³⁹ Die Gründe hierfür sind vielschichtig und werden durch verschiedenste Faktoren beeinflusst. Einen großen Einfluss auf die CMU hat die Abfallfraktion der Bau- und Abbruchabfälle. Der relative Gewichtsanteil dieser Abfallfraktion ist in Bayern mit circa zwei Dritteln am Gesamtabfallaufkommen sehr hoch und liegt deutlich über dem bundesweiten Anteil. Da die Abfallfraktion

der Bau- und Abbruchabfälle eine im Vergleich zu den anderen Abfallfraktionen niedrigere Recyclingquote aufweist, verringert dies aufgrund des hohen Anteils am Gesamtabfallaufkommen (im Vergleich zum bundesweiten Gesamtabfallaufkommen) die bayerische CMU.

Allgemein ist zu beachten, dass die CMU keine Aussage über die Höhe des Gesamtabfallaufkommens zulässt beziehungsweise diese nicht berücksichtigt. Darüber hinaus ist zu erwähnen, dass Produkte und Güter, die repariert oder anderweitig aufbereitet werden und somit nicht dem Abfallsystem zugeführt werden, keine Auswirkungen auf die CMU haben. Die CMU ist ein wichtiger Indikator für die Beurteilung einer Kreislaufwirtschaft, jedoch ist die Berücksichtigung weiterer Kennzahlen, wie beispielsweise dem Abfallaufkommen oder der Menge reparierter Güter, für eine differenzierte Beurteilung der Kreislaufwirtschaft notwendig.

Exkurs: THG-Emissionen

Ein wesentlicher Treiber der bayerischen Gesamtemissionen von 91,3 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalente (2020) sind die drei Massmetalle Stahl, Aluminium und Kupfer. Die mit ihrer Verwendung einhergehenden rohstoffbedingten THG-Emissionen lassen sich auf Basis der Umweltökonomischen Gesamtrechnung auf etwa 36 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalente beziffern.⁴¹ Dabei wird von einer vollständigen Primärrohstoffnutzung ausgegangen. Berücksichtigt man hingegen, dass ein Anteil der inländischen Verwendung durch Sekundärrohstoffe gedeckt wird und schätzt diesen Anteil mittels der entsprechenden europäischen „End-of-Life Recycling Input Rate“⁴² (EOL-RIR) der Rohstoffe, verringern sich die rohstoffbedingten THG-Emissionen auf circa 23 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalente. Dieses Rechenbeispiel zeigt, dass eine gesteigerte Sekundärrohstoffverwendung beziehungsweise gesteigerte CMU wesentlich zu einer geringeren Umweltbelastung durch die Rohstoffverwendung beitragen kann, da so unter anderem deutlich verringerte rohstoffbedingte THG-Emissionen möglich sind. Eine theoretisch mögliche vollständige Sekundärrohstoffnutzung der drei genannten Massmetalle würde zusätzlich knapp 16 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalente gegenüber der aktuellen Verwendung an Sekundärrohstoffen einsparen. Folglich würden nur noch etwas über 7 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalente entstehen, was einer Einsparung von circa 68 % im Vergleich zu den Emissionen mit den heutigen Sekundäranteilen entspräche.



Potenziale aufdecken – Schlüsselrohstoffe für die bayerische Wirtschaft

Ein großer Teil des Bedarfs an Rohstoffen in Bayern wird durch Rohstoffimporte gedeckt. Doch welche Rohstoffe sind dabei für die bayerische Industrie von zentraler Bedeutung und wie sind diese im Kontext der Ressourceneffizienz einzuordnen?

Das vorliegende Kapitel „Potenziale aufdecken“ beleuchtet die wichtigsten abiotischen Rohstoffe für die bayerische Industrie im Detail (Rohstoffversorgung, Umweltauswirkungen, Nachfrage und Rohstoffpreis) und zeigt so die relevanten Stellschrauben für mehr Ressourceneffizienz auf. Dabei wird auch eine Einschätzung zum Rohstoffrisiko für jeden Rohstoff abgegeben und die Umweltauswirkung differenziert über die Indikatoren THG-Emissionsfaktor, kumulierter Rohstoffaufwand sowie kumulierter Energieaufwand betrachtet.

Industrierohstoffe im Überblick

Aluminium, Eisen und Stahl sowie Kupfer gehören mengenmäßig zu den bedeutendsten Rohstoffen. Der industrielle Ressourcenbedarf umfasst allerdings eine Vielzahl weiterer Rohstoffe mit großer Bedeutung für die bayerische Wertschöpfung.

Die Tabelle 2 „Zentrale Industrierohstoffe im Überblick“ gibt einen Überblick über die wesentlichen industriell genutzten Rohstoffe in Bayern. Verschiedene Indikatoren entlang der Kategorien Rohstoffversorgung, Umweltauswirkungen, Nachfrage und Rohstoffpreis quantifizieren die jeweilige Notwendigkeit, Ressourcen einzusparen. Dies ist besonders relevant für Rohstoffe mit einer hohen Nachfrage und Bedeutung für wichtige Schlüsselbranchen, hohen oder besonders volatilen Preisen, einer kritischen Rohstoffversorgung oder Recyclingfähigkeit sowie für Rohstoffe mit einer hohen Umweltauswirkung.

Für eine anschauliche Darstellung wurden die jeweiligen Ergebnisse bei

den verschiedenen Indikatoren anhand eines Ampelsystems eingefärbt. Die rote Einfärbung kennzeichnet kritische Indikatorwerte, die grüne unkritische. Die gelbe Einfärbung stellt den Zwischenbereich zwischen kritisch und unkritisch dar. Bei den quantitativ bemessenen Indikatoren (Umweltauswirkungen, Nachfrage, Rohstoffpreis, Recyclingfähigkeit) erfolgte die Einfärbung der Rohstoffe anhand ihrer jeweiligen Werte. Bei allen quantitativen Indikatoren stehen hohe Werte für eine hohe Relevanz von Ressourceneffizienz. Daher erhielt je Indikator das erste Drittel der Rohstoffe mit den jeweils höchsten Werten eine rote Einfärbung, das zweite Drittel eine gelbe und das Drittel mit den niedrigsten Werten eine grüne. Die qualitativen Indikatoren der Rohstoffversorgung (Rohstoffrisiko, Recycling und Substituierbarkeit) wurden ebenfalls anhand einer dreistufigen Skala bewertet und entsprechend eingefärbt.

Die Auswertung basiert auf einer Meta-Analyse ausgewiesener Studien⁴³. Berücksichtigt wurden abiotische Rohstoffe zur stofflichen Nutzung. Dabei werden die folgenden Aspekte in den Blick genommen:

Rohstoffversorgung

- Das **Rohstoffrisiko** stellt das Versorgungsrisiko dar. Die Zuordnung „Hoch“, „Mittel“ und „Niedrig“ basiert auf Indexwerten, die die wesentlichen Risikofaktoren zusammenfassen. Eingehende Indikatoren sind beispielsweise die Konzentration eines Rohstoffes auf wenige Länder oder Unternehmen und die Risiken bezüglich der politischen Stabilität der Abbauländer.⁴⁴
- Die **Recyclingfähigkeit** eines Rohstoffes ist abhängig von technologischen Möglichkeiten, der Wirtschaftlichkeit der Technologie als auch von der konkurrierenden Preisentwicklung des Primärrohstoffes. Die Zuordnung entspricht der „End-of-Life“ Recycling-Input-Quote⁴⁵. Bei einem Wert von 10 % oder mehr kann von einer „etablierten“ Recyclingfähigkeit gesprochen werden, bei 1 bis 10 % von „gering“, und bei kleiner als 1 % von „kaum bis gar nicht“.
- Die **Substituierbarkeit** eines Rohstoffes ist abhängig von den Leistungseigenschaften und Rohstoffrisiken möglicher Alternativrohstoffe und der Wirtschaftlichkeit.⁴⁶

Umweltauswirkungen

Mit dem Abbau und der Nutzung gehen verschiedene Umweltauswirkungen einher. Sie reichen von stoffimmanenten Umweltauswirkungen (zum Beispiel Toxizität), über Flächenverbrauch, Freisetzung von Treibhausgasen bei der Förderung und Produktion von Rohstoffen und weiteren Umweltauswirkungen in den Abbaubereichen sowie Material- und Energieverbräuchen in der Erzeugung der Rohstoffe bis hin zur Entsorgung. Diese vielschichtigen Effekte können nur schwerlich überblicksartig dargestellt werden, da es an umfassenden Datenquellen fehlt. Daher werden die drei Indikatoren Treibhausgas-Emissionsfaktor (kurz: THG-Emissionsfaktor), kumulierter Rohstoffaufwand (KRA) und kumulierter Energieaufwand (KEA) betrachtet. Da sich die Rohstoffe in ihren Eigenschaften und folglich auch die Größenordnung der drei genannten Umweltbelastungsindikatoren stark unterscheiden, ergibt eine Betrachtung der Mittelwerte der drei Indikatoren zum Vergleich der Rohstoffe wenig Aufschluss. Einige wenige Rohstoffe mit besonders niedrigem/hohem THG-Emissionsfaktor, KRA oder KEA würden den Rohstoffvergleich verzerren (dies zeigt sich beim Vergleich des Medians mit dem Mittelwert). Daher erfolgt die Einordnung der Größenordnung der drei Umweltbelastungsindikatoren nicht über Mittelwerte, sondern über den Median. Bei dieser Vorgehensweise muss darauf hingewiesen werden, dass für einige Rohstoffe keine Angaben zu deren THG-Emissionsfaktor, KRA oder KEA vorliegen. Jene Rohstoffe werden bei der Ermittlung des Medians nicht berücksichtigt, da lediglich eine ungefähre Einordnung der Rohstoffe und des entsprechenden Niveaus der Umweltbelastungsindikatoren vorgenommen wird.

- Der **Treibhausgas-Emissionsfaktor** (THG-Emissionsfaktor) ist ein Indikator, welcher die Freisetzung von Treibhausgasen für die Herstellung eines Rohstoffes oder Produktes angibt. Hierbei werden die verschiedenen Wertschöpfungsschritte im Lebenszyklus eines Rohstoffes oder Produktes in die THG-Emissionsbilanz einbezogen. Die THG-Emissionsbilanz beziehungsweise der daraus berechnete THG-Emissionsfaktor bezieht sich auf den so genannten „cradle-to-gate“-Ansatz, bei dem alle Emissionen von der Förderung bis zur finalen Bereitstellung beziehungsweise bis zum Verkauf des jeweiligen Rohstoffes berücksichtigt werden. Der THG-Emissionsfaktor wird in Tonnen CO₂-Äquivalenten je Tonne des Rohstoffes angegeben.⁴⁷ Der Median des THG-Emissionsfaktors liegt bei 10,08 Tonnen CO₂-Äquivalenten je Tonne des betrachteten Rohstoffes (im Vergleich: der Mittelwert liegt bei 5.245 Tonnen CO₂-Äquivalenten).

Umweltauswirkungen

- Der **kumulierte Rohstoffaufwand (KRA)** stellt einen Indikator für den stofflichen Aufwand, der mit der Rohstoffherzeugung und -bereitstellung einhergeht, dar. Konkret beziffert er die Summe aller Rohstoffaufwendungen, die zur Bereitstellung des betrachteten Rohstoffes benötigt werden. Die Angabe erfolgt in Tonnen aufgewendeter Rohstoffe je Tonne (bereitgestellter Rohstoff).⁴⁸ Der Median des kumulierten Rohstoffaufwandes liegt bei 13,58 Tonnen aufgewendeter Rohstoffe je Tonne des betrachteten Rohstoffes (im Vergleich: der Mittelwert liegt bei 40.122 Tonnen aufgewendeter Rohstoffe je Tonne des betrachteten Rohstoffes).
- Der **kumulierte Energieaufwand (KEA)** ist die Summe aller Primärenergieaufwendungen zur Bereitstellung eines Rohstoffes in Gigajoule je bereitgestellte Tonne.⁴⁹ Der Median des kumulierten Energieaufwandes liegt bei 52,41 Gigajoule je Tonne des betrachteten Rohstoffes (im Vergleich: der Mittelwert liegt bei 33.026 Gigajoule je Tonne des betrachteten Rohstoffes).

Nachfrage

- Die **Importnachfrage** wird durch das durchschnittliche jährliche Importvolumen Bayerns (in Tausend Euro) von 2013 bis 2022 abgebildet.⁵⁰

Rohstoffpreis

- Die **Preisentwicklung** weist die nominale jährliche Preisentwicklung der letzten 25 Jahre, daher zwischen 1997 und 2022, in Prozent aus. Zur Glättung der Preisschwankungen (siehe nächster Indikator), und damit zur Prävention von Fehlinterpretationen bei der Preisentwicklung eines Rohstoffes, wurden die Rohstoffpreise der zwei vorangegangenen Jahre (1995 und 1996) des ersten Jahres (1997) im Betrachtungszeitraum berücksichtigt und somit ein über drei Jahre gemittelter Rohstoffpreis berechnet. Analog wurde bei der Ermittlung des letzten Rohstoffpreises (2022) im Betrachtungszeitraum vorgegangen. Hier wurde der Mittelwert aus den Rohstoffpreisen der Jahre 2020, 2021 und 2022 bestimmt. Das Verhältnis der beiden gemittelten Rohstoffpreise zu Beginn und zu Ende des Betrachtungszeitraums stellt die Preisentwicklung dar. Aufgrund dieser Berechnungsmethodik werden in den Grafiken zur Preisentwicklung der Rohstoffe Werte im Zeitraum von 1995 bis 2022 angegeben. Aufgrund von Datenlücken wurde der Betrachtungs- beziehungsweise Berechnungszeitraum (1997–2022) bei einigen Rohstoffen verkürzt, sodass die Preissteigerung über weniger als 25 Jahre berechnet wurde. Die betroffenen Rohstoffe wurden entsprechend mit einem Sternchen markiert.⁵¹
- Die **historische Volatilität** drückt den Umfang der Preisschwankungen für den Betrachtungszeitraum von 1997 bis 2022 aus. Diese wurden mittels der Standardabweichung der jährlichen logarithmischen Preisveränderungen beziehungsweise jährlichen Volatilitäten zwischen 1997 und 2022 berechnet. Es wird darauf hingewiesen, dass dies nicht dem Mittelwert der jährlichen logarithmischen Preisveränderungen beziehungsweise Volatilitäten entspricht. Hierbei bietet die Standardabweichung im Vergleich zum Mittelwert den Vorteil, dass sie Aufschluss darüber gibt, wie stark die Werte um den Durchschnitt streuen. Aufgrund von Datenlücken wurde der Betrachtungs- beziehungsweise Berechnungszeitraum (1997–2022) bei einigen Rohstoffen verkürzt, sodass die historische Volatilität über weniger als 25 Jahre berechnet wurde. Die betroffenen Rohstoffe wurden in der Rohstofftabelle entsprechend mit einem Sternchen markiert.⁵²

Rohstoff	Rohstoffversorgung			Umweltbelastung		
	Rohstoff-Risiko	Recycling	Substituierbarkeit	THG-Emissionsfaktor (t O ₂ -Äquivalente/t)	Kumulierter Rohstoffaufwand (t/t)	Kumulierter Energieaufwand (GJ/t)
Aluminium	● Hoch	● Etabliert	● Gut	● 10	● 10	● 141
Antimon	● Hoch	● Etabliert	● Gut	● 8.52		
Baryt	● Mittel	● Kaum-nicht	● Gut	● 0.0963	● 9	● 3
Bentonit	● Niedrig	● Etabliert	● Gut	● 0.0472	● 1	● 0.4
Beryllium	● Hoch	● Kaum-nicht	● Mittel			
Blei	● Mittel	● Etabliert	● Mittel	● 1.36	● 10	● 21
Cadmium	● Mittel	● Etabliert	● Gut	● 9900		
Chrom	● Mittel	● Etabliert	● Gut	● 27.35	● 22	● 484
Dysprosium*	● Hoch	● Kaum-nicht	● Mittel			
Eisen/Stahl	● Mittel	● Etabliert	● Gut	● 1.76	● 4	● 21
Feldspat	● Mittel	● Gering	● Mittel	● 0		
Fluorit	● Hoch	● Gering	● Gut	● 120.4	● 1	● 1
Gallium	● Hoch	● Kaum-nicht	● Mittel	● 170.02	● 1667	● 2.707
Germanium	● Hoch	● Gering	● Gut			
Gips/Anhydrit	● Niedrig	● Gering	● Gut	● 0.00751	● 1	● 0.03
Glimmer*	● Niedrig			● 77.61	● 1	● 0.4
Gold	● Niedrig	● Gering	● Mittel	● 47790.29	● 740.318	● 261.210
Graphit	● Hoch	● Gering		● 0.0692	● 1	● 0.4
Indium*	● Hoch	● Gering	● Mittel	● 117.52	● 25.744	● 1.982
Kalisalz (Kali)*	● Mittel	● Kaum-nicht	● Mittel	● 0.0268	● 8	● 5
Kaolin	● Mittel	● Etabliert	● Gut	● 0.21	● 5	● 3
Kobalt	● Hoch	● Etabliert	● Mittel	● 47.62	● 57	● 103
Kupfer	● Hoch	● Etabliert	● Gut	● 6.66	● 128	● 50
Lithium	● Hoch	● Kaum-nicht	● Mittel	● 79.29	● 13	● 307
Magnesium	● Hoch	● Etabliert	● Gut	● 28.81	● 5	● 146
Mangan*	● Hoch	● Gering	● Schlecht	● 5.48	● 8	● 48
Molybdän	● Mittel	● Etabliert	● Schlecht	● 17.07	● 989	● 149
Neodymium*	● Hoch	● Gering	● Mittel	● 45		
Nickel	● Hoch	● Etabliert	● Gut	● 19.89	● 133	● 158
Niob	● Hoch	● Kaum-nicht	● Gut	● 0.18	● 14	● 4
Palladium*	● Hoch	● Etabliert	● Mittel	● 11227.61	● 22.435	● 143.552
Phosphorit/Phosphate	● Hoch	● Etabliert	● Mittel	● 0.18	● 28	● 4
Platin	● Hoch	● Etabliert	● Mittel	● 69410.02	● 190.053	● 251.888
Quarzsand	● Niedrig		● Mittel	● 0.24	● 1	● 0.3

* Preisentwicklung und historische Volatilität gehen auf kürzeren/anderen Zeitraum zurück, da die Daten lückenhaft sind bzw. nicht für 2022 vorliegen.

Nachfrage	Rohstoffpreis		Anwendungsbereiche / Produktbeispiele
	Ø Importnachfrage Bayerns (in Tsd. €) i. Z. 2013–2022	Preisentwicklung in % i. Z. 1997–2022	
● 499.965	● 62 %	● 18 %	Kraftfahr- u. Flugzeugbau, Maschinenbau, Elektrotechnik
● 175	● 223 %	● 25 %	Batterien, Halbleiter, Legierungselement
● 3.424	● 295 %	● 16 %	Chemikalien
	● 342 %	● 18 %	Gießerei-Industrie, Pelletierung von Eisenerzen, Katalysator u. Füllstoff in der Chemischen Industrie
● 1	● -20 %	● 39 %	Elektronik- u. IT-Produkte, Elektromobilität, metallverarbeitende Industrie
● 27.457	● 103 %	● 16 %	Akkumulatoren, Legierungen, Elektrotechnik
● 14	● 3 %	● 43 %	Solarzellen, Halbleiter
● 2.979	● 264 %	● 30 %	Edelstahl u. Superlegierungen, Chromchemikalien u. -farbstoffe, Gießereisande
	● 55 %	● 20 %	Magnete, E-PKW, Windkraft
● 223.811	● 299 %	● 17 %	Fahrzeugbau, Maschinen- u. Anlagenbau, Stahl
● 6.145	● 114 %	● 18 %	Seifen- u. Scheuermittel, Emaille, Lacke, Farben, Klebstoffe, Gummi, Kunststoffe, Seifen- u. Reinigungspasten
● 8	● 13 %	● 36 %	Fritten, Emailien, Glasuren, für Gläser für Linsen u. Prismen, Beschichtungsmaterialien.
● 40	● 40 %	● 24 %	Elektrokleingeräte, Dünnschicht-Photovoltaik, Legierungen, Displays
● 341	● -27 %	● 29 %	Glasfaser, IR-Technologien, Halbleiter, Katalysator für Polymererzeugung
● 4.057	● 47 %	● 12 %	Bindemittel für Innenausbau u. Tiefbau, Abbindeverzögerer von Zement, Chemierohstoff
● 2.348	● 124 %	● 13 %	Farb- und Putzzusatz, Isoliermaterial, Korrosionsschutzgrundierungen, Kosmetikartikel
● 468.343	● 387 %	● 13 %	Elektroindustrie (Kontakte)
	● 154 %	● 14 %	Brennstoffzellen, Kunststoffe, Schmelzriegel, Elektrodenmaterial in Batterien, Bremsbeläge (Schmiermittel)
● 264	● 7 %	● 40 %	Optik, Elektronik, Photovoltaik, Flachbildschirme, Niedrigtemperaturlegierungen, Halbleiter
	● 170 %	● 20 %	Infusions- u. Dialyselösungen, Hilfsstoff in der Glas- u. Aluminiumindustrie
● 33.242	● 84 %	● 17 %	Adsorptionsmittel, zur Synthese von Aluminium, Herstellung von Spezialzementen
● 5.720	● 3 %	● 38 %	Batterien, Superlegierungen, Magnete, Hartmetalle, Pigmente, Katalysatoren in der Petrochemie, E-Mobilität
● 1115.997	● 219 %	● 23 %	Elektroindustrie, RFID, Windkraft, Elektromobilität, Maschinenanlagenbau, Schienenverkehr, Legierungen
● 139	● 341 %	● 43 %	Akkumulatoren, Batterien, Metallurgie, E-Mobilität, Hochleistungsschmierstoffe, Legierungen
● 29.927	● 148 %	● 23 %	Metallurgie, chemische Industrie, Dosenverpackungen, Karosseriebau, Unterhaltungselektronik, Maschinenbauteile
● 734	● 124 %	● 30 %	Batterien, Stahlveredler, Widerstandslegierungen, Magnetwerkstoffe
● 1.036	● 168 %	● 41 %	Edelstahlindustrie, Werkzeug- u. Schnelldrehstahl, C-Stahl, Superlegierungen, Flugzeug- und Fahrzeugbau
	● 58 %	● 50 %	Magnete, Lasertechnik, Glas- u. Porzellanfärbung, E-PKW, Windkraft
● 22.585	● 153 %	● 31 %	Stahlveredler, Superlegierungen, Gasturbinen, Metallüberzüge, Katalysatoren, Batterien
● 187	● 126 %	● 12 %	Superlegierungen, Edelstahl, Elektronik, Turbinen, Stahlveredelung
● 193.743	● -14 %	● 16 %	Autoindustrie, Brennstoffzellen, Autokatalysatoren, Elektrotechnik
● 444	● 258 %	● 24 %	Düngemittel, Phosphorsäure
● 546.298	● 294 %	● 36 %	Katalysatoren, Elektroniksektor, Brennstoffzellen
● 13.844	● -44 %	● 18 %	Gießerei-Industrie, Glasfasern

Tabelle 2: Zentrale Industrierohstoffe im Überblick⁵³

Rohstoff	Rohstoffversorgung			Umweltbelastung		
	Rohstoff-Risiko	Recycling	Substituierbarkeit	THG-Emissionsfaktor (t O ₂ -Äquivalente/t)	Kumulierter Rohstoffaufwand (t/t)	Kumulierter Energieaufwand (GJ/t)
Rhodium*	● Hoch		● Mittel	● 80426.88	● 485.206	● 551.719
Scandium*	● Hoch	● Kaum-nicht	● Gut			
Schwefel	● Niedrig	● Kaum-nicht	● Mittel	● 0.13	● 0.1	● 5
Selen	● Mittel	● Gering	● Gut	● 3.41	● 4	● 35
Seltene Erden*	● Hoch	● Gering				
Silber	● Mittel	● Gering	● Mittel	● 449.39	● 6.835	● 1.668
Silizium	● Hoch	● Kaum-nicht	● Mittel	● 77.61	● 38	● 1.417
Tantal	● Hoch	● Etabliert	● Mittel	● 166.03	● 9.180	● 3.356
Titan	● Mittel	● Gering	● Gut	● 50.86	● 40	● 18
Vanadium	● Hoch	● Gering	● Gut			
Wolfram	● Hoch	● Etabliert	● Mittel	● 5.53	● 343	● 52
Yttrium*	● Hoch	● Etabliert	● Gut			
Zink	● Mittel	● Etabliert	● Gut	● 2.72	● 14	● 42
Zinn	● Hoch	● Etabliert	● Gut	● 10.15	● 1.179	● 264
Zirkon	● Mittel	● Etabliert	● Mittel	● 0.32		

Ausgewählte Schlüsselrohstoffe für die bayerische Industrie

Auf Basis der Rohstoffanalyse lassen sich zwölf Schlüsselrohstoffe für Bayern identifizieren, bei denen eine effiziente Nutzung besonders geboten ist. Sie sind einerseits für die bayerische Industrie von herausragender Bedeutung und stechen andererseits in der kombinierten Betrachtung der folgenden Merkmale hervor:

- sehr hohe Importnachfrage (Volumenrohstoffe)
- hohes Versorgungsrisiko (Risikorohstoffe)
- besondere Relevanz für Zukunftstechnologien (Zukunftrohstoffe)

Dabei muss betont werden, dass durch die Fokussierung auf zwölf wichtige Rohstoffe im Rahmen dieser Studie keine allgemeingültige Klassifizierung vorgenommen und keine Aussage über die übrigen Rohstoffe getroffen wird. Ressourceneffizienz ist auch bei vielen weiteren Rohstoffen von Bedeutung. Beispielsweise umfasst die aktuelle Liste der kritischen Rohstoffe der EU 34 Rohstoffe⁵⁴. Aus diesem Grund werden in der vorangegangenen Tabelle (Tabelle 2 „Zentrale Industrierohstoffe im Überblick“) auch deutlich mehr Rohstoffe betrachtet.

Die zwölf Schlüsselrohstoffe werden im Folgenden einzeln vorgestellt. Neben übergreifenden Informationen zur Verwendung der Rohstoffe sowie Fakten und Informationen mit Bezug zur Ressourceneffizienz wird auch die Importnachfrage für Bayern aufgezeigt. Diese stellt auf Bundeslandebene die beste Datenbasis zur Veranschaulichung der Nachfrage eines spezifi-

Nachfrage		Rohstoffpreis		Anwendungsbereiche / Produktbeispiele
Ø Importnachfrage Bayerns (in Tsd. €) i. Z. 2013–2022	Preisentwicklung in % i. Z. 1997–2022	Historische Volatilität i. Z. 1997–2022		
● 14.732	● 179 %	● 51 %		Katalysatoren, Elektrotechnik
	● 5 %	● 4 %		Flugzeugbau, SOFC-Brennstoffzellen
● 18.692	● 133 %	● 145 %		Schwefelsäure, Farbstoffe, Insektizide
● 0	● 103 %	● 50 %		Chemikalien u. Pigmente, Elektronik, Metallurgie, Dünnschichtsolarzellen
● 1.674	● 10 %	● 48 %		Elektronik, Automatisierungs- u. Energietechnik, Permanentmagnete, Superlegierungen, Katalysatoren, Luftfahrt
● 15.752	● 340 %	● 21 %		Legierungen, Elektronik, RFID
● 296.863	● 245 %	● 28 %		Halbleiterindustrie, Mikroelektronik, Dioden, Transistoren, Dichtungsmaterialien, Lacke, Farben, Legierung
● 2.861	● 96 %	● 57 %		Walzprodukte, Superlegierungen, Chemikalien, Hartmetalle, Mikrokondensatoren
● 10.446	● 13 %	● 18 %		Farbe, Kunststoffe, Katalysatoren, Luft- u. Raumfahrt, Anlagenbau, chemischer Apparatebau
● 187	● 36 %	● 52 %		Stahlveredler; Katalysatoren; Vanadium-Elektrolytlösung in Redox-Flow Elektrizitäts-speichern
● 53.084	● 159 %	● 31 %		Walzprodukte, Chemikalien, Superlegierungen, Hartmetall, Schneidwerkzeuge, Bohrkronen, elektrische Kontakte
	● 12 %	● 9 %		Magnete, Metallurgie, Röhrentechnik, Leuchtstoffe
● 126.984	● 133 %	● 26 %		Galvanik, NE-Legierungen, Pharmazie, Batterie, Pigmente, Maschinenbau
● 83.045	● 229 %	● 25 %		Elektronik, Weißblech, LCD, Chemie, Legierungen
● 0	● 269 %	● 32 %		Schmelztiegel, Chemikalien, Formgrundstoff im Gießereibereich

schen Rohstoffs dar.⁵⁵ Die folgenden Diagramme (Abbildung 13 bis Abbildung 48) zeigen für jeden einzelnen Rohstoff zum einen den Gesamtwert der Importnachfrage in Millionen Euro und zum anderen die Gesamtmenge in Tausend Tonnen. Darüber hinaus zeigen die Daten, welchen Stellenwert Sekundärrohstoffe in der Importnachfrage einnehmen. Dies offenbart bei einigen Rohstoffen deutlich die Relevanz von Sekundärrohstoffen unter finanziellen und mengenmäßigen Aspekten.

Auf dieser Basis lässt sich – spezifisch für Bayern – eine Einschätzung zur Relevanz bestimmter Sekundärrohstoffe insgesamt ableiten. Dennoch ist diese Einschätzung datenbedingt mit Einschränkungen verbunden. In der Importbetrachtung bleibt im Inland stattfindendes Recycling (das unter Umständen einen anderen Stellenwert hat als im Ausland) unberücksichtigt. Zudem werden die Primär- und Sekundärrohstoffe

in unterschiedlichen Verarbeitungsstadien verglichen. Primärrohstoffe sind in der Regel als Erze oder fertige Rohmaterialien mit anderen Werten und Mengen verbunden als derselbe Rohstoff in Sekundärform (als gehandelte Abfälle und Schrotte). Daher wird für jeden Indikator zusätzlich die End-of-Life-Recycling-Input-Quote betrachtet (siehe jeweilige Faktenbox). Diese stellt den Anteil des Recyclings von Altschrott in der EU an der EU-Rohstoffversorgung dar. Der Indikator beschreibt in welchem Umfang Sekundärmaterial aus Schrotten und Abfällen letztlich der Produktion zugeführt wird und den Primär Materialeinsatz ersetzt. Die Werte stellen die Substitutionswirkung von Sekundärrohstoffen besser dar als die Importnachfrage, sind jedoch nur aggregiert auf EU-Ebene verfügbar. Aus der Betrachtung beider Indikatoren lässt sich letztlich eine umfassende Einschätzung gewinnen.

Aluminium

Aluminium wird mit 333.000 Tonnen **in großen Mengen importiert** (Abbildung 13) und ist insbesondere in seiner Eigenschaft als Leichtmetall ein beliebter Rohstoff. Als Werkstoff überzeugt Aluminium, neben seiner Leichtigkeit, durch seine Zähigkeit und erlangt durch die vielseitige Verwendung in verschiedenen Industriebranchen eine hohe wirtschaftliche Bedeutung in Bayern. Der Rohstoff findet häufig Anwendung als Legierung im Flugzeug-, Schiffs- und Fahrzeugbau sowie in Verpackungen und Behältern. Allerdings ist der Abbau von Bauxit (Aluminiumerz) und die Erzeugung von Aluminium mit erheblichen Einflüssen auf die Umwelt verbunden. Aluminium kann **ohne Verluste seiner Eigenschaften recycelt** werden, was zu erheblichen Energieeinsparungen führt. Dennoch kann der hohe Importbedarf aktuell nur etwa zu einem Drittel durch Sekundär-aluminium gedeckt werden (Abbildung 13). Durch die Langlebigkeit vieler Aluminiumprodukte stehen Schrotte und Abfälle oftmals nicht in ausreichenden Maß zur Verfügung. Die **Substituierbarkeit** von Aluminium ist **gut**. Je nach Verwendung kann es durch Stoffe wie Titan, Magnesium oder Stahl beispielsweise im Fahrzeugbau bis hin zu Glas oder Papier in Verpackungen ersetzt werden.

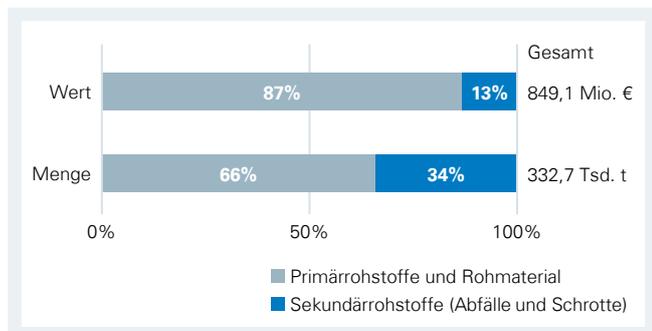


Abb. 13: Importnachfrage 2022 nach Aluminium in Millionen € und Tausend Tonnen⁵⁶

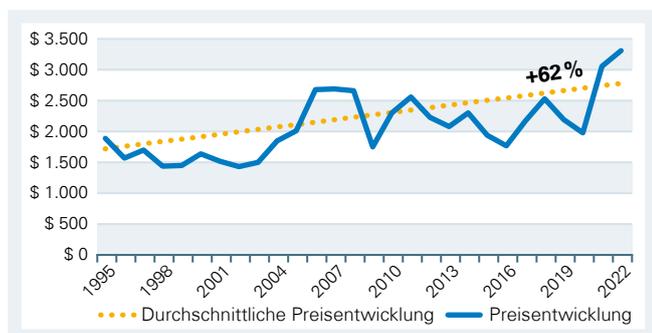


Abb. 14: Preisentwicklung von Aluminium⁵⁷

Fakten & Informationen

- **Umweltauswirkungen:** Hinsichtlich der hohen Import-Mengen sind der hochgerechnete kumulierte Energieaufwand (141 Gigajoule je Tonne) und die damit einhergehenden THG-Emissionen erheblich.
- **Recyclingquote:** Mit einer 12 % End-of-Life Recycling-Input-Quote ersetzen bereits Sekundärrohstoffe aus Abfallprodukten eine hohe Menge an Primäraluminium.
- **Substituierbarkeit (gut):** Kann durch Stoffe wie Titan, Magnesium oder Stahl (Fahrzeugbau) hin zu Glas oder Papier (Verpackungen) ersetzt werden.
- **Rohstoffrisiko (mittel):** Aluminium kann bei einer Bauxitreserve von etwa 32 Milliarden Tonnen noch fast 87 Jahre produziert werden.
- **Förderländer (Bauxit):** Australien (28,9 %), China (20,6 %) und Guinea (17,9 %)
- **Produktionsländer (Aluminium):** China (57,8 %), Australien (5,7 %) und Brasilien (4,6 %).

Lesehilfe: In Abbildung 14 zeigt sich, dass der Rohstoffpreis von Aluminium über den Betrachtungszeitraum von 1997 bis 2022 um 62 % gestiegen ist. Aus Abbildung 15 wird ersichtlich, dass der Rohstoffpreis von Aluminium zum Teil stärkeren Schwankungen unterliegt und dass die historische Volatilität über den Zeitraum von 1997 bis 2022 18 % beträgt

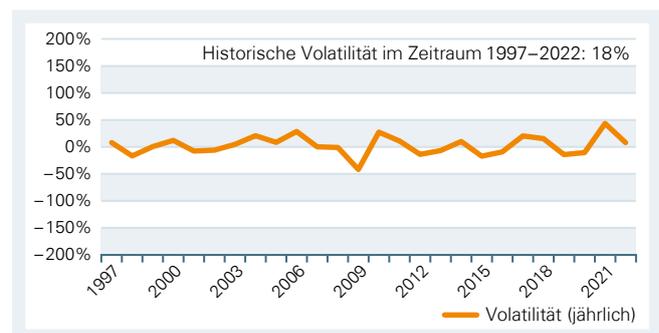


Abb. 15: Volatilität von Aluminium⁵⁸

Eisen und Stahl

Eisen ist ein fester Bestandteil vieler Produktionsprozesse und zentraler Rohstoff für die Stahlherstellung. Daher lassen sich Eisen und Stahl in den statistischen Daten schlecht trennen und werden hier gemeinsam betrachtet. Auf Grund ihrer Bedeutung für den Maschinen- und Anlagenbau sowie die Fahrzeugindustrie zählen sie zu den **bedeutendsten bayerischen Importrohstoffen**. Zudem werden sie zu einem **hohen Anteil recycelt**, was sich nicht zuletzt in der Importnachfrage nach Sekundärstoffen mit 82 % (Abbildung 16) deutlich spiegelt. Die Rohstoffsituation hinsichtlich Eisen und Stahl ist daher vergleichsweise entspannt, obwohl die weltweite Nachfrage nach Eisenerz in den letzten Jahrzehnten rapide gestiegen ist. Je nach Anwendung lässt sich Eisen durch Aluminium, Kunststoffe und Verbundstoffe substituieren. Letztere lassen sich allerdings häufig weniger gut recyceln.

Fakten & Informationen

- **Umweltauswirkungen:** Obwohl die THG-Emissionen (knapp 2 t CO₂-Äquivalente) und der Rohstoff- und Energieaufwand je Tonne verhältnismäßig gering sind, fällt die Gesamtbelastung durch die bedeutende Menge sehr hoch aus.
- **Recyclingquote:** Mit einer 31 % End-of-Life Recycling-Input-Quote ersetzen bereits Sekundärrohstoffe aus Abfallprodukten eine hohe Menge an Eisenerz.
- **Substituierbarkeit (gut):** Kann je nach Anwendung durch Aluminium, Kunststoffe und Verbundstoffe ersetzt werden.
- **Rohstoffrisiko (mittel):** Eine mäßige Länderkonzentration und einer Rohstoffreichweite von 74 Jahren weisen ein mittleres Rohstoffrisiko auf.
- **Förderländer:** Australien (36,8 %), Brasilien (19,3 %) und China (13,8 %)
- **Produktionsländer (Roheisen):** China (57,3 %), Indien (7,9 %) und Japan (5,7 %).

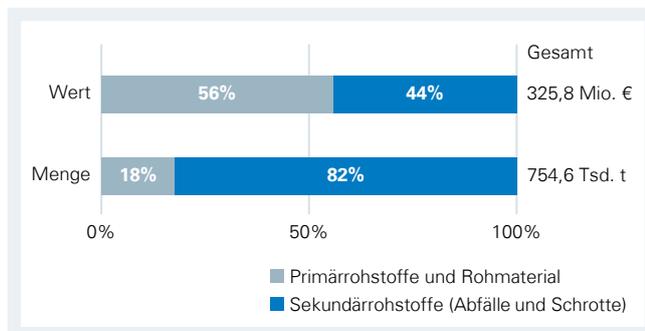


Abb. 16: Importnachfrage 2022 nach Eisen und Stahl in Millionen € und Tausend Tonnen⁵⁹

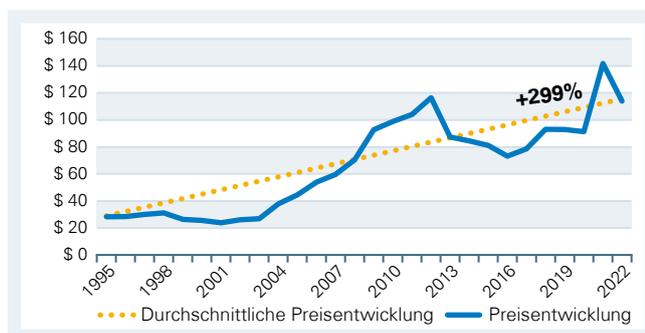


Abb. 17: Preisentwicklung von Eisen und Stahl⁶⁰

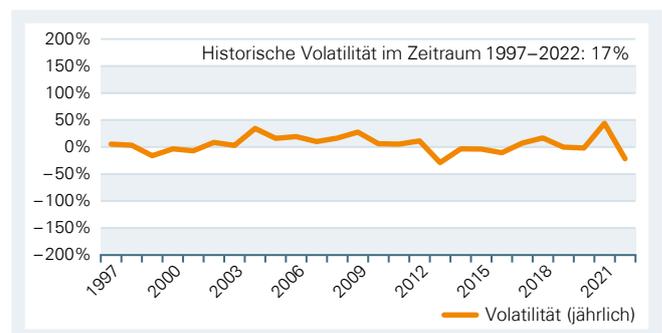


Abb. 18: Volatilität von Eisen und Stahl⁶¹

Indium

Indium ist ein weiches, duktiles und damit vielseitig einsetzbares Schwermetall, was es zu einem gefragten und hochpreisigen Rohstoff (mehrere hunderttausend Euro je Tonne) macht. Verwendung findet Indium vor allem in der Halbleiterindustrie, Kommunikationstechnik und Unterhaltungselektronik. Aufgrund der Leitfähigkeit und Lichtdurchlässigkeit von Indiumzinnoxid wird jenes insbesondere bei der Herstellung von Displays, Bildschirmen, TV-Geräten, Smartphones und Kameras genutzt. Aufgrund der zunehmenden Elektrifizierung und Digitalisierung aller Lebensbereiche stellt Indium somit einen zukunftsrelevanten Rohstoff dar. Zudem weisen die bayerischen Importe keine nennenswerten Mengen an Sekundärindium auf, was angesichts der unbekanntem weltweiten Indiumreserven die Versorgungssicherheit anspannt. Die Substitution ist zum Teil durch Gallium möglich, welches jedoch ebenfalls ein kritisches Element ist und somit lediglich eine Verlagerung der Problematik der Rohstoffknappheit zur Folge hätte. Somit ist die Substituierbarkeit im Allgemeinen zwar als „mittel“ zu betrachten, der genannte Verlagerungseffekt muss bei der Rohstoffauswahl jedoch berücksichtigt werden. Weiterhin kann bei der Substitution von Indium teilweise auf Fluor und Aluminium zurückgegriffen werden, wobei jedoch mit Leistungs- und Wirkungsgradeinbußen gerechnet werden muss. Neben der begrenzten Substituierbarkeit kommt zur

allgemeinen Rohstoffsituation von Indium hinzu, dass sich die Produktion auf den asiatischen Raum, insbesondere auf China, konzentriert. Hierbei könnte sich zukünftig eine verstärkte heimische Importabhängigkeit entwickeln, welche zusätzlich hohen Lieferzeiten infolge der langen Lieferwege nach Fernost ausgesetzt wäre.

Fakten & Informationen

- **Umweltbelastung:** Die THG-Emissionen (118 Tonnen CO₂-Äquivalente je Tonne Indium) sind trotz des hohen CO₂-Faktors moderat, da die Menge des importierten Indiums lediglich eine Tonne beträgt. Der kumulierte Rohstoff- und Energieaufwand je Tonne sind extrem hoch fallen aber ebenfalls aufgrund der moderaten Menge an Indium nicht sonderlich stark ins Gewicht.
- **Recyclingquote:** Mit einer 1 % End-of-Life Recycling-Input-Quote ist das Recycling von Indium noch kaum vorhanden. Angesichts der fortschreitenden Digitalisierung und des hohen Preises von Primärindium wird sich der Bedarf nach Sekundärindium perspektivisch erhöhen.
- **Substituierbarkeit (mittel):** Indium beziehungsweise Indiumzinnoxid kann zum Teil durch Gallium als auch durch Fluor- oder Aluminiumdotiertem Zinnoxid ersetzt werden.
- **Rohstoffrisiko (hoch):** Das Rohstoffrisiko ist aufgrund des wachsenden Bedarfs an Indium und der unbekanntem Größe der Indiumreserven hoch. Zudem ist China der größte Produzent von Indium.
- **Raffinadeproduktionsländer:** China (59,8 %), Rep. Korea (12,4 %) und Japan (8,7 %)

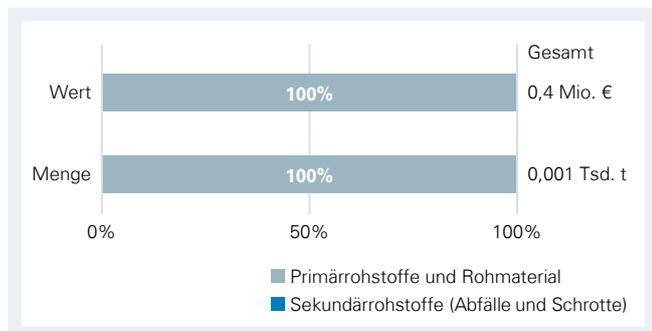


Abb. 19: Importnachfrage 2022 nach Indium in Millionen € und Tausend Tonnen⁶²

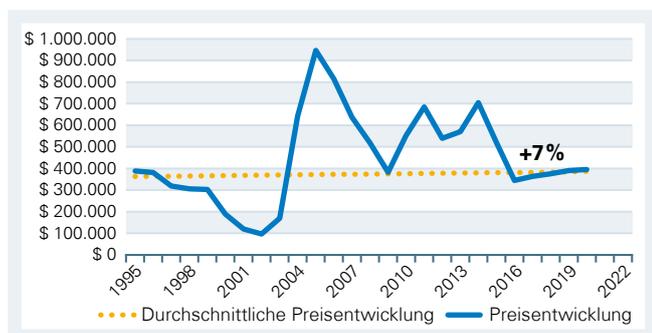


Abb. 20: Preisentwicklung von Indium⁶³

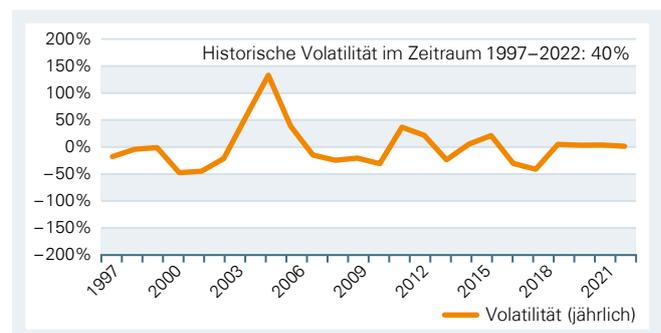


Abb. 21: Volatilität von Indium⁶⁴

Kobalt

Kobalt gilt als ein multivalentes Metall. Als solches besitzt es unter anderem gute Lade- und niedrige Diffusions-eigenschaften, was es insbesondere für den Einsatz in Speichertechnologien interessant macht. Es wird in der elektromagnetischen Datenspeicherung und in Lithium-Ionen-Akkumulatoren eingesetzt. Der weltweite Verbrauch ist nicht zuletzt durch seinen vielseitigen Einsatz in Zukunftstechnologien, wie der Elektromobilität, gestiegen. Dies spiegelt auch das bayerische Importwachstum wider. Zudem wird Kobalt zur Erhöhung der Warm- und Verschleißfestigkeit legierter Stähle und als Binder in Hartmetallsinterwerkstoffen eingesetzt. Obwohl es etablierte **Recyclingverfahren** für Kobalt gibt, sind diese durch die anwendungsspezifische Matrix und Kontamination aufwändig, somit liegt die Importnachfrage von Primärrohstoffen gemessen am Wert bei 87 % (Abbildung 22). **Substitute** können nur mit deutlichen Leistungseinbußen eingesetzt werden. Ein bedeutender Anteil der Bergwerksförderung findet in der Demokratischen Republik Kongo statt, einem politisch instabilen Land. Der ressourceneffiziente Umgang mit dem **kritischen Rohstoff Kobalt** ist daher besonders wichtig.

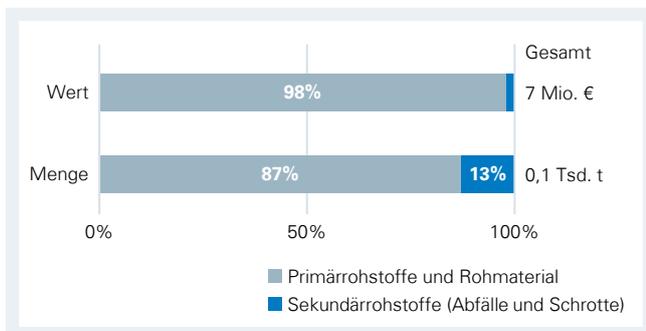


Abb. 22: Importnachfrage 2022 nach Kobalt in Millionen € und Tausend Tonnen⁶⁵

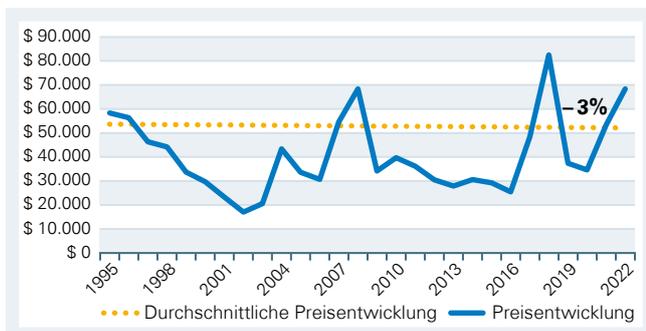


Abb. 23: Preisentwicklung von Kobalt⁶⁶

Fakten & Informationen

- Umweltauswirkungen:** Mit THG-Emissionen von circa 47 Tonnen CO₂-Äquivalenten weist Kobalt relativ hohe THG-Emissionen auf, wobei der kumulierte Rohstoffaufwand von 57 Tonnen und der Energieaufwand von 103 Gigajoule je Tonne nur leicht über dem Median liegen (13,58 Tonnen beziehungsweise 52,41 Gigajoule).
- Recyclingquote:** Es gibt verstärkte Anstrengungen Kobalt bspw. aus gebrauchten Handys zu recyceln, um eine höhere Unabhängigkeit von der globalen Preisentwicklung zu erlangen. Dennoch ist die bisherige Rückgewinnung gering.
- Substituierbarkeit (mittel):** In einigen Anwendungen nur mit deutlichen Leistungseinbußen möglich.
- Rohstoffrisiko (hoch):** Beim aktuellen Produktionsniveau reichen die Reserven noch etwa 46 Jahre. Zudem konzentriert sich der Großteil der weltweiten Förderung auf die Demokratische Republik Kongo, weshalb das Rohstoffrisiko hoch ist.
- Förder- beziehungsweise Produktionsländer:** DR Kongo (72,4 %), Australien (3,7 %) und Russland (3,5 %)
- Raffinadeproduktionsländer:** China (62,2 %), Finnland (10,2 %) und Belgien (5,1 %)

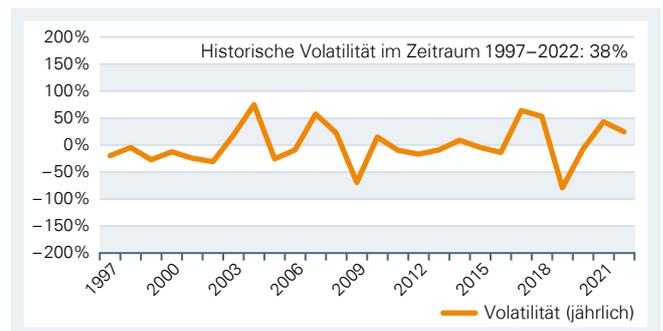


Abb. 24: Volatilität von Kobalt⁶⁷

Kupfer

Kupfer gehört zu den wichtigsten Gebrauchsmetallen. Durch seine elektrische Leitfähigkeit, Wärmeleitfähigkeit und Korrosionsbeständigkeit findet es vielfältig Anwendung. Kupfer wird unter anderem in Legierungen bei Maschinenanlagen, Rohren, Kabeln sowie der Elektrotechnik und Elektromobilität eingesetzt. Die Kupferförderung und -gewinnung ist allerdings mit vielen **Umweltauswirkungen** verbunden. Sie kann Oberflächen- und Grundwasser belasten. Der Wasserbedarf des Bergbaus konkurriert beispielsweise im wichtigsten Förderland Chile im Norden stark mit der Wassernutzung der Landwirtschaft und dem Trinkwasser, gerade in den Gebieten mit geringen Wasservorräten. Abhilfe schafft das Recycling von Kupfer aus Kupferschrotten und Kupferlegierungen. Sekundäres Kupfer kann in der Regel ohne Qualitätsverlust beliebig oft wiederverwertet werden. **Weit über 50 % des Kupferimportbedarfs wird mit Sekundärrohstoffen** abgedeckt (Abbildung 25). Dies stellt einen klaren Beitrag zur Ressourcenschonung dar. Dazu ist Kupfer in bestimmten Anwendungen gut substituierbar. In Wärmetauschern kann Kupfer durch Titan und Stahl ersetzt werden. Auch bei Rohren und Dachrinnen wird an Stelle von Kupfer auf Kunststoff oder Zink zurückgegriffen. Weiterhin wird bei Datenleitungen zunehmend Glasfaser statt Kupfer verwendet. In Elektromotoren und Kabeln kann Kupfer zum Teil durch Aluminium ersetzt werden, was allerdings mit

einer gravierenden Verschlechterung der Energieeffizienz verbunden ist. Substituierbarkeit kommt zur allgemeinen Rohstoffsituation von Indium hinzu, dass sich die Produktion auf den asiatischen Raum, insbesondere auf China, konzentriert. Hierbei könnte sich zukünftig eine verstärkte heimische Importabhängigkeit entwickeln, welche zusätzlich hohen Lieferzeiten infolge der langen Lieferwege nach Fernost ausgesetzt wäre.

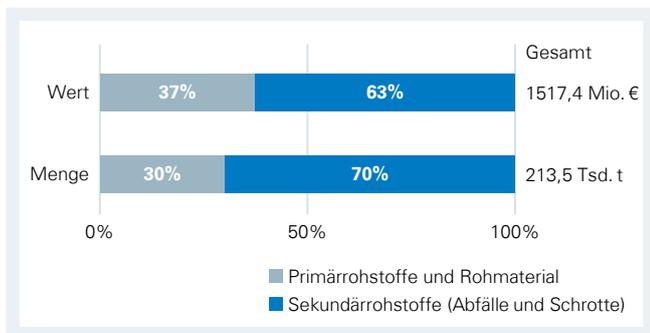


Abb. 25: Importnachfrage 2022 nach Kupfer in Millionen € und Tausend Tonnen⁶⁸

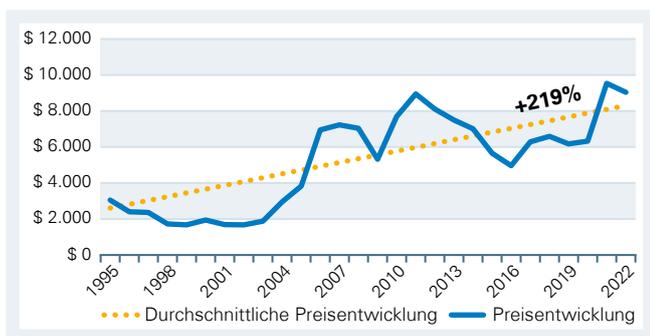


Abb. 26: Preisentwicklung von Kupfer⁶⁹

Fakten & Informationen

- **Umweltauswirkungen:** Mit 128 Tonnen kumulierten Rohstoffaufwand, 50 Gigajoule Energieaufwand und 6,66 Tonnen CO₂-Äquivalenten je Tonne sowie einer hohen bayerischen Importnachfrage belastet Kupfer die Umwelt deutlich.
- **Recyclingquote:** Mit einer 55 % End-of-Life Recycling-Input-Quote ersetzen Sekundärrohstoffe eine sehr hohe Menge an primärem Kupfer.
- **Substituierbarkeit (gut):** In bestimmten Anwendungen möglich z. B. Substitution durch Aluminium in Stromkabeln und Elektrogeräten, durch Titan und Stahl in Wärmetauschern, durch Kunststoffe oder Zink in Rohren und Dachrinnen.
- **Rohstoffrisiko (hoch):** Bei aktuellem Produktionsniveau werden die Reserven nur noch circa 40 Jahre reichen.
- **Förderländer:** Chile (28,3 %), Peru (11,8 %) und China (7,9 %)
- **Raffinadeproduktionsländer:** China (38,5 %), Chile (10,2 %) und Japan (6,6 %)

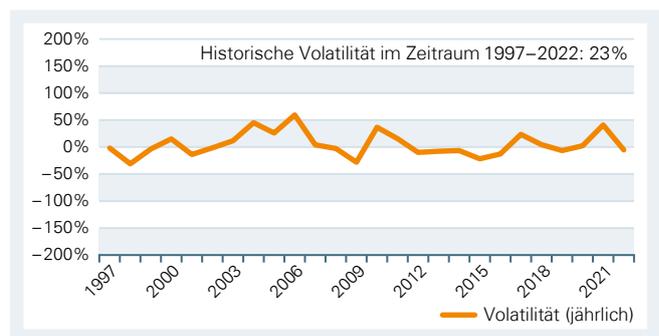


Abb. 27: Volatilität von Kupfer⁷⁰

Lithium

Auch wenn das Alkalimetall Lithium in den letzten Jahren einen hohen Bekanntheitsgrad durch Elektrokleingeräte und die Elektromobilität erlangt hat, wird der Rohstoff bereits seit längerem vielfältig eingesetzt. Lithium findet unter anderem Anwendung als Additiv in der Emaille-Herstellung, um die Fließfähigkeit zu erhöhen und als pharmazeutischer Wirkstoff zur Behandlung von Depressionen. In der Raumfahrt wird Lithium zur Erhöhung der thermischen Beständigkeit in Hochleistungsschmierstoffen verwendet. Der **hohe Energieaufwand**, um vom Erzabbau und der Solegewinnung bis zur Lithium-Gewinnung durch Elektrolyse Lithium-Chlorid zu gelangen, stellt eine große Herausforderung dar. Zudem werden für die Gewinnung von Lithium große Mengen Wasser benötigt. **Recyclingverfahren** könnten Verbesserungen herbeiführen, stehen jedoch **technologisch noch am Anfang**. In bestimmten Verwendungen kann Lithium substituiert werden. Im Bereich der Energiespeicher stellen Nickelmetallhydrid-Akkus eine technologische Alternative dar, die jedoch auf Grund der geringeren Energiedichte nicht für alle Anwendungsfelder geeignet ist (insbesondere Mobilität). Mit der zunehmenden Bedeutung von Lithium-Batterien in **Zukunftstechnologien** ist die ressourceneffiziente Nutzung von Lithium elementar.

Fakten & Informationen

- **Umweltauswirkungen:** Die hohen THG-Emissionen von knapp 80 Tonnen CO₂-Äquivalenten und der hohe Energieaufwand von 307 Gigajoule je Tonne stellen große Umweltauswirkungen dar und können gerade bei einer steigenden Nachfrage nach Lithium erhebliche zusätzliche Belastungen für die Umwelt bedeuten.
- **Recyclingquote:** Es zeichnet sich keine nennenswerte Rückgewinnung durch Recycling ab. Angesichts der Zunahme der Lithium-Batterie-Industrie besteht zukünftig ein hoher Bedarf.
- **Substituierbarkeit (mittel):** In einigen Anwendungen z. B. Primärbatterien oder in der Glasproduktion.
- **Rohstoffrisiko (hoch):** Die Reserven werden bei heutigem Produktionsniveau auf ungefähr 45 Jahre geschätzt. Die Förderung ist jedoch auf wenige Länder konzentriert.
- **Förderländer:** Australien (60,9 %), Chile (19,0 %) und China (7,5 %)

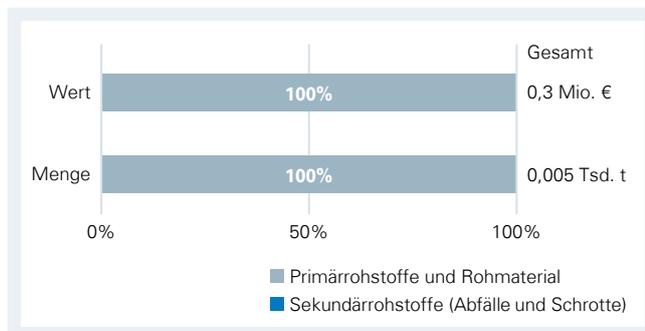


Abb. 28: Importnachfrage 2022 nach Lithium in Millionen € und Tausend Tonnen⁷¹

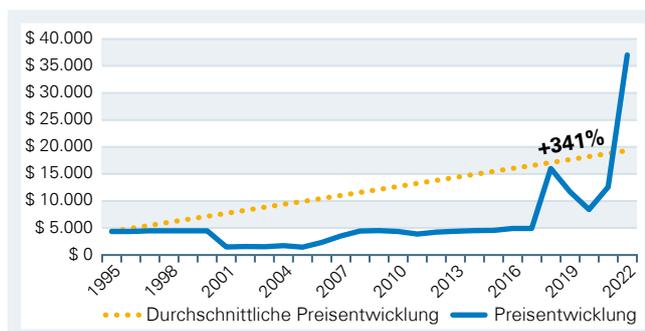


Abb. 29: Preisentwicklung von Lithium⁷²



Abb. 30: Volatilität von Lithium⁷³

Magnesium

Das metallische Magnesium erlangt seine wirtschaftliche Bedeutung als Leichtbauwerkstoff etwa in der Herstellung von Aluminiumlegierungen. Durch seinen Zusatz werden die Festigkeit, Zähigkeit und Korrosionsbeständigkeit erhöht, daher findet Magnesium unter anderem Anwendung im Fahrzeug- und Maschinenbau. Die Dämpfungseigenschaften von Magnesium werden in der Unterhaltungselektronik eingesetzt. In der Elektrochemie findet Magnesium in Opferanoden und in der Metallerzeugung als Reduktionsmittel Verwendung. Das **Recycling** von Magnesium konzentriert sich auf die **Verwertung von Magnesiumschrott aus Aluminiumlegierungen** oder aus Aluminium-Dosen. Dennoch wird in Bayern nur ein sehr geringer Anteil an Sekundärrohstoffen importiert (Abbildung 31). Möglicherweise wird vor Ort recyceltes Magnesium regional wiederverwertet. Eine Herausforderung hierbei sind Verunreinigungen, die die Wiederverwertung einschränken. Obwohl die theoretischen Reserven von Magnesium absehbar kaum begrenzt sind, konzentrieren sich die Produktionsstätten auf wenige Länder. Angesichts der **wirtschaftlichen Bedeutung** und der **Länderkonzentration** wird Magnesium als **kritisch** eingestuft. Eine höhere Ressourceneffizienz und verbessertes Recycling kann dem Rohstoffrisiko entgegenwirken. Im Vergleich zu den anderen aufgeführten Schlüsselrohstoffen

sind mögliche Umweltschäden durch den Abbau oder die Produktion von Magnesiummetallen aus Dolomit, Magnesit oder etwa Meerwasser unzureichend dokumentiert.

Fakten & Informationen

- **Umweltauswirkungen:** Der Energieaufwand mit 146 Gigajoule je Tonne und die THG-Emissionen von circa 29 Tonnen CO₂-Äquivalenten sind vergleichsweise hoch, wohingegen der Rohstoffaufwand mit fünf Tonnen je produzierter Tonne Magnesium relativ gering ist.
- **Recyclingquote:** Mit einer 13 % End-of-Life Recycling-Input-Quote ersetzen Sekundärrohstoffe eine geringe Menge an Magnesium.
- **Substituierbarkeit (gut):** In einigen Anwendungen und Produkten, wie z. B. in Gussteilen und Schmiedeerzeugnissen, ist Magnesium durch Aluminium und Zinn ersetzbar. Magnesium hat gegenüber Aluminium jedoch einen Vorteil in der Leichtigkeit.
- **Rohstoffrisiko (hoch):** Die theoretischen Reserven sind absehbar kaum begrenzt, da die statische Reichweite mehrere hundert Jahre beträgt, jedoch ist die Produktion stark auf China konzentriert.
- **Raffinadeproduktionsländer:** China (90,9 %), USA (3,2 %) und Israel (2,2 %)

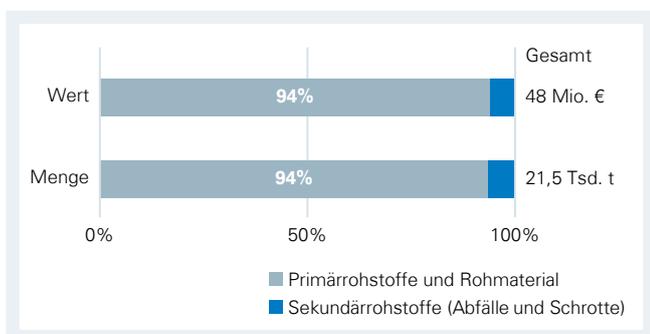


Abb. 31: Importnachfrage 2022 nach Magnesium in Millionen € und Tausend Tonnen⁷⁴

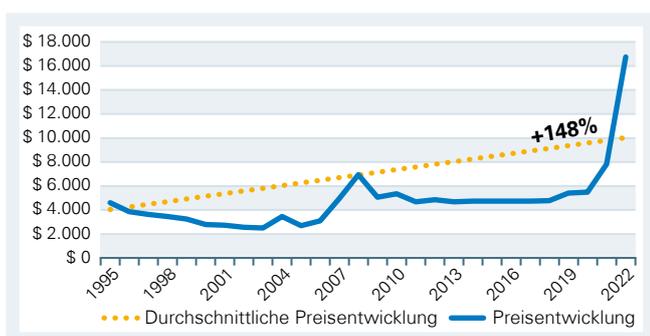


Abb. 32: Preisentwicklung von Magnesium⁷⁵

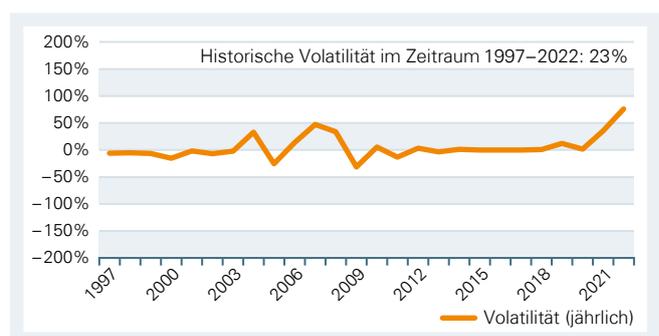


Abb. 33: Volatilität von Magnesium⁷⁶

Platin/-gruppe

Zur Platingruppe gehören neben Platin auch Iridium, Ruthenium, Rhodium, Palladium und weitere Metalle. Die Platingruppe ist insbesondere in der Unterstützung von katalytischen chemischen Prozessen und in der Produktion von elektronischen Geräten gefragt. Die Anwendungsbereiche sind sehr vielfältig und reichen von Pharmazeutika und Pigmenten bis hin zu Autokatalysatoren. Platin und Palladium sind besonders wertvolle Metalle, weshalb ein großes Interesse besteht, sie zu recyceln. **Platin ist vollständig wiederverwendbar.** Daher bestehen fast alle bayerischen Platin-Importe aus Sekundärrohstoffen (Abbildung 34). Des Weiteren besteht eine **Substituierbarkeit mit anderen Metallen der Platingruppe.** Die hohe Länderkonzentration der Bergwerksförderung ist ausschlaggebend dafür, dass die Platinmetallgruppe als **kritische Rohstoffe** eingestuft werden. Die **hohe bayerische Importnachfrage** und die hohe Umweltbelastung sind signifikante Beweggründe für mehr Ressourceneffizienz.

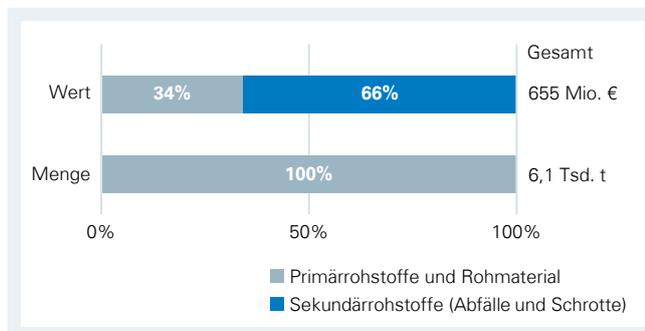


Abb. 34: Importnachfrage 2022 nach Platin in Millionen € und Tausend Tonnen⁷⁷

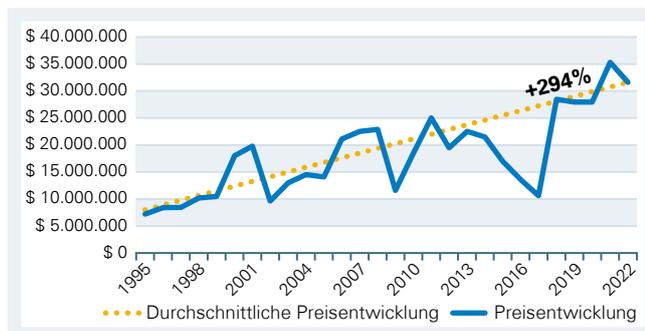


Abb. 35: Preisentwicklung von Platin⁷⁸

Fakten & Informationen

- **Umweltauswirkungen:** Platin ist einer der Rohstoffe mit den höchsten Umweltauswirkungen. Der kumulierte Rohstoff- und Energieaufwand liegt mit 190.000 Tonnen beziehungsweise 252.000 Tonnen je Tonne Platin tausendfach über dem Median (13,58 Tonnen). Ähnliches gilt für die THG-Emissionen, welche mit knapp 70.000 Tonnen CO₂-Äquivalenten je Tonne fast siebentausendfach über dem Median liegen (10,08 Tonnen CO₂-Äquivalente).
- **Recyclingquote:** Die 11 % End-of-Life Recycling-Input-Quote für Platin indizieren, dass Recyclingverfahren etabliert, aber ausbaufähig sind.
- **Substituierbarkeit (mittel):** Platin kann lediglich mit anderen Metallen der Platingruppe substituiert werden, hierbei ist zum Teil mit Effizienzverlusten zu rechnen
- **Rohstoffrisiko (hoch):** Nach jetziger Produktion reichen die Platinreserven über 100 Jahre. Jedoch liegt eine hohe Länderkonzentration vor.
- **Förderländer:** Südafrika (72,1 %), Russland (10,6 %) und Simbabwe (7,7 %)



Abb. 36: Volatilität von Platin⁷⁹

Seltene Erden

Zu der Gruppe der Seltenerdmetalle gehören Scandium, Yttrium, Neodym, Dysprosium und mehr als ein Dutzend weitere Metalle. Diese gelten als unverzichtbare Bestandteile der Elektronik- und Fahrzeugbranche. Neodym und Dysprosium beispielsweise sind wichtige Zusätze in der Herstellung von Permanentmagneten. Seltene Erden werden auch für den Einsatz in **Zukunftstechnologien** als bedeutsam eingeschätzt. Für die meisten Anwendungen sind die einzelnen Seltenen Erden **substituierbar, aber nur durch andere Metalle aus dieser Gruppe**. Weiterhin kann in einigen Anwendungen, wie Windkraftanlagen oder Elektromotoren, auf Seltene Erden verzichtet werden, wodurch jedoch die Leistung beziehungsweise Leistungsdichte sinkt oder deutlich größere Mengen an Metallen, wie Kupfer, benötigt werden und somit durch eine Erhöhung des Materialeinsatzes kompensiert werden müssen. Bayern importiert ausschließlich Primärrohstoffe bei der Gruppe der Seltenen Erden (Abbildung 37). Neben der geringen Recyclingquote befinden sich fast 90 % des Vorkommens in China, sodass das **Rohstoffrisiko der gesamten Gruppe als kritisch** eingestuft wird. Bei der Produktion von Seltenen Erden fallen giftige Chemikalien und radioaktive Substanzen häufig in Auffangbecken an.

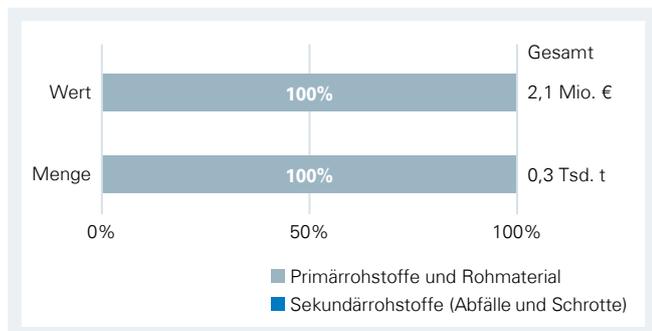


Abb. 37: Importnachfrage 2022 nach Seltenen Erden in Millionen € und Tausend Tonnen⁸⁰

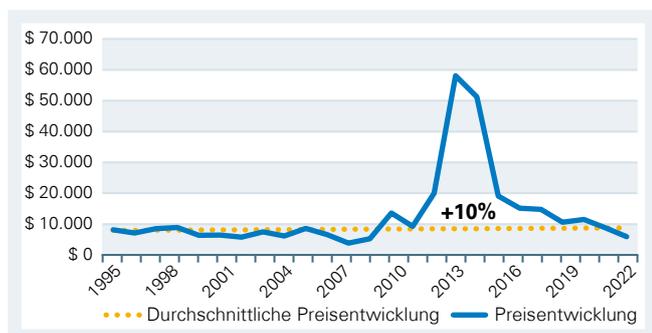


Abb. 38: Preisentwicklung von Seltenen Erden⁸¹

Fakten & Informationen

- **Umweltauswirkungen:** Mit dem Abbau fallen sehr große Mengen an Rückständen an, die giftige Stoffe enthalten. Ohne ausreichende Umweltschutzsysteme kann der Abbau zerstörerische Umweltauswirkungen nach sich ziehen.
- **Recyclingquote:** Mit 1 % End-of-Life Recycling-Input-Quote für die Gruppe ist die Verwendung von Sekundärrohstoffen sehr gering. Jedoch fällt das Recycling sehr unterschiedlich zwischen den einzelnen Elementen aus.
- **Substituierbarkeit (mittel-schlecht):** Für verschiedene Anwendungen verfügbar, aber zumeist mit Leistungseinbußen verbunden.
- **Rohstoffrisiko (hoch):** Es liegt eine sehr hohe Länderkonzentration vor. Zudem kann der Rohstoff nur schlecht recycelt oder substituiert werden (s. o.), was das Rohstoffrisiko weiter erhöht.
- **Förderländer:** China (69,0 %), Australien (10,7 %) und Myanmar (8,8 %)
- **Raffinadeproduktionsländer:** China (86,3 %), Malaysia (11,1 %) und Russland (1,6 %)

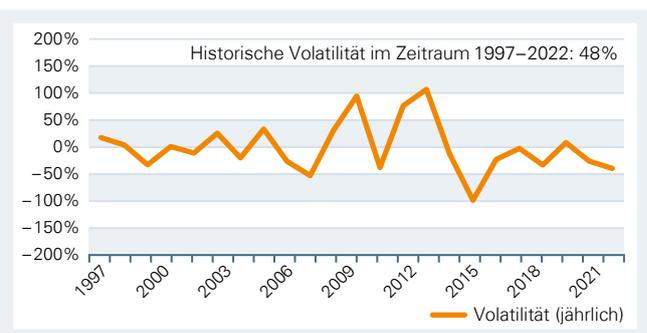


Abb. 39: Volatilität von Seltenen Erden⁸²

Silizium

Silizium ist das zweithäufigste Element auf der Welt. Dieses Nichtmetall ist durch die Anwendung in Photovoltaikanlagen bekannt. Darüber hinaus findet Silizium Verwendung in der Halbleiterindustrie, Mikroelektronik, in Dioden und Transistoren, sowie in der Produktion von Legierungsstahl und in der chemischen Industrie. Die Bedeutung für die bayerische Wirtschaft ist im **Importwert mit einem Gesamtvolumen von 646 Millionen €** (Abbildung 40) klar erkennbar. Da die Größe der erschließbaren Reserven unbekannt ist, ist auch dieser Rohstoff nicht unbedenklich. Die Herstellung von Silizium ist sehr **energieintensiv und findet hauptsächlich in China statt**. Obwohl etwa im Bereich des Photovoltaik-Recyclings Fortschritte zu verzeichnen und erste Anlagen in Betrieb sind, ist Sekundärsilizium im Verhältnis zum Bedarf kaum vorhanden. Perspektivisch kann das Recycling neben der Rohstoffversorgung auch zu erheblichen Energieeinsparungen führen. Des Weiteren gibt es in der Halbleiterindustrie und in einzelnen Anwendungen der Stahlindustrie Substitutionsmöglichkeiten.

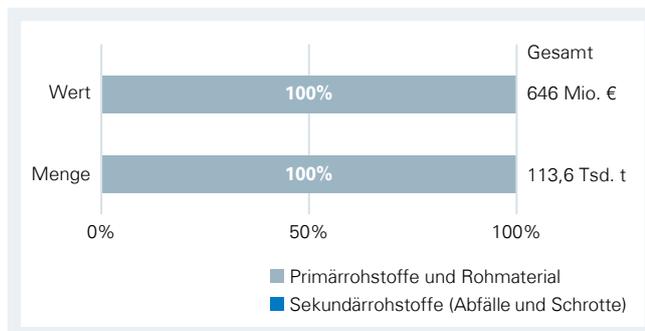


Abb. 40: Importnachfrage 2022 nach Silizium in Millionen € und Tausend Tonnen⁸³

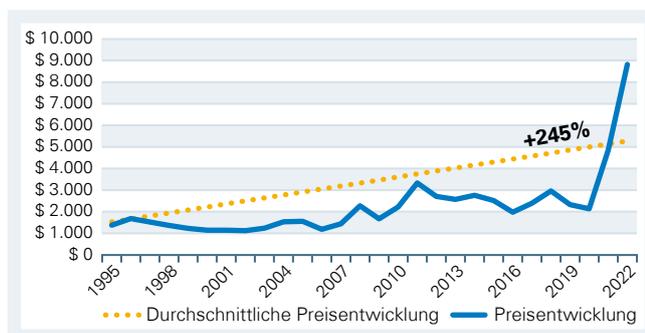


Abb. 41: Preisentwicklung von Silizium⁸⁴

Fakten & Informationen

- **Umweltauswirkungen:** Mit 1.416 Gigajoule kumuliertem Energieaufwand je Tonne und 78 Tonnen CO₂-Äquivalenten an Emissionen ist die Produktion von Silizium hoch energie- und treibhausgasintensiv.
- **Recyclingquote:** Mit einer End-of-Life Recycling-Input-Quote von weniger als 1 % wird Silizium praktisch nicht recycelt.
- **Substituierbarkeit (mittel):** In bestimmten Anwendungen, wie bei Halbleitern oder Infrarot-Anwendungen, bestehen Substitute (z. B. Galliumarsenid).
- **Rohstoffrisiko (hoch):** Aufgrund der Unsicherheit über die Größe der erschließbaren weltweiten Siliziumvorkommen, der hohen Länderkonzentration bei der Produktion, geringen Recyclingmöglichkeiten und der mittleren Substituierbarkeit wird Silizium als kritisch aufgeführt.
- **Raffinadeproduktionsländer:** China (61,9 %), USA (14,8 %) und Brasilien (6,5 %)

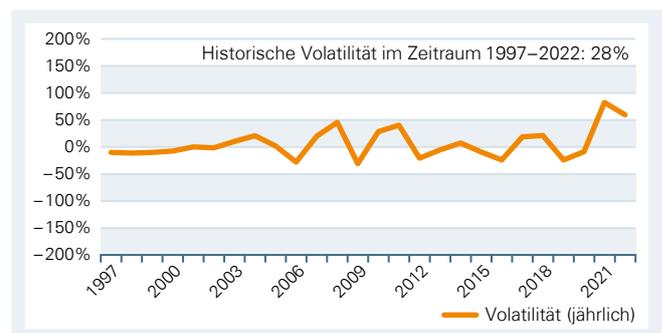


Abb. 42: Volatilität von Silizium⁸⁵

Tantal

Tantal ist ein sehr hartes Übergangsmetall mit einem sehr hohen Schmelzpunkt innerhalb der Metallgruppe. Es überzeugt durch Korrosions- und Temperaturbeständigkeit. In der Elektroindustrie, etwa durch Tantal-Kondensatoren oder Sputtertargets (Zerstäuber), findet es vielseitig Anwendung von der Unterhaltungs- und Kommunikationselektronik bis hin zur Automobilindustrie. Auch in Form von Superlegierungen und in chemischen sowie medizinischen Produkten wird Tantal eingesetzt. Viele von diesen werden als **Zukunftstechnologien** gesehen, so dass angenommen wird, dass die Tantal-Nachfrage künftig weiter steigen wird. Dies spiegelt bereits das bayerische Importwachstum wider (Abbildung 43) und zeichnet sich in der vergangenen Preisentwicklung und -volatilität ab. Zudem ist Tantal durch die Konzentration auf politisch instabile Länder als **kritisch** einzustufen und geht mit **hohen Umweltauswirkungen** einher.

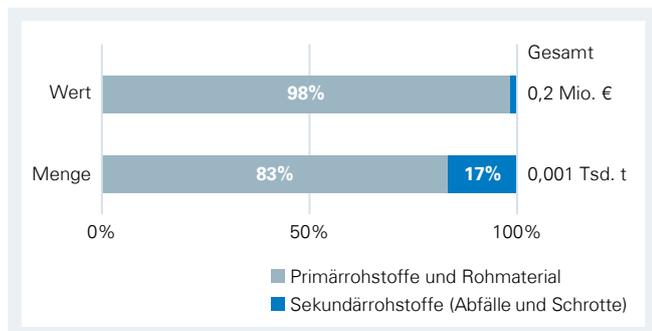


Abb. 43: Importnachfrage 2022 nach Tantal in Millionen € und Tausend Tonnen⁸⁶

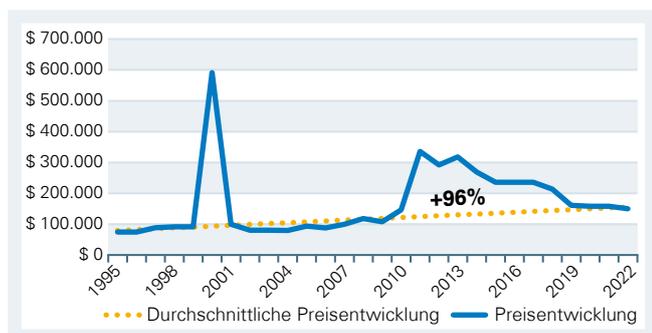


Abb. 44: Preisentwicklung von Tantal⁸⁷

Fakten & Informationen

- Umweltauswirkungen:** Mit einem kumulierten Rohstoffaufwand von 9.180 Tonnen und einem Energieaufwand von 3.356 Gigajoule je Tonne gehört Tantal zu den Rohstoffen mit der höchsten Belastung. Auch die THG-Emission von 166 Tonnen CO₂-Äquivalenten je Tonne produziertem Tantal liegen deutlich über dem Median der betrachteten Rohstoffe (10,08 Tonnen CO₂-Äquivalenten).
- Recyclingquote:** Eine 13 % End-of-Life Recycling-Input-Quote zeigt, dass die Rohstoffgewinnung von sekundärem Tantal etabliert, jedoch ausbaufähig ist.
- Substituierbarkeit (mittel):** Tantal ist in einigen Anwendungen, wie z. B. bei Hartmetallen, Kondensatoren, korrosionsbeständigen Anwendungen oder Hochtemperaturanwendungen, ersetzbar.
- Rohstoffrisiko (hoch):** Die hohe Länderkonzentration in politisch instabilen Ländern stellt ein hohes Rohstoffrisiko dar. Weiterhin werden die Reserven auf nur circa 16 Jahre geschätzt.
- Förderländer:** DR Kongo (27,3 %), Ruanda (20,4 %) und Brasilien (19,7 %)

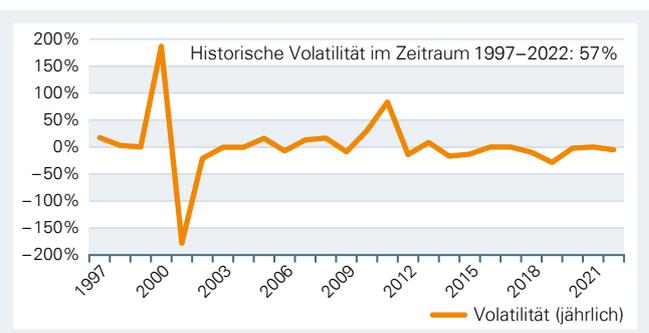


Abb. 45: Volatilität von Tantal⁸⁸

Zinn

Zinn spielt eine sehr wichtige Rolle in der Elektronikindustrie und wird am häufigsten zur Herstellung von Lötzinn verarbeitet. Es ist außerdem zentraler Bestandteil von Weißblech und wird bei der Herstellung von verzinnnten, lebensmittelechten Weißblechkonserven verwendet. Darüber hinaus wird es in der chemischen Industrie, zur Herstellung von Messing und Bronze, in der Zahnmedizin sowie zur Produktion von Floatglas verwendet. Die Recyclingfähigkeit von Zinn ist sehr hoch. Dafür mitverantwortlich ist die hohe Recyclingrate von Weißblech (circa 90 %) in Deutschland, welche durch die Entsorgung von Verpackungen durch den gelben Sack beziehungsweise die gelbe Tonne erreicht wird. Dennoch kann der Rohstoffbedarf in Bayern durch die Importe aktuell nur zu etwa drei Prozent mit Sekundärrohstoffen gedeckt werden. Die Substituierbarkeit von Zinn ist gut. Je nach Anwendung lässt sich Zinn durch Aluminium, Glas, Papier, Plastik, Arsenbronzen, Blei, Silber, Wismut oder Ca-Zn-Ba-Verbindungen substituieren. Eine Besonderheit stellen die geringen Reserven dar, sodass die statische Reichweite bei nur 18 Jahren liegt.

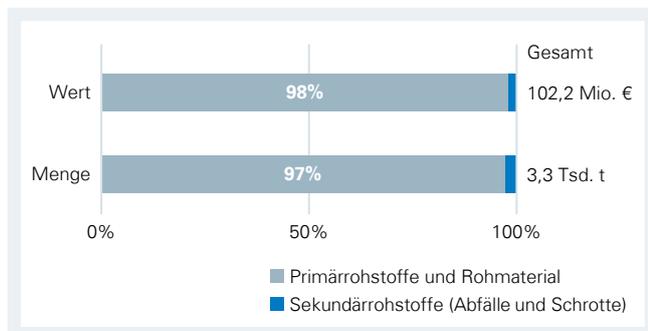


Abb. 46: Importnachfrage 2022 nach Zinn in Millionen € und Tausend Tonnen⁸⁹

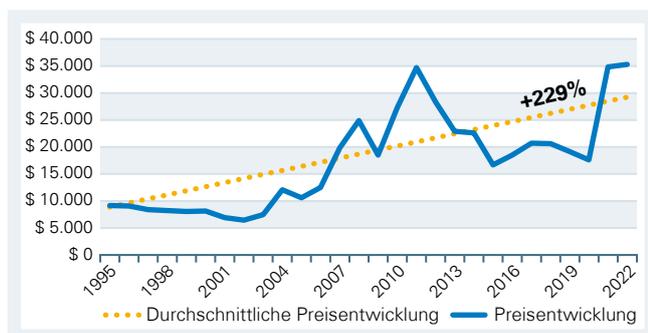


Abb. 47: Preisentwicklung von Zinn⁹⁰

Fakten & Informationen

- Umweltauswirkungen:** Zinn weist mit einem kumulierten Rohstoffaufwand von 1.179 Tonnen je Tonne und einem kumulierten Energieaufwand von 264 Gigajoule je Tonne einen hohen Rohstoff- und Energiebedarf auf. Die THG-Emission (10 Tonnen CO₂-Äquivalente je Tonne) sind dagegen vergleichsweise gering und befinden sich am Median der betrachteten Rohstoffe (10,08 Tonnen CO₂-Äquivalente).
- Recyclingquote:** Eine 31 % End-of-Life Recycling-Input-Quote zeigt, dass die Rohstoffgewinnung von sekundärem Zinn etabliert ist und bereits eine große Menge der Importnachfrage durch Sekundärrohstoffe abgedeckt wird.
- Substituierbarkeit (gut):** Zinn kann durch Aluminium, Glas, Papier, Plastik, Arsenbronzen, Blei, Silber, Wismut oder Ca-Zn-Ba-Verbindungen substituiert werden.
- Rohstoffrisiko (hoch):** Das Rohstoffrisiko ist hoch, da sich die Förderung und Produktion auf den asiatischen Raum konzentriert und nach jetziger Produktion die Rohstoffreserven nur noch circa 18 Jahre reichen.
- Förderländer:** China (28,1 %), Indonesien (25,9 %) und Myanmar (17,1 %)
- Raffinadeproduktionsländer:** China (47,7 %), Indonesien (20,4 %) und Malaysia (7,9 %)



Abb. 48: Volatilität von Zinn⁹¹

Zukunftstechnologien

Im Zuge der Transformation in Richtung Klimaneutralität, sowie der fortschreitenden Digitalisierung wird es in den kommenden Jahren zu einer veränderten Technologienachfrage kommen. Für bestimmte Technologien ist schon heute absehbar, dass sie in naher Zukunft von zentraler Bedeutung für die bayerische Volkswirtschaft sein werden. Die Europäische Kommission veröffentlichte 2020 eine Studie⁹², die eine Reihe von Technologien benennt, die von besonderer strategischer Relevanz sind und durch spezifische Rohstoffbedarfe zu kritischen Abhängigkeiten in der Zukunft führen können. Genannt werden Lithiumbatterien, Brennstoffzellen, Windkraftanlagen, Traktionsmotoren mit Permanentmagneten, Photovoltaikanlagen, Robotik, Drohnen, 3D-Drucker sowie Digitaltechnologien wie Halbleiter.

Auf der Grundlage dieser veränderten Technologiebedarfe verschieben sich auch die Rohstoff- und Materialverbräuche und die damit einhergehenden Import- und Exportverflechtungen. Bereits heute zeichnet sich ab, dass eine Reihe wichtiger Rohstoffe und Materialien für Zukunftstechnologien in hohem Maße von kritischen Handelspartnern bereitgestellt werden und damit dem Risiko unterliegen, dass es zu Lieferausfällen und anderweitigen Komplikationen kommt.

Mit der Liste der kritischen Rohmaterialien hat die Europäische Kommission jene Rohstoffe benannt, denen sie eine besondere ökonomische Relevanz bei gleichzeitig hohen Lieferrisiken zuordnet. Stand 2023 sieht die Kommission für 34 Rohstoffe ein solches kritisches Risiko⁹³. Eine besonders kritische Abhängigkeit zeigt sich für die leichten und schweren Seltenerdmetalle, die zum Beispiel in Permanentmagneten zum Einsatz kommen, welche unter anderem bei Windkraftanlagen und der elektrischen Mobilität eingesetzt

werden.⁹⁴ Rund 70 % des Abbaus von Seltenerdmetallen entfällt im Jahr 2022 auf China. Betrachtet man die direkte Herstellung von Permanentmagneten kontrolliert China sogar 94 % der weltweiten Produktion.⁹⁵ Neben den Permanentmagneten kommen Seltenerdmetalle auch in Brennstoffzellen, der Robotik oder in Drohnen zum Einsatz. Ein hohes Lieferrisiko besteht darüber hinaus für die Rohstoffe Germanium, Niob, Magnesium, Bor und Scandium, die überwiegend im 3D-Druck, Digitaltechnologien und der Windkraft zum Einsatz kommen.

Auch für Deutschland stehen verschiedene Studien zur Verfügung, die kritische Abhängigkeiten im Zusammenhang mit wichtigen Zukunftstechnologien untersuchen⁹⁶. Mit Blick auf die bayerische Volkswirtschaft ist in diesem Zusammenhang der Fahrzeugbau von besonderer Relevanz. Für die kommenden Jahre ist ein zügiger Markthochlauf der Elektromobilität zu erwarten, der vor allem durch den Einsatz von Lithium-Ionen-Batterien geprägt sein wird⁹⁷. Mit Blick auf die dafür benötigten Rohstoffe stellen insbesondere Lithium, Kobalt und Graphit ein Risiko dar, da sie von der EU als kritisch eingestuft werden.

Bei der Produktion von Solarpaneelen werden ebenfalls kritische Rohstoffe benötigt, etwa Indium, Gallium oder Silizium.⁹⁸ Bei Solarmodulen wird hochreines Polysilizium eingesetzt, das in einem aufwendigen Prozess aus Silizium kristallisiert wird. In Bayern ist mit Wacker Chemie ein großer Produzent von Polysilizium ansässig, der jedoch auf entsprechende Silizium-Importe angewiesen ist. Im Jahr 2022 stammt rund 70 % der weltweiten Silizium-Produktion aus China.⁹⁹

Seit Ausbruch der Coronapandemie und dem russischen Angriffskrieg auf die Ukraine hat sich das Bewusstsein für die Risiken, die mit strukturellen Lieferabhängigkeiten einhergehen,

deutlich geschärft. Für den zu erwartenden Einsatz zentraler Zukunftstechnologien steht der Wirtschaftsstandort Bayern vor der Herausforderung, rechtzeitig vorsorgende Maßnahmen zu ergreifen, die verhindern, dass sich die hiesigen Unternehmen in Abhängigkeiten begeben. Um die Abhängigkeit von kritischen Lieferländern, in den kommenden Jahren zu reduzieren, können eine Reihe von Maßnahmen ergriffen werden. Mit Hilfe gezielter Diversifizierung der Lieferländer kann die Abhängigkeit zu einzelnen Ländern schrittweise reduziert werden. Zusätzlich könnten strategische Rohstofflager aufgebaut werden. Ein zweiter wichtiger Hebel ist die Weiterentwicklung und Forschung zu veränderten Materialeinsätzen, zum Beispiel im Bereich der Batterietechnologie. Parallel müssen in den kommenden Jahren Recycling-Technologien entwickelt und zur Marktreife gebracht werden, die es erlauben, die zu erwartenden Schrottrückläufe wiederzuverwenden beziehungsweise zu recyceln. Dies gilt insbesondere für die Erneuerbaren Energien, Batterietechnologien sowie Digitaltechnik. Ein zusätzlicher Schritt kann die Erschließung und Nutzung innereuropäischer Rohstoffverfügbarkeiten sein, die mit verstärkten Bergbauaktivitäten einhergehen.

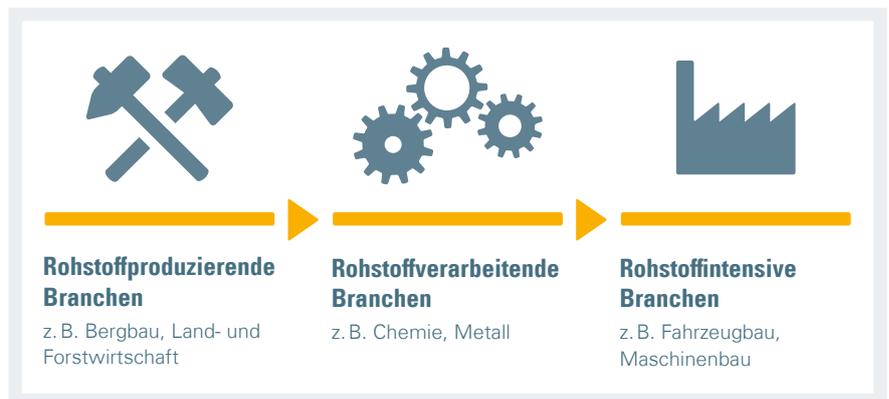


Chancen ergreifen – Rohstoffverbrauchs-Szenarien für die fünf bayerischen Leitbranchen

Die vorangegangenen Kapitel haben die Materialverbräuche Bayerns umfassend dargestellt und deutlich gemacht, warum eine Senkung von zentraler Bedeutung ist. Im Rahmen dieses Kapitels werden die fünf Leitbranchen Bayerns näher betrachtet und Maßnahmen zur dauerhaften Steigerung der Rohstoffeffizienz eingeordnet. Die bayerischen Industriebetriebe bilden die Schnittstelle zwischen der Gewinnung von Rohstoffen und deren Nutzung durch den Endverbraucher. Darüber hinaus kommt der Industrie eine Schlüsselrolle zu, um den bayerischen Materialverbrauch dauerhaft zu senken, zum Beispiel durch einen veränderten beziehungsweise effizienteren Materialeinsatz. Nachfolgend wird zunächst ein Branchenüberblick gegeben, bevor in einer Einzelbetrachtung konkrete Potenziale aufgezeigt werden.

Charakterisierung der Rohstoffnähe unterschiedlicher Branchen

Die verschiedenen Branchen lassen sich anhand ihrer Nähe zu Rohstoffen charakterisieren. Im Bergbau werden abiotische Rohstoffe gewonnen



und für die weitere Verwendung in den Produktionsprozessen der nachgelagerten Industriebranchen aufbereitet. Land- und Forstwirtschaft stellen biotische Rohstoffe bereit. Diese Branchen lassen sich daher ebenfalls als rohstoffproduzierend klassifizieren. Als rohstoffverarbeitende Branchen lassen sich solche Wirtschaftszweige identifizieren, die in großem Umfang Rohstoffe aus den rohstoffproduzierenden Branchen beziehen und weiterverarbeiten. Ein großer Teil der Produktion aus den rohstoffverarbeitenden Branchen fließt wiederum in die Produktionsprozesse anderer Branchen ein. Die Bereiche, die besonders viele Vorleistungen aus den rohstoffverarbeitenden Branchen beziehen, bilden die Kategorie der rohstoffintensiven Branchen.

Rohstoffnähe der bayerischen Industriebranchen

Bayern verfügt im nationalen und internationalen Vergleich über einen sehr starken Industriesektor. Im Jahr 2022 wurden über 28,5 %¹⁰⁰ der bayerischen Wirtschaftsleistung in den Branchen des verarbeitenden Gewerbes erwirtschaftet. In Deutschland insgesamt lag der Anteil der Industrie an der gesamtwirtschaftlichen Bruttowertschöpfung bei 20,4 %¹⁰¹. Die Mitgliedsstaaten der Europäischen Union kommen im Durchschnitt auf einen Anteil von lediglich 16,7 %¹⁰².

Die Industrie zeichnet sich insbesondere durch die Herstellung von physischen Gütern aus. Dafür sind

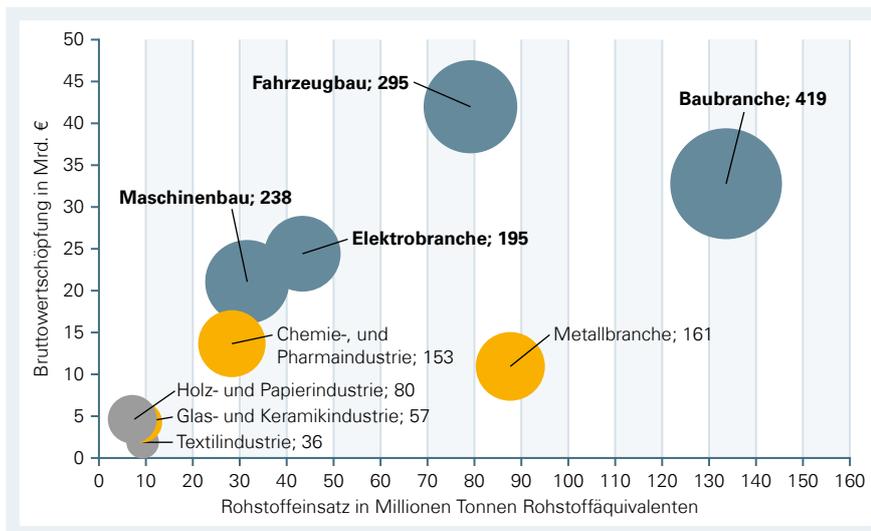


Abb. 49: Rohstoffnähe der bayerischen Industriebranchen, geordnet nach Gesamtrohstoffeinsatz (inkl. Vorketten) beziehungsweise Bruttowertschöpfung in Bayern im Jahr 2020* 104

* Zahl der Erwerbstätigen in Datenbeschriftung in Tausend angegeben und mittels Blasengröße in visuellen Vergleich mit anderen Branchen gesetzt; gelb = rohstoffverarbeitende Branchen, blau = rohstoffintensive Branchen, grau = übrige Industriebranchen

die Unternehmen unter anderem auf Rohstoffe beziehungsweise auf Halbzeuge angewiesen, die bereits verarbeitete Rohstoffe enthalten. Die Bedeutung des Rohstoffeinsatzes in den industriellen Produktionsprozessen unterscheidet sich zwischen den einzelnen Industriebranchen teils beträchtlich. Nachfolgend werden die bayerischen Leitbranchen nach der Bruttowertschöpfung, dem Materialverbrauch und den Beschäftigten differenziert dargestellt. Zusätzlich wird zwischen rohstoffintensiven und rohstoffverarbeitenden Branchen unterschieden.

Im Ergebnis zeigt sich, dass die wichtigsten bayerischen Industriezweige, bezogen auf den Rohstoffeinsatz und die Bruttowertschöpfung, zur Gruppe der rohstoffintensiven Branchen gehören. Der Fahrzeugbau weist mit fast 42 Milliarden Euro die höchste Bruttowertschöpfung aller bayerischen Branchen auf. Der höchste Rohstoffeinsatz liegt jedoch mit großem Abstand bei der Baubranche, die mit rund 134 Millionen Tonnen knapp anderthalbmal so viel wie der zweitgrößte Verbraucher, die Metallbranche, an Ressourcen einsetzt. Die Baubranche weist vor der Elektrobranche die zweithöchste Bruttowertschöpfung auf und beschäftigt mit 419.000 Personen die meisten

Erwerbstätigen. Der Maschinenbau und die Elektrobranche weisen mit 21 Milliarden Euro beziehungsweise 24 Milliarden Euro eine ähnliche hohe Bruttowertschöpfung und mit 238.000 beziehungsweise 195.000 eine ähnlich hohe Erwerbstätigenzahl auf. Die Elektrobranche ist mit 43 Millionen Tonnen Rohstoffäquivalenten knapp rohstoffintensiver als der Maschinenbau.

Auch die Vorleistungen der rohstoffverarbeitenden Unternehmen in Bayern sind von hoher Bedeutung. Sowohl die Metallbranche als auch die Chemie- und Pharmazie nutzt Rohstoffe, um daraus Halbfabrikate zu fertigen, die unter anderem in den rohstoffintensiven Branchen Einsatz finden. Die Metallbranche fertigt zum einen Metalle, für die Erze als Primärrohstoff eingesetzt werden. Zum anderen werden Metallerzeugnisse hergestellt. Daraus ergibt sich die hohe Bedeutung der Metallbranche für die übrigen Branchen, die entsprechende Metalle und Metallerzeugnisse benötigen. Dennoch fällt die Bruttowertschöpfung deutlich geringer aus als in den rohstoffintensiven Branchen.

Folgend werden die fünf relevantesten Branchen mit Blick auf die Bruttowertschöpfung und den Materialverbrauch näher betrachtet.¹⁰³

Rohstoffbedarf der bayerischen Industrie

Es zeigt sich, dass die vier großen rohstoffintensiven Branchen – Baubranche, Fahrzeugbranche, Elektrobranche und Maschinenbau – sowie die rohstoffverarbeitende Metallbranche den höchsten Rohstoffeinsatz bei ihren industriellen Herstellungsprozessen aufweisen. An der Spitze steht dabei die Baubranche. Die bayerischen Bauunternehmen verbrauchten bei ihren Bautätigkeiten im Jahr 2020 rund 134 Millionen Tonnen Rohstoffe (gemessen in Rohstoffäquivalenten). Die mit Abstand wichtigste verwendete Rohstoffgruppe bildeten „sonstige mineralische Rohstoffe“ mit fast 90 % des Verbrauchs. Aber auch Erze und fossile Energieträger kommen in relevantem Umfang zum Einsatz (Abbildung 50).

Die bayerische Metallbranche befindet sich gemessen am Rohstoffeinsatz mit 88 Millionen Tonnen auf Rang zwei, gefolgt vom Fahrzeugbau, der Elektrobranche, und dem Maschinenbau. Bei allen diesen Branchen spielen Erze mit Abstand die wichtigste Rolle.

Betrachtet man das Verhältnis von Bruttowertschöpfung zu

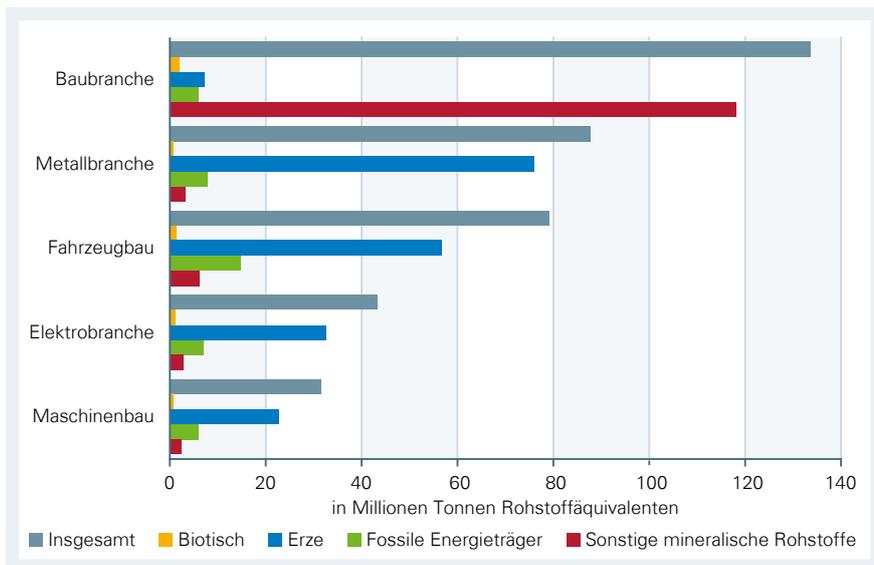


Abb. 50: Rohstoffeinsatz bei der Herstellung in den Industriebranchen, letzte inländische Verwendung und Exporte in Millionen Tonnen Rohstoffäquivalenten nach Gütergruppen in Bayern, 2020¹⁰⁵

Lesehilfe: Im Jahr 2020 wurden in Bayern insgesamt circa 79 Millionen Tonnen Rohstoffe in Rohstoffäquivalenten in Form von Gütern der Gütergruppen des Fahrzeugbaus an die letzte inländische Verwendung oder den Export abgegeben. Der Wert gibt Auskunft über den gesamten Rohstoffverbrauch einer Branche, inklusive aller vorgelagerten Prozesse (= Rohstofffrucksack). Die mit Abstand wichtigste verwendete Rohstoffgruppe bildeten Erze – also bergmännisch abgebaute metallhaltige Mineralien – mit 57 Millionen Tonnen.

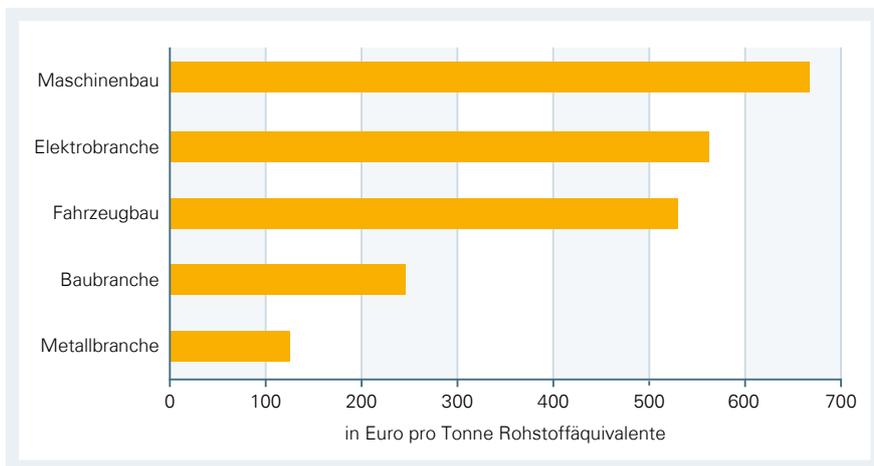


Abb. 51: Rohstoffproduktivität der bayerischen Leitbranchen, Bruttowertschöpfung in Euro je Tonne Rohstoffeinsatz in Rohstoffäquivalenten 2020¹⁰⁶

Lesehilfe: Im bayerischen Fahrzeugbau wurde im Jahr 2020 je Tonne Rohstoffeinsatz in Rohstoffäquivalenten eine Bruttowertschöpfung in Höhe von 530 Euro erzielt. In der Metallbranche ist der Rohstoffeinsatz im Vergleich dazu höher: Je Tonne Rohstoffeinsatz steht nur eine Bruttowertschöpfung in Höhe von 125 Euro.

Rohstoffeinsatz, also die Rohstoffproduktivität, zeigt sich eine veränderte Reihenfolge bei der Betrachtung der Leitbranchen. Die höchste Rohstoffproduktivität weist der Maschinenbau auf, der je eingesetzter Tonne etwa 667 Euro an Wert schafft. Gefolgt von der Elektrobranche mit etwa 563 Euro und dem Fahrzeugbau, der etwa 530 Euro erreicht. Deutlich geringer fällt der Wert in der Baubranche aus, aufgrund des überdurchschnittlich hohen Rohstoffbedarfs. Die geringste Rohstoffproduktivität weist die Metallbranche auf, die etwa 125 Euro an Wert je Tonne Rohstoff schafft, was vor allem mit der niedrigeren Fertigungsstufe von Metallerzeugnissen im Vergleich zu den übrigen Branchen zu erklären ist.

Blick auf die bayerischen Leitbranchen: Rohstoffbedarf und Einsparpotenziale

Fahrzeugbau, Maschinenbau, Metallbranche, Baubranche und Elektrobranche zählen zu den wichtigsten Industriebranchen Bayerns. Auf den folgenden Seiten werden die Rohstoffsituation und die potenzielle zukünftige Entwicklung dieser Leitbranchen genauer in den Blick genommen. Der Fokus liegt hier je auf den wichtigsten Rohstoffen der jeweiligen Branche, daher den Metallen (hier Eisen, Aluminium und Kupfer) sowie den „sonstigen mineralischen Rohstoffen“ für die Baubranche (zum Beispiel Sande,

Kiese, Natursteine). In den folgenden Abschnitten wird für jede Leitbranche die Entwicklung der Rohstoffnutzung von 1994 bis 2020 beleuchtet, und in die jeweiligen Bestandteile aufgeschlüsselt. Zudem werden mit Blick auf die kommenden Jahre bis 2035 drei verschiedene Entwicklungsszenarien aufgezeigt:

- Die erste Szenariorechnung zeigt die Entwicklung im „business-as-usual“. Der Trend des Verbrauchs der betrachteten Rohstoffe der Jahre 2010 bis 2020 wird auf die Entwicklung bis 2035 fortgeschrieben.
- In den beiden weiteren Szenarien werden positive Entwicklungspfade hinsichtlich

der Ressourceneffizienz untersucht. Das zweite Szenario geht von großen Anstrengungen der Industrie und Politik aus, um den Sekundärrohstoffeinsatz bei den drei wichtigsten Rohstoffen im Untersuchungszeitraum auf ein deutlich höheres Maß auszubauen.

- In einem dritten Szenario werden, zusätzlich zu den Steigerungen des Sekundärrohstoffeinsatzes des zweiten Szenarios, die potenziellen Einspareffekte von je drei ausgewählten und besonders vielversprechenden Ressourceneffizienzmaßnahmen mit einbezogen. Es wird dabei davon ausgegangen, dass diese Maßnahmen vollumfänglich, zielgerichtet und flächendeckend umgesetzt werden.

Das zweite und insbesondere das dritte Szenario zeigen die potenziellen Effizienzsteigerungen auf, wenn bestehende Möglichkeiten ehrgeizig umgesetzt und umfassend genutzt werden. Um sie zu realisieren, bestehen hohe Anforderungen an die Umsetzung und Akzeptanz aller beteiligten Akteure. Ziel der Szenariobetrachtung ist nicht die wahrscheinlichste Entwicklung zu prognostizieren, sondern bestehende Potenziale aufzuzeigen.

Ergänzt werden die Szenarien um die Darstellung eines Verbrauchstrends, der dem in der Wissenschaft diskutierten Ansatz des „Faktor X“ folgt¹⁰⁷. Darunter wird die Verzehnfachung der Ressourceneffizienz binnen 50 Jahren verstanden, um absolute Materialverbräuche drastisch zu senken und gleichzeitig Wohlstand zu erhalten beziehungsweise zu fördern. Der Pfad stellt einen möglichen Zielpfad dar und soll im Rahmen der Szenariobetrachtung als möglicher Referenzwert den optimalen Verbrauchspfad der Zukunft zeichnen. Die Verzehnfachung der Ressourceneffizienz beziehungsweise das Zehnteln des Ressourcenverbrauchs wird zum

Beobachtungszeitraum 1994 angesetzt und müsste also bis zum Ende dieses Zeitraums 2035 auf circa 40 % des 1994-Verbrauchs sinken.

Zusätzlich werden die Rohstoffersparnisse des zweiten und dritten Szenarios im Vergleich zum ersten Szenario („business as usual“) für jede Branche in CO₂-Äquivalente auf Basis der BAFA¹⁰⁸ Liste umgerechnet. Damit kann die klimapolitische Wirkung der Ressourceneffizienz für Bayern beziehungsweise können die bayerischen Klimaziele passend quantifiziert werden.

Methodisches Vorgehen der Szenarien

Grundlage der entwickelten Szenarien ist die Berechnung der branchenspezifischen Materialverbräuche für die relevantesten Materialien. Spezifisch wird der Einsatz von Erzen/Metallen in allen Branchen betrachtet sowie der Einsatz nicht-metallischer Mineralien in der Baubranche. Im Rahmen der verfügbaren Statistiken, insbesondere der Umweltökonomischen Gesamtrechnung der Länder, werden Verbrauchsdaten aggregiert dargestellt und müssen mit Hilfe mehrerer Annahmen disaggregiert werden. Ausgangspunkt der Berechnungen ist der für Bayern vorliegende abiotische direkte Materialeinsatz (DMI_a), der mit Hilfe von rohstoffspezifischen Bundesdaten des direkten Materialeinsatzes auf den Anteil der Erze bezogen wird. Für die Baubranche wird zusätzlich der Anteil nicht-metallischer Mineralien ermittelt, und zusätzlich ein Anteil, welcher der Zementproduktion zugeordnet werden kann, ausgewiesen. Damit ergeben sich für die Baubranche abiotische Materialeinsätze der Jahre 1994 bis 2020 für Metalle, nicht-metallische Mineralien (zum Beispiel Sande, Kiese; mit Ausnahme der Rohstoffe für die

Zementproduktion) und für die Zementproduktion.

Für die Branchen Fahrzeugbau, Maschinenbau, Metall und Elektro werden ausschließlich Metalle betrachtet, die mit Hilfe von Import- und Produktionsdaten nochmals in die Bestandteile Eisen/Stahl, Kupfer und Aluminium differenziert werden. Die berechneten gesamten Materialeinsätze werden mittels Sekundärliteratur der Marktnachfrageanteilen den fünf Branchen zugeordnet. Das beschriebene Vorgehen unterscheidet sich zu den zuvor dargestellten Gesamtrohstoffeinsätzen der Branchen, da dort in der Einheit von Rohstoffäquivalenten gerechnet wird und entsprechende Materialbedarfe in den Vorketten mitbetrachtet werden. Im Rahmen der Szenarien wird der direkte Materialeinsatz in Tonnen gerechnet, ohne die Vorketten zu betrachten, und fällt entsprechend deutlich kleiner aus.

2. Szenario: Sekundäranteile

Im Rahmen des zweiten Szenarios wird der mögliche zukünftige Materialeinsatz abgebildet, wenn bestehende Potenziale eines erhöhten Sekundärmaterialieinsatzes genutzt werden. Der Erhöhung der Sekundärrohstoffquote kommt eine Schlüsselrolle zu, um dauerhaft die bayerische Rohstoffeffizienz zu steigern. Eine Erhöhung ermöglicht die Senkung des schädlichen Primärrohstoffbedarfs, ohne die industrielle Produktion selbst zu verringern. Zwar muss auch für die Gewinnung von Sekundärmetallen aus Schrotten Energie eingesetzt werden, doch in der Regel in deutlich geringem Umfang als bei der Gewinnung von Primärmetallen aus Erzen. Dies fördert auch die Klimaverträglichkeit des industriellen Rohstoffkonsums. Da sich die Nutzung von Sekundärrohstoffen, vor allem bei den Mengenrohstoffen Eisen beziehungsweise Stahl, Aluminium und Kupfer, auch heute schon wirtschaftlich deutlich lohnen kann, ist die bayerische Industrie bereits auf

einem hohen Niveau beim Einsatz von Sekundärrohstoffen angekommen.

Im Rahmen dieser Analyse wird auf Arbeiten des Umweltbundesamtes aufgebaut, die sowohl Zahlen zu gegenwärtigen Sekundäreinsatzanteilen als auch möglichen zukünftigen Entwicklungen angeben¹⁰⁹. Aktuell deckt die bayerische Industrie bei Eisen und Stahl ihren Rohstoffbedarf zu circa 31 % mit Sekundärrohstoffen. Für die Szenarien wird angenommen, dass sich dieser Anteil im Beobachtungszeitraum bis 2035 auf bis zu 46 % erhöhen lässt. Bei Aluminium ist der Anteil aktuell mit circa 50 % etwas höher. Der hohe Energieaufwand bei der Produktion von Primäraluminium macht die Nutzung von Sekundärrohstoffen umso rentabler. Im Beobachtungszeitraum lässt sich dieser Anteil laut Untersuchungen um weitere zehn Prozentpunkte auf 60 % erhöhen. Den höchsten aktuellen Sekundärrohstoffanteil weist Kupfer mit circa 55 % auf. Hier ist nur noch eine geringe Steigerung auf circa 60 % erwartbar. Der Anteil von Sekundärmetallen kann aus mehreren Gründen nicht deutlich weiter steigen. Zum einen steigt die Rohstoffnutzung noch immer an, weshalb die bereits im Kreislauf befindlichen Stoffe nicht ausreichen, um diese Steigung abzudecken, auch weil die Rohstoffe häufig lange im Bestand verweilen oder exportiert werden. Zum anderen ist die Qualität der Rohstoffe nach dem Recycling teilweise verringert, weswegen für manche Zwecke keine Sekundärmetalle genutzt werden können.

Wie eingangs beschrieben wird in der Baubranche neben den Metallen auch der Materialeinsatz nicht-metallischer Mineralien sowie der gesonderte Einsatz für die Produktion von Zement abgebildet. Mit Blick auf die gegenwärtigen Sekundärrohstoffquoten zeigt sich, dass innerhalb der Branche bereits heute in hohem Maß Rohstoffe wiedergenutzt werden. Von den verur-

sachten mineralischen Abfallmengen werden etwa 90 % verwertet, wovon ein großer Teil verfüllt wird¹¹⁰ – insbesondere der große Mengenstrom an Boden und Steinen wird verfüllt. In anderen Abfallgruppen zeigt sich ein höherer Recyclinganteil, etwa beim Bauschutt von dem circa 79 % recycelt und weitere 16 % verfüllt werden. Aufgrund der bereits hohen Verwertungsquoten der Branche kann in den kommenden Jahren nur ein begrenztes Potenzial für die Steigerung des Sekundärrohstoffeinsatzes gehoben werden. Im Rahmen der Szenariobetrachtung wird ein verbleibendes Potenzial von fünf Prozent angenommen, das sich insbesondere auf eine weitere Verbesserung des Recyclings von Bauschutt und den Einsatz von recycelter Gesteinskörnung in R-Beton stützt.

3. Szenario: Optimalpfad – Weitergehende Einsparmaßnahmen

Neben der Steigerung des Sekundärrohstoffeinsatzes kann die Ressourceneffizienz in der Industrie durch verschiedene Einspar- und Effizienzmaßnahmen gesteigert werden. Diese werden im dritten Szenario betrachtet. Für die Erstellung der branchenspezifischen Szenarien wurde zunächst ein Katalog mit diversen Maßnahmen zur Verringerung des Rohstoffverbrauchs erstellt. Neben klassischen Effizienzmaßnahmen, die direkt die industrielle Produktion betreffen, wurden auch Nachfrage- und Nutzungsveränderungen wie etwa Sharing-Systeme oder eine verlängerte Produktnutzungsdauer abgedeckt. In einem nächsten Schritt wurden die Einsparpotenziale der Maßnahmen des Katalogs auf Basis der vorliegenden Literatur und weiterer Informationsquellen bewertet. Soweit möglich erfolgte diese Bewertung branchenspezifisch. Wenn durch Literatur und Web-Informationen kein direkter Prozentsatz geschätzt werden konnte, erfolgte die Einschätzung über Impact-Kategorien, denen ein Einsparkorridor zugeordnet wurde. Aus dieser Liste

wurden dann für die Szenariobetrachtung je Branche die drei Maßnahmen mit dem höchsten erwarteten Potenzial gewählt.

Die Ergebnisse stellen nicht die wahrscheinlichen Einsparungen dar. Vielmehr soll das Potenzial aufgezeigt werden, das bei einer vollumfänglichen und sehr zügigen Umsetzung dieser Maßnahmen erreicht werden kann. Als Grundlage dafür wird neben der Bereitschaft der Industrie eine sehr starke politische Stützung der Maßnahmen und hohe Akzeptanz beziehungsweise Kooperation der Bevölkerung angenommen. Diese Voraussetzungen müssen erfüllt werden, um den Ressourcenverbrauch signifikant zu senken und gesetzte Ziele, vor allem auch Klimaziele, zu erreichen.



Fokusbetrachtung Metallbranche

Im Jahr 2020 hat die Metallbranche in Bayern knapp 11 Milliarden Euro an Bruttowertschöpfung geleistet, 2022 waren es bereits über 12 Milliarden Euro. Innerhalb von 10 Jahren ist die Bruttowertschöpfung um etwa 31 % gestiegen. Zwar ist die Branche ein wichtiger Arbeitgeber in Bayern, aber die Beschäftigung ist signifikant geringer als in den übrigen Leitbranchen, etwa dem Fahrzeugbau. Im vergangenen Jahr waren rund 160.000 Erwerbstätige in der Metallbranche beschäftigt¹¹¹.

Mit Blick auf die Handelsverflechtungen der Branche zeigt sich, dass Waren im Wert von knapp 23 Milliarden Euro in das Ausland exportiert wurden. Gleichzeitig beträgt der Import von Metallen und Metallerzeugnissen rund 24 Milliarden Euro.¹¹²

Die gestiegene Bruttowertschöpfung geht mit einem steigenden direkten Materialeinsatz einher. Der Einsatz von Eisenmetallen stieg zwischen 2010 und 2020 von etwa 2,3 Millionen Tonnen auf fast 2,6 Millionen Tonnen. Der Einsatz sowohl von Kupfer als auch Aluminium stieg

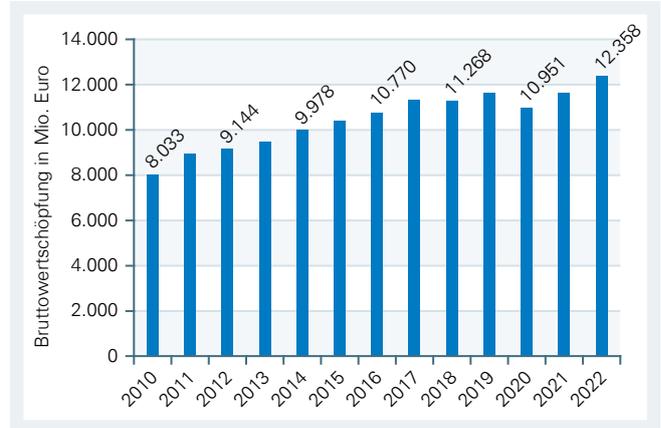


Abb. 52: Bruttowertschöpfung Metallbranche in Millionen Euro¹¹³

leicht, fällt jedoch mit 169 Tausend Tonnen beziehungsweise 189 Tausend Tonnen deutlich geringer aus als der Einsatz von Eisenmetallen. Hält der bisherige Trend des direkten Materialeinsatzes an, steigt die Menge bis zum Jahr 2035 auf fast 3,7 Millionen Tonnen.

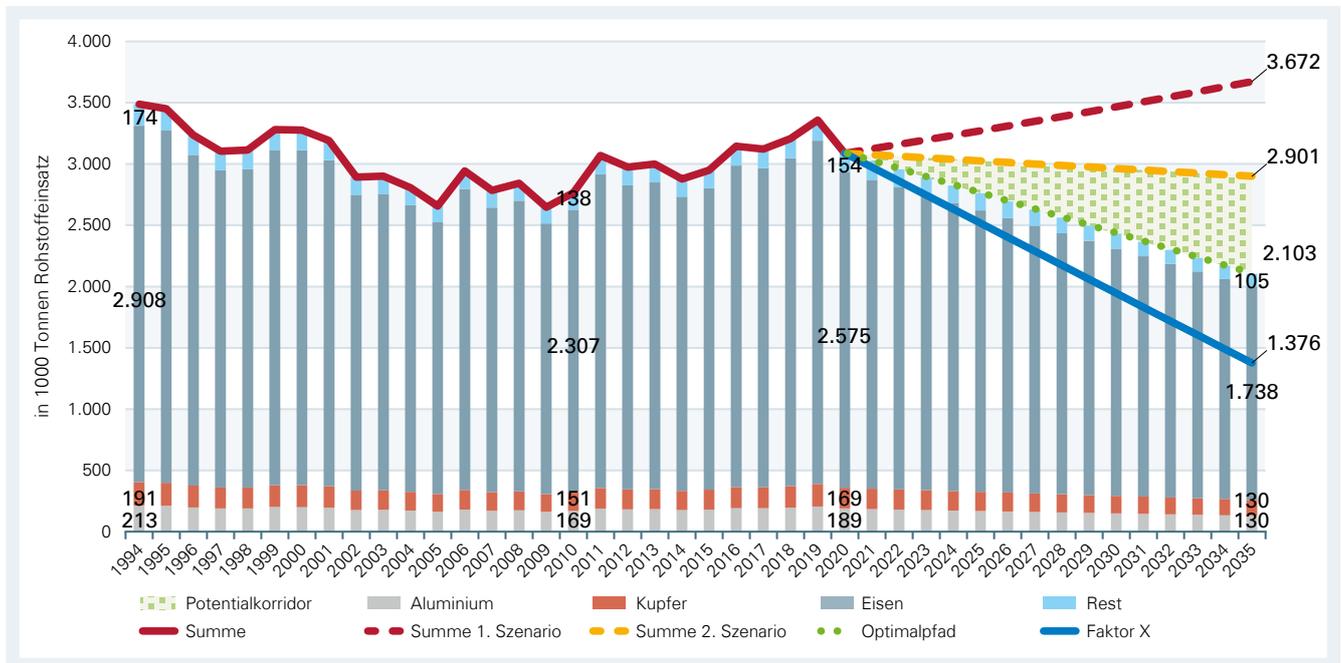


Abb. 53: Szenario des Materialeinsatzes in der Metallbranche zwischen 1994 und 2035, gemessen in Tausend Tonnen¹¹⁴

Lesehilfe: die rote Linie zeigt die Entwicklung des Materialeinsatzes der Metallbranche zwischen 1994 und 2020. Darunter werden die Anteile für Eisen, Aluminium und Kupfer als vertikale Balken abgebildet. Ab dem Jahr 2020 zeigen die gestrichelten Geraden die drei möglichen Zukunftsszenarien und die jeweiligen Endverbräuche im Jahr 2035. Die blaue Gerade zeigt zusätzlich den nötigen Trend auf der Basis des „Faktor X“-Ansatzes.

Mit einer Erhöhung des Sekundäranteils kann in der Metallbranche der Materialeinsatz im Vergleich zum „business as usual“ Szenario (rote Linie) signifikant reduziert werden. Bis zum Jahr 2035 könnte der Einsatz bei etwa 2,9 Millionen Tonnen liegen. Der Vergleich beider Szenarien im Jahr 2035 zeigt einen reduzierten Einsatz um ca. 800 Tausend Tonnen. Die Metallbranche kann damit im zweiten Szenario ihren Materialeinsatz gegenüber dem Ausgangswert des aktuellen Verbrauchs in etwa konstant halten. Darüber hinaus wird deutlich, dass die Metallbranche auch mit einer deutlichen Erhöhung des Sekundäranteils nur eine geringfügige absolute Reduktion des Materialeinsatzes erzielen kann, wenn sich das bisherige Wachstum der Bruttowertschöpfung fort schreibt. Für das dritte Szenario der Metallbranche wurden folgende Maßnahmen in die Berechnung einbezogen:

- Einsatz neuer Technologien und digitalisierter Produktionsprozesse (smart manufacturing, Industrie 4.0)
- Fertigungsprozessoptimierung
- Vermindern von geplantem Verlust und Ausschuss

Vor allem in Deutschland ist die Quote an geplantem Verlust und Ausschuss bereits jetzt relativ niedrig, trotzdem gibt es vor allem durch Modernisierungen und besserer Mess-, Steuer und Regelungstechnik ein relevantes Potenzial diese weiter zu reduzieren. Weitaus bedeutendere Potenziale liegen jedoch in der Fertigungsprozessoptimierung, da hier durch kleine Veränderung am bestehenden Prozess bei geringem Aufwand an verschiedensten Stellen große Wirkungen bei der Verbrauchsminderung erzielt werden können. Und auch in der Metallindustrie können durch die Intensivierung der Nutzung von digitalisierten und stärker vernetzten Prozessen noch erhebliche Effizienzgewinne erzielt werden. In nahezu jedem Produktionsschritt werden hier noch Potenziale vermutet.

Durch diese Maßnahmen wird eine Reduzierung des Verbrauchs bis 2035 um circa 27,5 % angenommen, zusätzlich durch die Effekte der gesteigerten Sekundärquoten aus dem zweiten Szenario. In Abbildung 53 wird deutlich, dass dies zu einer deutlichen Reduktion des Verbrauchs im Jahr 2035 auf 2,1 Millionen Tonnen führt. Damit kann der Ressourcenbedarf im Vergleich zu 2020 um circa 1 Million Tonnen reduziert werden. Allerdings wird der Faktor-X-Pfad dabei nicht erreicht.

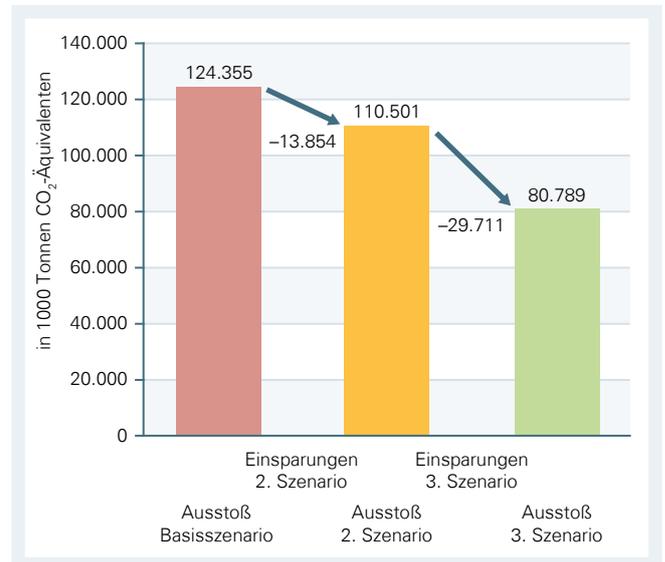


Abb. 54: Vergleich der CO₂-Emissionen der drei Szenarien in der Metallbranche, gemessen in Tausend Tonnen ¹¹⁵

Die Nutzung der Primärmetalle verursacht große Mengen an CO₂-Emissionen, da viel Energie für die Gewinnung und Produktion aufgewendet werden muss. Zusätzlich werden Flächen und Ökosysteme beeinträchtigt beziehungsweise zerstört sowie große Mengen an Wasser verunreinigt. In Abbildung 54 werden die THG-Emissionen der drei Szenarien gegenübergestellt und aufgezeigt welche Einsparungen jeweils möglich sind. Im Basisszenario stößt die Metallbranche zwischen 2020 und 2035 fast 125 Millionen Tonnen Treibhausgase aus. Mit den erhöhten Sekundärquoten des zweiten Szenarios können fast 14 Millionen Tonnen eingespart werden. Mit den Maßnahmen des dritten Szenarios können die Emissionen nochmals um fast 30 Millionen Tonnen gemindert werden. Im gesamten Zeitraum können insgesamt knapp ein Drittel der Emissionen eingespart werden. Diese rohstoffbezogenen Potenziale an sich können die anvisierten THG-Einsparungen, die für die Erreichung des 1,5 Grad-Ziels beziehungsweise des Pariser Klimaabkommens notwendig sind, nicht erreichen. Es müssen also weitere Maßnahmen zur Einsparung des Primärrohstoffverbrauchs unternommen werden.

 Fokusbetrachtung Fahrzeugbau

Der Fahrzeugbau weist die mit Abstand höchste Bruttowertschöpfung der fünf Leitbranchen aus. Im Jahr 2022 betrug diese über 47 Milliarden Euro und wuchs seit 2010 um mehr als die Hälfte an. Die Zahl der Erwerbstätigen betrug im zurückliegenden Jahr rund 295.000, damit ist die Branche nach dem Bau der wichtigste Arbeitgeber in Bayern¹¹⁶. Auch in Bezug auf die Handelsverflechtungen zeigt sich die hohe Relevanz der Branche.

Mit 100 Milliarden Euro an Ausfuhren, ist der Fahrzeugbau der größte Exporteur unter den Leitbranchen. Im gleichen Jahr wurden Waren im Wert von 57 Milliarden Euro nach Bayern importiert.¹¹⁷

Der direkte Materialeinsatz des Fahrzeugbaus besteht im Wesentlichen aus Eisenmetallen, deren Einsatz von knapp 3 Millionen Tonnen im Jahr 2010 auf über 3,3 Millionen Tonnen im Jahr 2020 angestiegen ist. Ein zusätzlicher relevanter Materialeinsatz entfällt auf Aluminium, der von 400 Tausend Tonnen auf über 450 Tausend Tonnen anstieg. Auch Kupfermetalle werden für den Bau von Fahrzeugen eingesetzt, jedoch in deutlich geringerem Umfang als Eisen und Aluminium.



Abb. 55: Bruttowertschöpfung im Fahrzeugbau in Millionen Euro¹¹⁸

Bis zum Jahr 2035 könnte der direkte Materialeinsatz der Branche auf über 4,8 Millionen Tonnen ansteigen, wenn sich die bisherige Trendentwicklung fortsetzt.

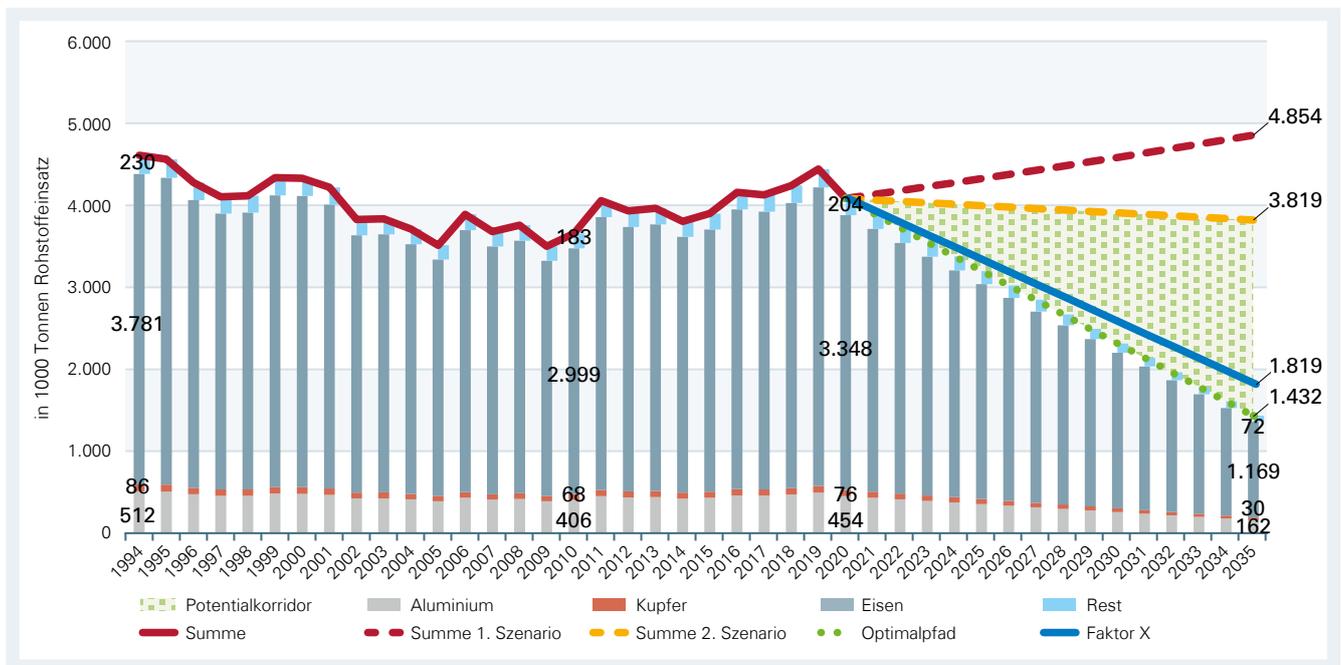


Abb. 56: Szenario des Materialeinsatzes im Fahrzeugbau zwischen 1994 und 2035, gemessen in Tausend Tonnen¹¹⁹

Im Fahrzeugbau bestehen in den kommenden Jahren Potenziale für eine signifikante Erhöhung des Anteils der Sekundärmaterialien in der Produktion, insbesondere in Bezug auf Eisen. Daraus ergibt sich eine Einsparung des Materialeinsatzes gegenüber dem „Business as usual“-Szenario von etwa 1 Million Tonnen im Jahr 2035. Es zeigt sich im Fahrzeugbau jedoch auch, dass etwaige Einsparungen durch die zu erwartende Steigerung der Bruttowertschöpfung ausgeglichen wird. Im Jahr 2035 liegt der Materialeinsatz folglich nur knapp unterhalb des Ausgangswertes im Jahr 2020.

Im dritten Szenario wurden im Fahrzeugbau folgende drei Maßnahmen als besonders relevant identifiziert:

- Produktgestaltung (fertigungsgerecht, nutzungsgerecht und recyclinggerecht)
- Verlängerung der technischen Produktlebensdauer und Produktnutzungsdauer
- Sharing-Systeme

Alle Maßnahmen weisen außerordentlich hohe Potenziale für die Einsparung von Primärrohstoffen auf. Wie in vielen anderen Branchen können in der Produktgestaltung große Effizienzgewinne erzielt werden, die den Einsatz von Rezyklaten fördern und somit die Kreislaufführung von Rohstoffen stärken. Hier werden die allermeisten Rohstoff- und Umweltkosten in der Frühphase der Produktion bereits festgelegt. Weitere Potenziale liegen in der Verlängerung der technischen Produktlebensdauer und Produktnutzungsdauer sowie Sharing-Systemen.

Durch diese Maßnahmen wird eine Reduzierung des Verbrauchs bis 2035 um circa 62,5 % angenommen, zusätzlich zu den Effekten der gesteigerten Sekundärquoten aus dem zweiten Szenario. Abbildung 56 verdeutlicht die resultierende erhebliche Reduktion des Verbrauchs im Jahr 2035 auf circa 1,4 Millionen Tonnen. Damit kann der Ressourcenbedarf im Vergleich zu 2020 um mehr als 2,6 Millionen Tonnen im Jahr verringert werden. Der ambitionierte Faktor-X-Pfad wird dabei sogar übertroffen. Im Vergleich zu dem „Business as usual“-Szenario würde der Rohstoffbedarf an Metallen des Fahrzeugbaus in Bayern um fast 3,5 Millionen Tonnen verringert werden.

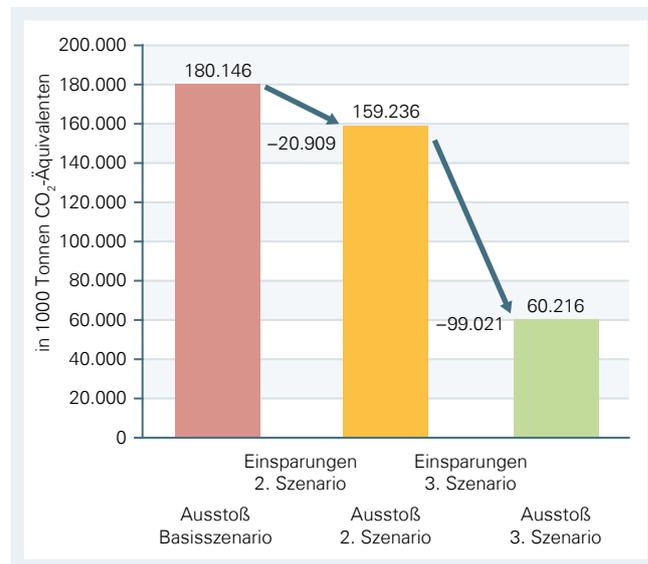


Abb. 57: Vergleich der CO₂-Emissionen der drei Szenarien im Fahrzeugbau, gemessen in Tausend Tonnen¹²⁰

In Abbildung 57 werden für den Fahrzeugbau die THG-Emissionen der drei Szenarien gegenübergestellt. Im Basis-szenario belaufen sich die THG-Emissionen des Fahrzeugbaus zwischen 2020 und 2035 auf über 180 Millionen Tonnen. Mit den gesteigerten Sekundärquoten des zweiten Szenarios können bereits circa 21 Millionen Tonnen eingespart werden. Mit den Maßnahmen des dritten Szenarios können die Emissionen allerdings noch deutlich stärker – um fast 100 Millionen Tonnen zusätzlich – gemindert werden. Im gesamten Zeitraum können damit zwei Drittel der Emissionen eingespart werden. Damit wäre der bayerische Fahrzeugbau auf einem sehr guten Weg, die bundesdeutschen Ziele zur Reduktion des Primärrohstoffbedarfs als auch der THG-Emissionen zu erreichen.



Fokusbetrachtung Maschinenbau

In den Jahren von 2010 bis 2022 ist die Bruttowertschöpfung des Maschinenbaus um über 50 % angestiegen und lag im vergangenen Jahr bei über 23 Milliarden Euro. Im gleichen Jahr waren etwa 238 Tausend Erwerbstätige in der Branche beschäftigt¹²¹. Damit ist der Maschinenbau nach der Bau- und der Fahrzeugbau der drittgrößte Arbeitgeber der betrachteten Leitbranchen.

Mit rund 54 Milliarden Euro ist die Branche auch mit Blick auf die Exportwerte von großer Bedeutung. Die Importe betragen im selben Zeitraum etwa 27 Milliarden Euro.¹²²

Der Maschinenbau ist insbesondere auf den Einsatz von Eisenmetallen angewiesen und zeigt eine Zunahme in den vergangenen Jahren. Der direkte Eiseneinsatz stieg von gut 1,3 Millionen Tonnen im Jahr 2010 auf über 1,4 Millionen Tonnen im Jahr 2020. Zusätzlich werden im Jahr 2020 vergleichsweise kleine Mengen an Kupfer, etwa 68 Tausend Tonnen, und Aluminium, 57 Tausend Tonnen, eingesetzt.

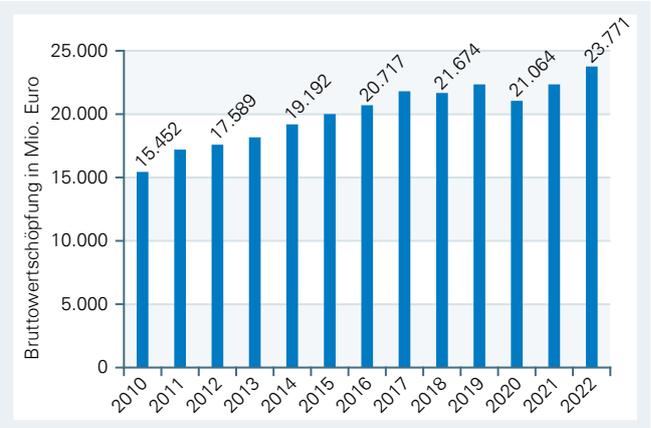


Abb. 58: Bruttowertschöpfung im Maschinenbau in Millionen Euro¹²³

Bei einer anhaltenden Zunahme der Bruttowertschöpfung und der Fortschreibung des bisherigen Trends könnte die Branche bis zum Jahr 2035 über 1,9 Millionen Tonnen an Materialien einsetzen.

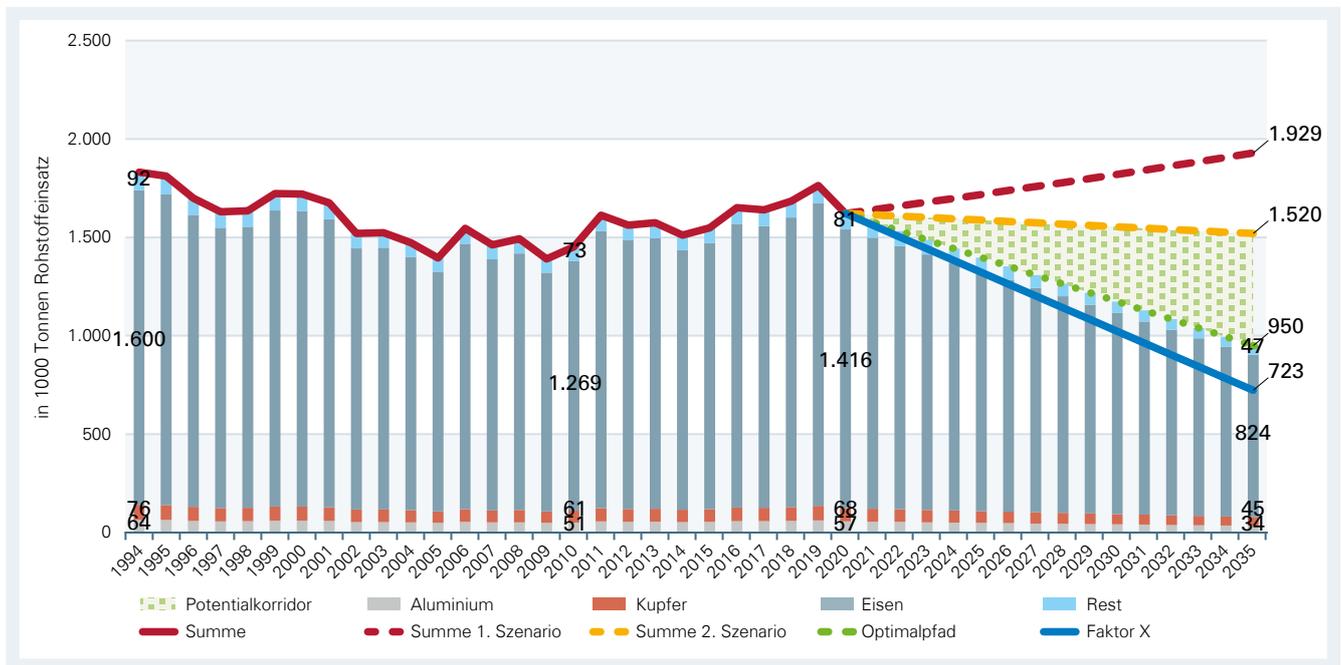


Abb. 59: Szenario des Materialeinsatzes im Maschinenbau zwischen 1994 und 2035, gemessen in Tausend Tonnen¹²⁴

Im zweiten Szenario kann der Maschinenbau mit einer gesteigerten Nachfrage nach Sekundärmetallen den Materialeinsatz im Vergleich zum bisherigen Trend um etwa 400 Tausend Tonnen im Vergleich zum Basisszenario reduzieren. Damit würde jedoch der Materialeinsatz nur geringfügig unterhalb des Wertes von 2020 liegen. Die erhöhte Materialeffizienz wird durch die gestiegene Bruttowertschöpfung fast vollständig ausgeglichen.

Im dritten Szenario wurden im Maschinenbau folgende drei Maßnahmen berücksichtigt:

- Produktgestaltung (fertigungsgerecht, nutzungsgerecht und recyclinggerecht)
- Verlängerung der technischen Produktlebensdauer und Produktnutzungsdauer
- Einsatz neuer Technologien und digitalisierter Produktionsprozesse (smart manufacturing, Industrie 4.0)

Mit einer optimierten Produktgestaltung können frühzeitig viele Rohstoff- und Umweltkosten vermieden werden. Hier liegen nach wie vor große Effizienzpotenziale. Ebenfalls können signifikante Effizienzsteigerungen mithilfe der Verlängerung der technischen Produktlebensdauer und Produktnutzungsdauer erzielt werden. Im Maschinenbau nimmt die durchschnittliche Lebensdauer der hergestellten Produkte stetig ab. Industrielle Maschinen werden immer komplexer und müssen dadurch häufiger ersetzt werden. Auch die Reparatur und die Bedienung für eine lange Lebensdauer sind dadurch erschwert. Hier gilt es Wege zu finden, die Nutzungsdauer durch eine Minimierung der „failure points“ wieder zu erhöhen. Wie auch in vielen anderen Branchen des produzierenden Gewerbes kann auch der Maschinenbau von weiteren Digitalisierungsprozessen massiv profitieren. Prozesse sind häufig noch immer nicht ausreichend vernetzt und umfassend auf Effizienzpotenziale geprüft. Smart manufacturing muss Produktionsketten so optimieren, dass Ressourcen optimal genutzt werden können.

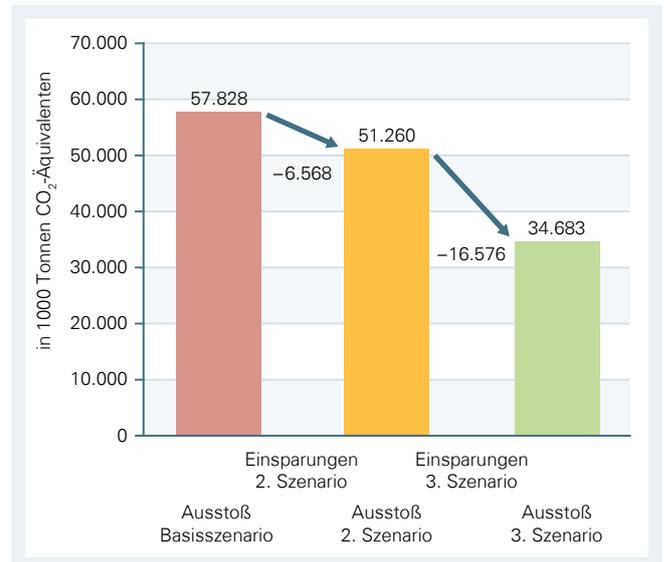


Abb. 60: Vergleich der CO₂-Emissionen der drei Szenarien im Maschinenbau, gemessen in Tausend Tonnen¹²⁵

Ergänzend zu den Effekten der gesteigerten Sekundärquoten aus dem zweiten Szenario kann durch diese Maßnahmen eine Reduzierung des Verbrauchs bis 2035 um schätzungsweise 37,5 % erreicht werden. Wie Abbildung 59 zeigt, führt dies zu einer Reduktion des Verbrauchs im Jahr 2035 auf circa 1 Million Tonnen. Damit kann der Ressourcenbedarf im Vergleich zu 2020 um mehr als 600 Tausend Tonnen im Jahr reduziert werden. Der ambitionierte Faktor-X-Pfad kann dabei nahezu erreicht werden. Im Vergleich zum „business as usual“-Szenario wäre der Rohstoffbedarf an Metallen des Maschinenbaus in Bayern halbiert.

Abbildung 61 zeigt die THG-Emissionen des Maschinenbaus in den drei Szenarien. Im Basisszenario belaufen sich die THG-Emissionen des Maschinenbaus zwischen 2020 und 2035 auf knapp 58 Millionen Tonnen. Mit den gesteigerten Sekundärquoten des zweiten Szenarios können circa 6,5 Millionen Tonnen eingespart werden. Mit den Maßnahmen des dritten Szenarios können die Emissionen weiter um über 16 Millionen Tonnen gemindert werden. Im gesamten Zeitraum können damit circa 40 % der Emissionen eingespart werden. Dies bedeutet jedoch, dass für die Erreichung der deutschen Klimaziele weitere Maßnahmen in der Branche notwendig sind beziehungsweise die vorgeschlagenen Maßnahmen und Sekundärquoten in den Folgejahren weiter deutlich intensiviert beziehungsweise gesteigert werden müssen.



Fokusbetrachtung Elektrobranche

Nach der Baubranche und dem Fahrzeugbau weist die Elektrobranche die dritthöchste Bruttowertschöpfung unter den Leitbranchen aus. Im vergangenen Jahr wurden über 27 Milliarden Euro an Wert geschaffen. Die Bruttowertschöpfung stieg in den vergangenen 10 Jahren kontinuierlich an. Mit etwa 195 Tausend Beschäftigten ist die Branche zudem ein wichtiger Arbeitgeber in Bayern¹²⁶. Im selben Jahr wurden insgesamt Waren im Wert von 75 Milliarden Euro in das Ausland exportiert, das Importvolumen beträgt etwa 78 Milliarden Euro¹²⁷.

Die Elektrobranche zeichnet sich durch einen hohen Anteil des direkten Materialeinsatzes von Kupfer aus. Dieser stieg zwischen 2010 und 2020 von 432 Tausend Tonnen auf über 480 Tausend Tonnen im Jahr 2020 an. Der direkte Materialeinsatz von Eisen betrug im Jahr 2020 etwa 386 Tausend Tonnen, rund 11 % mehr als im Jahr 2010. Zusätzlich werden mit 66 Tausend Tonnen auch kleinere Mengen von Aluminium verarbeitet.

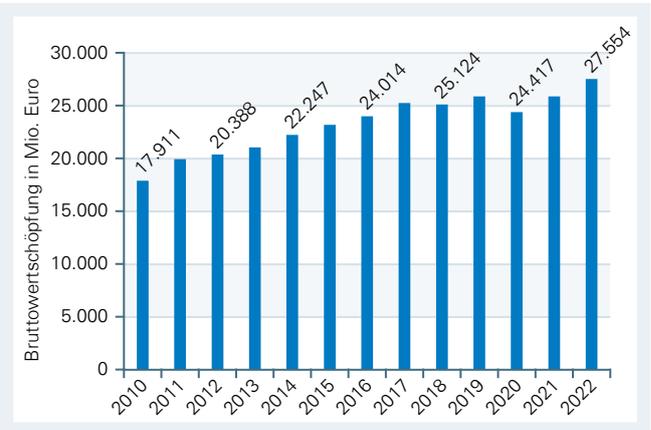


Abb. 61: Bruttowertschöpfung in der Elektrobranche in Millionen Euro¹²⁸

Bei einer gleichbleibenden Trendentwicklung steigt der direkte Materialeinsatz der Branche bis 2035 auf rund 1,2 Millionen Tonnen.

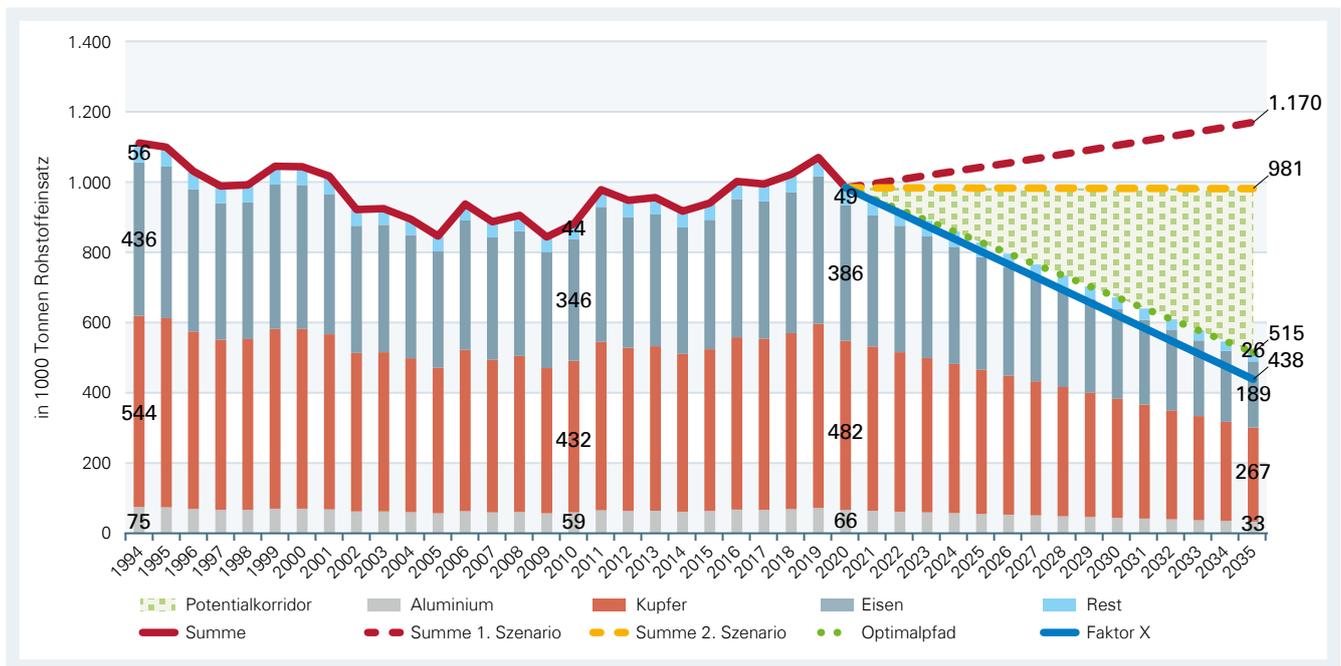


Abb. 62: Szenario des Materialeinsatzes in der Elektrobranche zwischen 1994 und 2035, gemessen in Tausend Tonnen¹²⁹

Das zweite Szenario eines erhöhten Sekundäranteils zeigt eine pessimistischere Entwicklung als in den vorherigen Branchen. Der hohe Anteil von Kupfermetallen in der Produktion der Elektrobranche führt dazu, dass auch bei vollständiger Ausschöpfung der bestehenden Potenziale für Sekundärmaterialeinsatz keine Materialeinsatzreduktion bis 2035 erzielt wird. Dennoch stellt sich heraus, dass der Materialeinsatz deutlich geringer ausfällt als im „business as usual“-Szenario. Knapp 200 Tausend Tonnen können im Jahr 2035 eingespart werden, auch wenn der bisherige Trend der Bruttowertschöpfung anhält.

Im dritten Szenario wurden in der Elektrobranche folgende drei Maßnahmen in die Berechnung einbezogen:

- Produktgestaltung (fertigungsgerecht, nutzungsgerecht und recyclinggerecht)
- Verlängerung der technischen Produktlebensdauer und Produktnutzungsdauer
- Einsatz neuer Technologien und digitalisierter Produktionsprozesse (smart manufacturing, Industrie 4.0)

Die wichtigsten Maßnahmen decken sich damit mit denen des Maschinenbaus. In der Produktgestaltung sind in der Elektroindustrie große Effizienzgewinne möglich. Die Verlängerung der technischen Produktlebensdauer und Produktnutzungsdauer ist in Bezug auf Elektrogeräte von besonderer Bedeutung. Die durchschnittliche Nutzungsdauer der hergestellten Produkte, vor allem für den Privatbereich, nimmt immer weiter ab. Während Produkte für die industrielle Nutzung weniger von dieser Entwicklung betroffen sind, besteht vor allem bei Haushaltselektronik ein Trend zu stark verkürzten Nutzungszyklen und damit häufigeren Neuanschaffungen. Um eine nachhaltige Ressourcennutzung zu ermöglichen, muss diese Rate zurückgehen. Wie auch in vielen anderen Branchen des produzierenden Gewerbes besteht auch in der Elektrobranche noch weiterhin das Potenzial durch neue digitale Technologien und KI den Rohstoffbedarf in der Produktion zu optimieren. Prozesse sind häufig noch immer nicht ausreichend vernetzt und umfassend auf Effizienzpotenziale geprüft.

Diese Maßnahmen können schätzungsweise eine Reduktion des Verbrauchs bis 2035 um circa 47,5 % herbeiführen, ergänzend zu den Effekten der gesteigerten Sekundärquoten aus dem zweiten Szenario. In Abbildung 62 wird gezeigt,

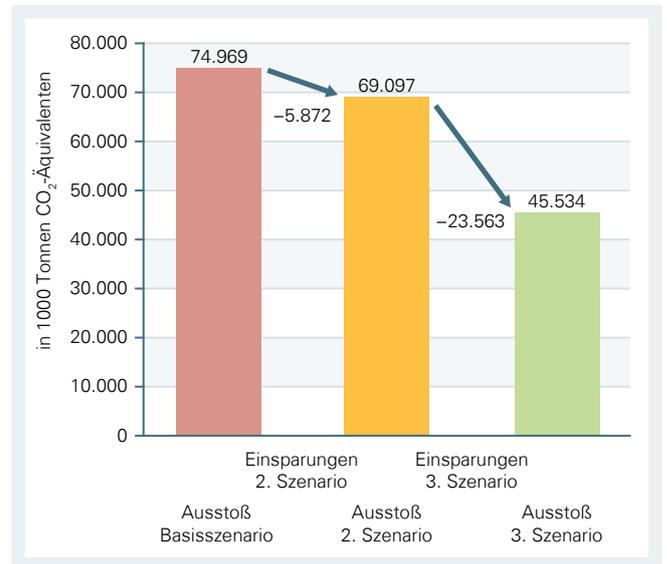


Abb. 63: Vergleich der CO₂-Emissionen der drei Szenarien in der Elektrobranche, gemessen in Tausend Tonnen¹³⁰

dass dies zu einer Reduktion des Verbrauchs im Jahr 2035 auf circa 500 Tausend Tonnen führen würde. Damit kann der Ressourcenbedarf im Vergleich zu 2020 von fast 1 Million Tonnen im Jahr halbiert werden. Der ambitionierte Faktor-X-Pfad kann dabei fast erreicht werden. Im Vergleich zum „business-as-usual“-Szenario wäre der Rohstoffbedarf an Metallen des Maschinenbaus in Bayern deutlich mehr als halbiert.

In Abbildung 63 werden die THG-Emissionen der drei Szenarien der Elektrobranche gegenübergestellt und aufgezeigt, welche Einsparungen jeweils möglich sind. Im Basisszenario belaufen sich die THG-Emissionen des Maschinenbaus zwischen 2020 und 2035 auf knapp 75 Millionen Tonnen. Mit den gesteigerten Sekundärquoten des zweiten Szenarios können rund 6 Millionen Tonnen eingespart werden. Mit den Maßnahmen des dritten Szenarios können die Emissionen weiter um mehr als 23 Millionen Tonnen gemindert werden. Im gesamten Zeitraum können damit circa 40 % der Emissionen eingespart werden. Dies bedeutet jedoch, dass für die Erreichung der deutschen Klimaziele weitere Maßnahmen notwendig sind beziehungsweise die vorgeschlagenen Maßnahmen und Sekundärquoten in den Folgejahren weiter deutlich intensiviert beziehungsweise gesteigert werden müssen.



Fokusbetrachtung Baubranche

Die Baubranche ist in den vergangenen Jahren kontinuierlich gewachsen und leistete im Jahr 2020 eine Bruttowertschöpfung in Höhe von knapp 33 Milliarden Euro. Mit etwa 420 Tausend Beschäftigten ist die Baubranche der größte Arbeitgeber unter den fünf Leitbranchen¹³¹. Mit Blick auf die Im- und Exporte können insbesondere der Handel mit Steinen, Erden und sonstigen Bergbauerzeugnissen der Branche zugerechnet werden. Im vergangenen Jahr exportierte die Branche Waren im Wert von circa 560 Millionen Euro, gleichzeitig wurden etwa 665 Millionen importiert¹³².

Mit Blick auf die Materialverbräuche der Branche zeigt sich ebenfalls ein leicht steigender Trend. Für die größte Materialgruppe der nicht-metallischen Mineralien stieg die Menge von etwa 55 Millionen Tonnen im Jahr 2010 auf über 61 Millionen Tonnen im Jahr 2020 an. Auch der Verbrauch für die Zementproduktion stieg von etwa 6,1 Millionen Tonnen auf 6,8 Millionen Tonnen. Die Metalle Eisen/Stahl, Aluminium und Kupfer verzeichnen ein leichtes Plus von 2,1 Millionen Tonnen auf 2,3 Millionen Tonnen.

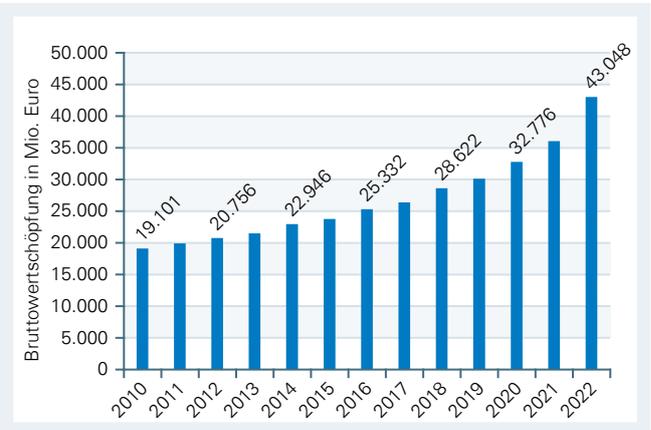


Abb. 64: Bruttowertschöpfung in der Baubranche in Millionen Euro¹³³

Setzt sich dieser Verbrauchstrend in den kommenden Jahren bis 2035 fort, ist mit einer Gesamtmenge von knapp 85 Millionen Tonnen Materialverbrauch auszugehen (siehe rote gestrichelte Linie).

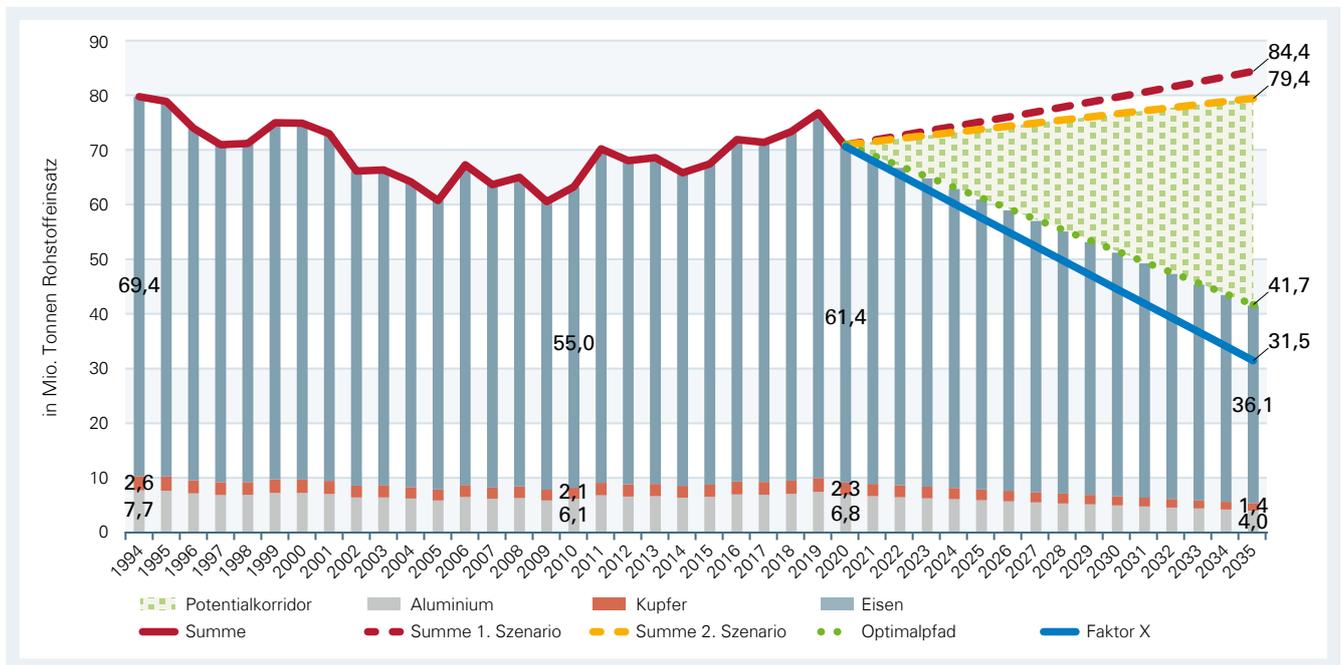


Abb. 65: Szenario des Materialeinsatzes in der Baubranche zwischen 1994 und 2035, gemessen in Millionen Tonnen¹³⁴

In der Baubranche zeigt sich in Szenario zwei, aufgrund der deutlich geringeren Potenziale die Sekundärquote zu erhöhen, nur eine sehr geringe Materialeinsatzreduktion von 5 Millionen Tonnen im Jahr 2035. Der nicht-metallische mineralische Materialeinsatz und die damit einhergehenden hohen Verwertungsquoten resultieren in einem steigenden Trend zwischen 2020 und 2035. Eine absolute Reduktion kann nur mit zusätzlichen Maßnahmen erreicht werden.

Im dritten Szenario wurden in der Baubranche folgende drei Maßnahmen betrachtet:

- Leichtbauweise
- Verlängerung der Infrastrukturlebensdauer und Infrastrukturnutzungsdauer
- Nutzung von nachwachsenden beziehungsweise erneuerbaren Rohstoffen

In der Baubranche wird für viele Projekte deutlich mehr Stahl und Zement verbaut als strukturell notwendig. Oft kann die gleiche strukturelle Stabilität mit weniger als zwei Drittel der Rohstoffe erreicht werden. Bei der Bauplanung kann dies in Zukunft mehr in den Fokus gelegt werden. Ein ähnlich bedeutendes Potenzial ist durch die Verlängerung der Infrastrukturlebensdauer erreichbar. Das wichtigste Ziel bei dem Bau von Neubauten muss die möglichst lange Haltbarkeit und Nutzbarkeit der Produkte sein. Gebäude der Baujahre vor 1950 sind oft deutlich länger in Nutzung als ein durchschnittliches Gebäude der vergangenen Jahrzehnte. Es gilt zukunftsgerichteter zu bauen sowie die modernsten und nachhaltigsten Technologien und Standards zu nutzen, damit eine möglichst lange Nutzung erreicht werden kann und die Anpassung an technologische Entwicklung stets möglich ist. In der Baubranche können außerdem viele Metalle durch die Nutzung von Holz und anderen nachwachsenden Rohstoffen ersetzt werden. Viele strukturelle Elemente können statt durch Zement und Stahl auch durch Holzelemente umgesetzt werden und gleichzeitig die gleiche Haltbarkeit und Stabilität aufweisen. Im Bereich Holzbau wurde in den vergangenen Jahren gezeigt, dass nicht nur Einfamilienhäuser, sondern auch größere Anlagen und gar Hochhäuser mit Holz gebaut werden können. Auch bei den Dämmstoffen können viele mineralische Stoffe durch nachwachsende Materialien ersetzt werden.

Die durch diese Maßnahmen erzielte Reduktion des Verbrauchs bis 2035 wird auf circa 4,75 % geschätzt, zusätzlich der Effekte der gesteigerten Sekundärquoten aus dem zweiten Szenario. In Abbildung 65 führt dies zu einer Reduktion des Verbrauchs im Jahr 2035 auf circa 41,7 Millionen Tonnen. Damit kann der Ressourcenbedarf im Vergleich zu

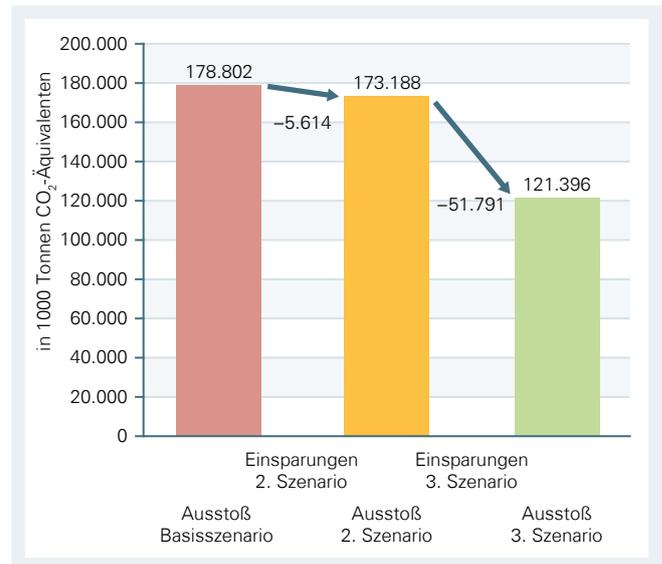


Abb. 66: Vergleich der CO₂-Emissionen der drei Szenarien in der Baubranche, gemessen in Tausend Tonnen¹³⁵

2020 um fast 30 Millionen Tonnen im Jahr reduziert werden. Für die Erreichung des ambitionierten Faktor-X-Pfades wäre eine weitere Reduktion um circa 10 Millionen Tonnen nötig. Im Vergleich zum „business as usual“-Szenario wäre der Rohstoffbedarf der Baubranche in Bayern mehr als halbiert.

Die Nutzung von mineralischen Baustoffen ist im Blick auf den THG-Ausstoß weniger intensiv und fällt daher nicht so stark ins Gewicht. Allerdings verursacht die Nutzung von Primärmetallen und die Zementproduktion große Mengen an CO₂-Emissionen, da große Mengen an Energie für die Gewinnung und Produktion aufgewendet werden müssen. In Abbildung 66 werden die THG-Emissionen der drei Szenarien gegenübergestellt und aufgezeigt, welche Einsparungen jeweils möglich sind. Im Basisszenario belaufen sich die THG-Emissionen der Baubranche zwischen 2020 und 2035 auf fast 180 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalente. Mit den nur geringfügig gesteigerten Sekundärquoten des zweiten Szenarios können nur circa 6 Millionen Tonnen an Ausstoßen verhindert werden. Mit den Maßnahmen des dritten Szenarios können die Emissionen allerdings deutlich um über 50 Millionen Tonnen gemindert werden. Im gesamten Zeitraum können damit allerdings nur knapp ein Drittel der Gesamt-Emissionen eingespart werden. Dies bedeutet, dass diese Maßnahmen nicht genügen, um die Emissionen für die Erreichung des 1,5-Grad Ziels ausreichend zu reduzieren. Bei der Nutzung von nachwachsenden Rohstoffen und dem Leichtbau müssen in den Folgejahren noch weitere Potenziale realisiert werden.

Effizienz zahlt sich aus – werden auch Sie aktiv!

Der umweltverträgliche und schonende Umgang mit unseren Rohstoffen und Materialien ist eine tragende Säule der Kreislaufwirtschaft. Die Entscheidung, welche Ressourcen wie eingesetzt werden, kann wesentlich zur Wettbewerbs- und Zukunftsfähigkeit eines Unternehmens beitragen. Die Implementierung ressourceneffizienter Maßnahmen bietet vielfältige Vorteile: Die Innovationskraft wird gestärkt, Materialkosten werden eingespart, Technologieführerschaften ausgebaut und die Rohstoffversorgung gesichert. Gleichzeitig trägt der optimierte Einsatz von Rohstoffen und Materialien zum betrieblichen Umweltschutz bei. Im verarbeitenden

Gewerbe beispielsweise machen die Materialkosten mit rund 43 % den größten Anteil an den Gesamtkosten aus. Daher lohnt sich hier ein Blick auf die Prozessorganisation, die Materialauswahl und das Produktionsumfeld.

Das Ressourceneffizienz-Zentrum Bayern (REZ) ist die zentrale Drehscheibe für Informationen und Wissen im Bereich betrieblicher Rohstoff- und Materialeffizienz in Bayern. Das REZ ist ein Kooperationsvorhaben zwischen dem Bayerischen Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz (StMUV), dem Bayerischen Landesamt für Umwelt (LfU) und dem Bayerischen Industrie- und Handelskammertag (BIHK) e.V.

Die Angebote des REZ richten sich an alle bayerischen Unternehmen unter besonderer Berücksichtigung von kleinen und mittleren Unternehmen (KMU) des produzierenden und verarbeitenden Gewerbes. Auf unserem Onlineportal können Sie sich umfassend über den effizienten Einsatz von Materialien und Rohstoffen informieren.

Besuchen Sie uns auf:
www.rez.bayern.de



Das REZ bietet Ihnen:

- Beratung zum Thema Material- und Rohstoffeffizienz
- Fachspezifische Veranstaltungen wie Fachvorträge, Workshops und Webinare
- Aufbereitete fachliche Informationen
- Vernetzung zum Thema Forschung und Wissenstransfer, z. B. im Projektverbund ForCYCLE Technikum
- Erfahrungsaustausch mit anderen Unternehmen und Kontakte zu Expertinnen und Experten für innovative technische Lösungen
- Praxisbeispiele von bayerischen Vorreitern
- Überblick über Förderprogramme

Kontakt

Bayerisches Landesamt für Umwelt
Ressourceneffizienz-Zentrum Bayern
(REZ)

Bürgermeister-Ulrich-Straße 160
86179 Augsburg
E-Mail: REZ@lfu.bayern.de
Telefon: 0821 9071-5276

Standorte:

Hauptsitz: Augsburg, Bayerisches
Landesamt für Umwelt
Außenstellen: IHK Nürnberg für
Mittelfranken und IHK für München
und Oberbayern.

Das REZ ist ein Kooperationsvorhaben
des Bayerischen Staatsministeriums
für Umwelt und Verbraucherschutz
(StMUV) und des Bayerischen
Landesamts für Umwelt (LfU) mit dem
Bayerischen Industrie- und Handels-
kammertag (BIHK) e.V.

Die bayerischen Industrie- und
Handelskammern sind an neun
Standorten in Bayern vertreten:
www.bihk.de

Partnerregionen des REZ

- die Regio Augsburg Wirtschaft GmbH (A³),
- die Projektgruppe Prozessinnovation des Fraunhofer Instituts für Produktionstechnik und Automatisierung IPA
- der Verbund der Ostbayerischen Technischen Hochschule Amberg-Weiden und dem Fraunhofer-Institut für Umwelt, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT
- die Fraunhofer Einrichtung für Wertstoffkreisläufe und Ressourcenstrategie IWKS
- sowie die Technische Hochschule Rosenheim.

Anhang

Endnoten

- 1 Datenquelle: © Prognos AG 2019.
- 2 Datenquelle: © Prognos AG 2023, basierend auf Kirchherr, J., Reike, D. & Hekkert, M. (2017): Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions.
- 3 Datenquelle: Europäische Kommission (2023): Study on the Critical Raw Materials for the EU 2023 – Final Report.
- 4 Datenquelle: Europäische Kommission (2023): Der europäische Grüne Deal.
- 5 Datenquelle: Europäische Kommission (2023): Initiative für nachhaltige Produkte.
- 6 Datenquelle: Europäische Kommission (2023): Eco-design for Sustainable Products Regulation.
- 7 Datenquelle: Europäische Kommission (2023): Änderung unserer Produktions- und Verbrauchsmuster: neuer Aktionsplan für Kreislaufwirtschaft ebnet Weg zu klimaneutraler und wettbewerbsfähiger Wirtschaft mit mündigen Verbrauchern.
- 8 Datenquelle: Europäische Kommission (2023): Bio-economy strategy.
- 9 Datenquelle: Europäische Kommission (2023): Single-use plastics.
- 10 Datenquelle: Europäische Kommission (2023): Richtlinie 2008/98/ EG.
- 11 Datenquelle: Europäische Kommission/JRC (2022): Clean Energy Technology Observatory: Wind Energy in the European Union – 2022 Status Report on Technology Development, Trends, Value Chains and Markets.
- 12 Datenquelle: Bayerische Staatskanzlei (2023): Bayerisches Abfallwirtschaftsgesetz.
- 13 Datenquelle: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (2023): Nationale Kreislaufwirtschaftsstrategie.
- 14 Datenquelle: Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz (2023): 7-Punkte-Plan für einen effizienten Ressourceneinsatz in der bayerischen Wirtschaft.
- 15 Datenquelle: Bayerisches Landesamt für Umwelt (2022): Hausmüll in Bayern – Bilanzen 2021.
- 16 Datenquelle: Bayerische Staatsregierung (2023): Bayerische Nachhaltigkeitsstrategie.
- 17 Datenquelle: Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz (2023): Bayerisches Klimapaket II.
- 18 Datenquelle: Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie (2023): Die Bayerische Rohstoffstrategie.
- 19 Datenquelle: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (2023): Normungsrroadmap Circular Economy: Neue Handlungsoptionen für die grüne Transformation.
- 20 Datenquelle: Eurostat (2023): Beitrag der recycelten Materialien zur Rohstoffnachfrage, Recycling-Rate am Ende des Lebens (EOL-RIR).
- 21 Datenquelle: CONVERSIO (2022): Stoffstrombild Kunststoffe in Deutschland 2021.
- 22 Datenquelle: Umweltbundesamt (2023): Recyclingpapier ist gut für die Umwelt.
- 23 Datenquelle: Umweltbundesamt (2023): Altglas richtig trennen und entsorgen.
- 24 Datenquelle: Bayerisches Landesamt für Umwelt (2022): Ressourceneffizienz-Zentrum Bayern: Ausbau zum CleanTech Hub für Kreislaufwirtschaft der Zukunft, Bayerisches Landesamt für Umwelt [Hrsg.] (2011): Hausmüll in Bayern Bilanzen 2010.
- 25 Zur begrifflichen Einordnung siehe das Kapitel Kreislaufwirtschaft – Chancen für bayerische Unternehmen.
- 26 Datenquelle: Arbeitskreis Umweltökonomische Gesamtrechnungen der Länder (2022): Umweltökonomische Gesamtrechnung der Länder, © Prognos AG 2023.
- 27 Datenquelle: Umweltbundesamt [Hrsg.] (2012): Glossar zum Ressourcenschutz, Umweltbundesamt [Hrsg.] (2012): Indikatoren/Kennzahlen für den Rohstoffverbrauch im Rahmen der Nachhaltigkeitsdiskussion, Umweltbundesamt (2023): Indikator: Rohstoff-Fußabdruck, Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie (2013): Material Flow Analysis – Systematik der Indikatoren.
- 28 Datenquelle: Arbeitskreis Umweltökonomische Gesamtrechnungen der Länder (2022): Umweltökonomische Gesamtrechnung der Länder, © Prognos AG 2023.
- 29 Datenquelle: Arbeitskreis Umweltökonomische Gesamtrechnungen der Länder (2022): Umweltökonomische Gesamtrechnung der Länder, © Prognos AG 2023.
- 30 Datenquelle: Statistisches Bundesamt (2024): Statistischer Bericht Außenhandel August 2024, © Prognos AG 2023.
- 31 Datenquelle: Statistisches Bundesamt (2024): Statistischer Bericht Außenhandel August 2024, © Prognos AG 2023.
- 32 Datenquelle: Statistisches Bundesamt (2024): Statistischer Bericht Außenhandel August 2024, © Prognos AG 2023.
- 33 Datenquelle: Statistisches Bundesamt (2024): Statistischer Bericht Außenhandel August 2024, © Prognos AG 2023.
- 34 Datenquelle: Statistisches Bundesamt (2024): Statistischer Bericht Außenhandel August 2024, © Prognos AG 2023.

- 35 Datenquelle: Statistisches Bundesamt (2024): Statistischer Bericht Außenhandel August 2024, © Prognos AG 2023.
- 36 Datenquelle: Eurostat (2018): Circular material use rate – Calculation Method.
- 37 Vor dem Hintergrund unzureichender Datenverfügbarkeiten kann keine ganzheitliche Ermittlung aller Materialflüsse und insbesondere der Mengen der verschiedenen Abfallbehandlungsoptionen anhand der Umweltökonomischen Gesamtrechnung durchgeführt werden. Daher wurde die Gesamtabfallmenge mittels des bayerischen Anteils am bundesweiten BIP und dem bundesweiten Gesamtabfallaufkommens approximiert. Die in Abbildung 12 dargestellten Material- und Abfallfraktionen wurden, sofern keine statistischen Daten für 2020 vorlagen, durch Fortschreibungen und annahmebasierte Berechnungen bestimmt.
- 38 Aufgrund von Rundungen auf ganze Zahlen zur Harmonisierung der Summen innerhalb des Materialflussdiagramms entsprechen einzelne Posten nicht exakt ihren tatsächlichen Werten. Die bilanzierten Emissionen werden in Millionen Tonnen CO₂-Äquivalenten angegeben und sind damit nicht eins zu eins mit übrigen Materialmengen in ein Verhältnis zu setzen.
- 39 Datenquelle: Eurostat (2023): Beitrag der recycelten Materialien zur Rohstoffnachfrage, Recycling-Rate am Ende des Lebens (EOL-RIR).
- 40 Datenquellen: Arbeitskreis Umweltökonomische Gesamtrechnungen der Länder (2022): Umweltökonomische Gesamtrechnung der Länder, Bayerisches Landesamt für Umwelt [Hrsg.] Hausmüll in Bayern Bilanzen 2021, Bayerisches Landesamt für Statistik [Hrsg.] (2022): Entsorgung von Bauabfällen in Bayern, Statistisches Bundesamt (Destatis) (2022): Abfallbilanz 2020, © Prognos AG.
- 41 Datenquellen: Statista. Bruttoinlandsprodukt von Bayern bis 2023; Eurostat (2023): Beitrag der recycelten Materialien zur Rohstoffnachfrage, Recycling-Rate am Ende des Lebens (EOL-RIR), © Prognos AG.
- 42 Die End-of-Life Recycling Input Rate (kurz: EOL-RIR) „misst, für einen jeweiligen Rohstoff, wieviel seines in der Produktion eingesetzten Materials aus recyceltem Altschrott, daher Schrott aus Altmaterial, besteht. Der [...] Indikator berücksichtigt keinerlei Schrott, der im Fertigungsprozess entsteht („neuer Schrott“)“ Eurostat (2023): Beitrag der recycelten Materialien zur Rohstoffnachfrage, Recycling-Rate am Ende des Lebens (EOL-RIR).
- 43 Die für die jeweiligen Indikatoren und Darstellungen verwendeten Studien/Quellen werden in verkürzter Form in den Endnoten und ausführlich im Literatur-/Quellenverzeichnis aufgeführt.
- 44 basierend auf DERA [Hrsg.] (2021): DERA-Rohstoffliste 2021. Europäische Kommission (2023): Study on the Critical Raw Materials for the EU 2023 – Final Report, Vereinigung der Bayerischen Wirtschaft e.V. (vbw) (2022): Rohstoffsituation der bayerischen Wirtschaft.
- 45 basierend auf Europäische Kommission (2023): Study on the Critical Raw Materials for the EU 2023 – Final Report, Eurostat (2023): Beitrag der recycelten Materialien zur Rohstoffnachfrage, Recycling-Rate am Ende des Lebens (EOL-RIR).
- 46 Die Ermittlung der Substituierbarkeit basiert größtenteils auf den in Europäische Kommission (2023): Study on the Critical Raw Materials for the EU 2023 – Final Report für die jeweiligen Rohstoffe angegebenen Substitutionsindizes „Economic Importance“ und „Supply Risk“.
- 47 basierend auf Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (2022): Informationsblatt CO₂-Faktoren, Umweltbundesamt [Hrsg.] (2012): Indikatoren/Kennzahlen für den Rohstoffverbrauch im Rahmen der Nachhaltigkeitsdiskussion.
- 48 basierend auf Umweltbundesamt [Hrsg.] (2012): Indikatoren/Kennzahlen für den Rohstoffverbrauch im Rahmen der Nachhaltigkeitsdiskussion.
- 49 basierend auf Umweltbundesamt [Hrsg.] (2012): Indikatoren / Kennzahlen für den Rohstoffverbrauch im Rahmen der Nachhaltigkeitsdiskussion
- 50 basierend auf Statistisches Bundesamt (2023).
- 51 basierend auf U. S. Geological Survey (2023): Historical Statistics for Mineral and Material Commodities in the United States, U. S. Geological Survey (2023): Mineral commodity summaries 2023.
- 52 basierend auf U. S. Geological Survey (2023): Historical Statistics for Mineral and Material Commodities in the United States, U. S. Geological Survey (2023): Mineral commodity summaries 2023.
- 53 Datenquelle: © Prognos AG.
- 54 Datenquelle: Europäische Kommission (2023): Study on the Critical Raw Materials for the EU 2023 – Final Report.
- 55 Zwar bleiben hier die Nachfrage nach inländisch gewonnen Rohstoffen wie auch die Rohstoffbezüge aus anderen Bundesländern unberücksichtigt, diese Informationen stehen jedoch auf dieser kleinräumigen Ebene nicht im benötigten Detaillierungsgrad zur Verfügung.
- 56 Datenquelle: © Prognos AG.
- 57 Datenquelle: © Prognos AG.
- 58 Datenquelle: © Prognos AG.
- 59 Datenquelle: © Prognos AG.
- 60 Datenquelle: © Prognos AG.
- 61 Datenquelle: © Prognos AG.
- 62 Datenquelle: © Prognos AG.
- 63 Datenquelle: © Prognos AG.

- 64 Datenquelle: © Prognos AG.
- 65 Datenquelle: © Prognos AG.
- 66 Datenquelle: © Prognos AG.
- 67 Datenquelle: © Prognos AG.
- 68 Datenquelle: © Prognos AG.
- 69 Datenquelle: © Prognos AG.
- 70 Datenquelle: © Prognos AG.
- 71 Datenquelle: © Prognos AG.
- 72 Datenquelle: © Prognos AG.
- 73 Datenquelle: © Prognos AG.
- 74 Datenquelle: © Prognos AG.
- 75 Datenquelle: © Prognos AG.
- 76 Datenquelle: © Prognos AG.
- 77 Datenquelle: © Prognos AG.
- 78 Datenquelle: © Prognos AG.
- 79 Datenquelle: © Prognos AG.
- 80 Datenquelle: © Prognos AG.
- 81 Datenquelle: © Prognos AG.
- 82 Datenquelle: © Prognos AG.
- 83 Datenquelle: © Prognos AG.
- 84 Datenquelle: © Prognos AG.
- 85 Datenquelle: © Prognos AG.
- 86 Datenquelle: © Prognos AG.
- 87 Datenquelle: © Prognos AG.
- 88 Datenquelle: © Prognos AG.
- 89 Datenquelle: © Prognos AG.
- 90 Datenquelle: © Prognos AG.
- 91 Datenquelle: © Prognos AG.
- 92 Datenquelle: Europäische Kommission/JRC (2020): Critical materials for strategic technologies and sectors in the EU – a foresight study, 2020.
- 93 Datenquelle: Europäische Kommission/JRC (2020): Critical materials for strategic technologies and sectors in the EU – a foresight study, 2020.
- 94 Datenquelle: ERMA (2021): Rare Earth Magnets and Motors: A European Call for Action. A report by the Rare Earth Magnets and Motors Cluster; Europäische Kommission/JRC (2022): Clean Energy Technology Observatory: Wind Energy in the European Union – 2022 Status Report on Technology Development, Trends, Value Chains and Markets.
- 95 Datenquelle: U. S. Geological Survey (2023): Historical Statistics for Mineral and Material Commodities in the United States.
- 96 Datenquelle: IHK für München und Oberbayern [Hrsg.] (2022): Wie abhängig ist Deutschland von Rohstoffimporten? Eine Analyse für die Produktion von Schlüsseltechnologien.
- 97 Datenquelle: Öko Institut (2017): Strategien für die nachhaltige Rohstoffversorgung der Elektromobilität. Synthesepapier zum Rohstoffbedarf für Batterien und Brennstoffzellen. Studie im Auftrag von Agora Verkehrswende.
- 98 Datenquelle: Europäische Kommission/JRC (2020): Raw materials demand for wind and solar PV technologies in the transition towards a decarbonised energy system.
- 99 Datenquelle: U. S. Geological Survey (2023): Mineral commodity summaries 2023.
- 100 Datenquelle: Prognos Economic Outlook © Prognos AG 2023.
- 101 Datenquelle: Eurostat (2023): Beitrag der recycelten Materialien zur Rohstoffnachfrage, Recycling-Rate am Ende des Lebens (EOL-RIR).
- 102 Datenquelle: Eurostat (2023): Beitrag der recycelten Materialien zur Rohstoffnachfrage, Recycling-Rate am Ende des Lebens (EOL-RIR).
- 103 Neben den fünf betrachteten Leitbranchen weist auch die Chemie- und Pharmaindustrie einen hohen Rohstoffverbrauch auf und generiert eine signifikante Bruttowertschöpfung. Allerdings wird sie auf Grund ihres heterogenen Rohstoffeinsatzes in der nachfolgenden Analyse nicht betrachtet. Neben abiotischen werden in der Branche auch in signifikantem Umfang biotische Rohstoffe eingesetzt. Im Unterschied zu den fünf Leitbranchen finden sich kaum belastbare Abschätzungen zu Rohstoffeinsparpotenzialen, die für die nachfolgenden Potenzialszenarien relevant sind.
- 104 Datenquelle: Arbeitskreis Umweltökonomische Gesamtrechnungen der Länder (2022): Umweltökonomische Gesamtrechnung der Länder, Prognos Economic Outlook, © Prognos AG 2023.
- 105 Datenquelle: Arbeitskreis Umweltökonomische Gesamtrechnungen der Länder (2022): Umweltökonomische Gesamtrechnung der Länder, Prognos Economic Outlook, © Prognos AG 2023.
- 106 Datenquelle: Arbeitskreis Umweltökonomische Gesamtrechnungen der Länder (2022): Umweltökonomische Gesamtrechnung der Länder, Prognos Economic Outlook, © Prognos AG 2023.
- 107 Datenquelle: Umweltbundesamt (2023): Faktor X.
- 108 Datenquelle: Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (2022): Informationsblatt CO₂-Faktoren.
- 109 Datenquelle: Umweltbundesamt [Hrsg.] (2019): Wege in eine ressourcenschonende Treibhausgasneutralität.
- 110 Datenquelle: Bundesverband Baustoffe- Steine und Erden e.V. [Hrsg.] (2023): Mineralische Bauabfälle Monitoring 2020.
- 111 Datenquelle: Bundesagentur für Arbeit (2023): Beschäftigte nach Wirtschaftszweigen (WZ 2008) Bayern Juni 2022.
- 112 Datenquelle: Statistisches Bundesamt (2024): Statistischer Bericht Außenhandel August 2024, Prognos Economic Outlook © Prognos AG 2023.
- 113 Datenquelle: Prognos Economic Outlook, 2023. © Prognos AG 2023.

- 114 Gesamtrechnungen der Länder (2022): Umweltökonomische Gesamtrechnung der Länder, Prognos Economic Outlook, © Prognos AG 2023.
- 115 Datenquelle: © Prognos AG 2023.
- 116 Datenquelle: Bundesagentur für Arbeit (2023): Beschäftigte nach Wirtschaftszweigen (WZ 2008) Bayern Juni 2022.
- 117 Datenquelle: Statistisches Bundesamt (2024): Statistischer Bericht Außenhandel August 2024, Prognos Economic Outlook © Prognos AG 2023.
- 118 Datenquelle: Prognos Economic Outlook, © Prognos AG 2023.
- 119 Datenquelle: Arbeitskreis Umweltökonomische Gesamtrechnungen der Länder (2022): Umweltökonomische Gesamtrechnung der Länder, Prognos Economic Outlook, © Prognos AG 2023.
- 120 Datenquelle: © Prognos AG 2023.
- 121 Datenquelle: Bundesagentur für Arbeit (2023): Beschäftigte nach Wirtschaftszweigen (WZ 2008) Bayern Juni 2022.
- 122 Datenquelle: Statistisches Bundesamt (2024): Statistischer Bericht Außenhandel August 2024, Prognos Economic Outlook © Prognos AG 2023.
- 123 Datenquelle: Prognos Economic Outlook, © Prognos AG 2023.
- 124 Datenquelle: Arbeitskreis Umweltökonomische Gesamtrechnungen der Länder (2022): Umweltökonomische Gesamtrechnung der Länder, Prognos Economic Outlook, © Prognos AG 2023.
- 125 Datenquelle: © Prognos AG 2023.
- 126 Datenquelle: Bundesagentur für Arbeit (2023): Beschäftigte nach Wirtschaftszweigen (WZ 2008) Bayern Juni 2022.
- 127 Datenquelle: Statistisches Bundesamt (2024): Statistischer Bericht Außenhandel August 2024, Prognos Economic Outlook © Prognos AG 2023.
- 128 Datenquelle: Prognos Economic Outlook, © Prognos AG 2023.
- 129 Datenquelle: Gesamtrechnungen der Länder (2022): Umweltökonomische Gesamtrechnung der Länder, Prognos Economic Outlook, © Prognos AG 2023.
- 130 Datenquelle: © Prognos AG 2023.
- 131 Datenquelle: Bundesagentur für Arbeit (2023): Beschäftigte nach Wirtschaftszweigen (WZ 2008) Bayern Juni 2022.
- 132 Datenquelle: Statistisches Bundesamt b (2024): Statistischer Bericht Außenhandel August 2024.
- 133 Datenquelle: Prognos Economic Outlook, © Prognos AG 2023.
- 134 Datenquelle: Gesamtrechnungen der Länder (2022): Umweltökonomische Gesamtrechnung der Länder, Prognos Economic Outlook, © Prognos AG 2023.
- 135 Datenquelle: © Prognos AG 2023.

Literaturverzeichnis

- Arbeitskreis Umweltökonomische Gesamtrechnungen der Länder (2022): Umweltökonomische Gesamtrechnung der Länder, <https://www.statistikportal.de/de/ugrdl/veroeffentlichungen> (Abruf am 4. Dezember 2023).
- Bayerische Staatskanzlei (2023): Bayerisches Abfallwirtschaftsgesetz, <https://www.gesetze-bayern.de/Content/Document/BayAbfAlG/true> (Abruf am 4. Dezember 2023).
- Bayerische Staatsregierung (2023): Bayerische Nachhaltigkeitsstrategie, <https://www.nachhaltigkeit.bayern.de/> (Abruf am 4. Dezember 2023).
- Bayerisches Landesamt für Statistik [Hrsg.] (2022): Entsorgung von Bauabfällen in Bayern 2018, https://www.statistik.bayern.de/mam/produkte/veroeffentlichungen/statistische_berichte/q2400c_201851.pdf (Abruf am 4. Dezember 2023).
- Bayerisches Landesamt für Umwelt [Hrsg.] (2011): Hausmüll in Bayern Bilanzen 2010, https://www.bestellen.bayern.de/shoplink/lfu_abfall_00186.htm (Abruf am 4. Dezember 2023).
- Bayerisches Landesamt für Umwelt [Hrsg.] (2022): Hausmüll in Bayern – Bilanzen 2021, <https://www.abfallbilanz.bayern.de/doc/2021/Abfallbilanz2021.pdf> (Abruf am 4. Dezember 2023).
- Bayerisches Landesamt für Umwelt (2022): Ressourceneffizienz-Zentrum Bayern: Ausbau zum CleanTech Hub für Kreislaufwirtschaft der Zukunft, <https://www.lfu.bayern.de/pressemitteilungen/c/1693505/35-22-ressourceneffizienz-zentrum-bayern-ausbau-zum-cleantech-hub> (Abruf am 4. Dezember 2023).
- Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz (2023): 7-Punkte-Plan für einen effizienten Ressourceneinsatz in der bayerischen Wirtschaft, <https://www.stmuv.bayern.de/themen/ressourcenschutz/ressourcenstrategie/index.htm> (Abruf am 4. Dezember 2023).
- Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz (2023): Bayerisches Klimapakett II, <https://www.stmuv.bayern.de/themen/klimaschutz/klimapakett/index.htm> (Abruf am 4. Dezember 2023).

- Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie (2023): Die Bayerische Rohstoffstrategie, <http://www.rohstoffstrategie-bayern.de/> (Abruf am 4. Dezember 2023).
- Bundesagentur für Arbeit (2023): Beschäftigte nach Wirtschaftszweigen (WZ 2008) Bayern Juni 2022, https://statistik.arbeitsagentur.de/SiteGlobals/Forms/Suche/Einzelheftsuche_Formular.html?topic_f=beschaeftigung-sozbe-wz-heft&dateOfRevision=201403-202206 (Abruf am 4. Dezember 2023).
- Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (2022): Informationsblatt CO₂-Faktoren, https://www.bafa.de/SharedDocs/Downloads/DE/Energie/eew_infoblatt_co2_faktoren_2021.html (Abruf am 4. Dezember 2023).
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (2023): Kreislaufwirtschaftsgesetz, <https://www.bmu.de/gesetz/kreislaufwirtschaftsgesetz> (Abruf am 4. Dezember 2023).
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (2023): Nationale Kreislaufwirtschaftsstrategie, <https://www.bmu.de/themen/kreislaufwirtschaft/kreislaufwirtschaftsstrategie> (Abruf am 4. Dezember 2023).
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (2023): Normungsroadmap Circular Economy: Neue Handlungsoptionen für die grüne Transformation, <https://www.bmu.de/pressemitteilung/normungsroadmap-circular-economy-neue-handlungsoptionen-fuer-die-gruene-transformation> (Abruf am 4. Dezember 2023).
- Bundesverband Baustoffe- Steine und Erden e. V. [Hrsg.] (2023): Mineralische Bauabfälle Monitoring 2020, <https://kreislaufwirtschaft-bau.de/Download/Bericht-13.pdf> (Abruf am 4. Dezember 2023).
- CONVERSIO (2022): Stoffstrombild Kunststoffe in Deutschland 2021, https://www.bvse.de/dateien2020/2-PDF/01-Nachrichten/03-Kunststoff/2022/Kurzfassung_Stoffstrombild_2021_13102022_1_.pdf (Abruf am 4. Dezember 2023).
- DERA [Hrsg.] (2021): DERA-Rohstoffliste 2021, https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/DERA_Rohstoffinformationen/rohstoffinformationen-49.pdf?__blob=publicationFile (Abruf am 4. Dezember 2023).
- ERMA (2021): Rare Earth Magnets and Motors: A European Call for Action. A report by the Rare Earth Magnets and Motors Cluster, https://eit.europa.eu/sites/default/files/2021_09-24_ree_cluster_report2.pdf (Abruf am 4. Dezember 2023).
- Europäische Kommission (2023): Study on the Critical Raw Materials for the EU 2023 – Final Report, https://single-market-economy.ec.europa.eu/publications/study-critical-raw-materials-eu-2023-final-report_en (Abruf am 4. Dezember 2023).
- Europäische Kommission (2023): Circular economy action plan, https://environment.ec.europa.eu/strategy/circular-economy-action-plan_en (Abruf am 4. Dezember 2023).
- Europäische Kommission (2023): Der europäische Grüne Deal, https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_de (Abruf am 4. Dezember 2023).
- Europäische Kommission (2023): Initiative für nachhaltige Produkte, https://ec.europa.eu/info/law/better-regulation/have-your-say/initiatives/12567-Initiative-fur-nachhaltige-Produkte_de (Abruf am 4. Dezember 2023).
- Europäische Kommission (2023): Ecodesign for Sustainable Products Regulation, https://commission.europa.eu/energy-climate-change-environment/standards-tools-and-labels/products-labelling-rules-and-requirements/sustainable-products/ecodesign-sustainable-products-regulation_de (Abruf am 4. Dezember 2023).
- Europäische Kommission (2023): Änderung unserer Produktions- und Verbrauchsmuster: neuer Aktionsplan für Kreislaufwirtschaft ebnet Weg zu klimaneutraler und wettbewerbsfähiger Wirtschaft mit mündigen Verbrauchern, https://ec.europa.eu/commission/press-corner/detail/de/ip_20_420 (Abruf am 4. Dezember 2023).
- Europäische Kommission (2023): Bioeconomy strategy, https://research-and-innovation.ec.europa.eu/research-area/environment/bioeconomy/bioeconomy-strategy_en (Abruf am 4. Dezember 2023).
- Europäische Kommission (2023): Single-use plastics, https://environment.ec.europa.eu/topics/plastics/single-use-plastics_en (Abruf am 4. Dezember 2023).

- Europäische Kommission (2023): Richtlinie 2008/98/EG, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=celex%3A32008L0098> (Abruf am 4. Dezember 2023).
- Europäische Kommission/JRC (2022): Clean Energy Technology Observatory: Wind Energy in the European Union – 2022 Status Report on Technology Development, Trends, Value Chains and Markets, <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC130582> (Abruf am 4. Dezember 2023).
- Europäische Kommission/JRC (2020): Critical materials for strategic technologies and sectors in the EU – a foresight study, 2020, https://rmis.jrc.ec.europa.eu/uploads/CRMs_for_Strategic_Technologies_and_Sectors_in_the_EU_2020.pdf (Abruf am 4. Dezember 2023).
- Europäische Kommission/JRC (2020): Raw materials demand for wind and solar PV technologies in the transition towards a decarbonised energy system, <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/19aae047-7f88-11ea-aea8-01aa75ed71a1/language-en> (Abruf am 4. Dezember 2023).
- Eurostat (2018): Circular material use rate – Calculation Method, <https://ec.europa.eu/eurostat/documents/3859598/9407565/KS-FT-18-009-EN-N.pdf/b8efd42b-b1b8-41ea-aaa0-45e127ad2e3f> (Abruf am 4. Dezember 2023).
- Eurostat (2023): Beitrag der recycelten Materialien zur Rohstoffnachfrage, Recycling-Rate am Ende des Lebens (EOL-RIR), [https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/CEI_SRM010\\$DEFAULTVIEW/default/table?lang=de](https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/CEI_SRM010$DEFAULTVIEW/default/table?lang=de) (Abruf am 4. Dezember 2023).
- Eurostat (2023): Gliederung des Bruttoinlandsprodukts und Einkommens nach A*10 Wirtschaftsbereichen, <https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/bookmark/e0c5e-ac1-ce28-4a85-aba2-64583dfe751b?lang=de> (Abruf am 4. Dezember 2023).
- IHK für München und Oberbayern [Hrsg.] (2022): Wie abhängig ist Deutschland von Rohstoffimporten? Eine Analyse für die Produktion von Schlüsseltechnologien, https://www.ifo.de/DocDL/ifo-Studie_Rohstoffimporte.pdf (Abruf am 4. Dezember 2023).
- Kirchherr, J., Reike, D., & Hekkert, M. (2017): Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. In Resources, Conservation and Recycling (S. 221–232).
- Mast, J., Unruh, F., & Irrek, W. (2022): R-Strategien und Innovation im Circular Economy Management. Unternehmerische Strategien der zirkulären Wertschöpfung. Prosperkolleg, https://prosperkolleg.ruhr/wp-content/uploads/2022/05/prospektiven_22-04_r-strategien.pdf (Abruf am 4. Dezember 2023).
- Öko Institut (2017): Strategien für die nachhaltige Rohstoffversorgung der Elektromobilität. Synthesepapier zum Rohstoffbedarf für Batterien und Brennstoffzellen. Studie im Auftrag von Agora Verkehrswende, https://www.agora-verkehrswende.de/fileadmin/Projekte/2017/Nachhaltige_Rohstoffversorgung_Elektromobilitaet/Agora_Verkehrswende_Synthesepapier_WEB.pdf (Abruf am 4. Dezember 2023).
- Statistisches Bundesamt (Destatis) (2022): Abfallbilanz 2020, https://view.officeapps.live.com/op/view.aspx?src=https%3A%2F%2Fwww.destatis.de%2FDE%2FThemen%2FGesellschaft-Umwelt%2FUmwelt%2FAbfallwirtschaft%2FPublikationen%2FDownloads-Abfallwirtschaft%2Fabfallbilanz-xlsx-5321001.xlsx%3F__blob%3DpublicationFile&wdOrigin=BROWSELINK (Abruf am 4. Dezember 2023).
- Statista (2024): Bruttoinlandsprodukt von Bayern 1970 bis 2023, <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/5006/umfrage/entwicklung-des-bruttoinlandsprodukts-von-bayern-seit-1970/https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1251/umfrage/entwicklung-des-bruttoinlandsprodukts-seit-dem-jahr-1991/> (Abruf am 05. Dezember 2024).
- Statistisches Bundesamt (2023): <https://www-genesis.destatis.de/genesis/online> (Abruf am 4. Dezember 2023).
- Statistisches Bundesamt (2024): Statistischer Bericht Außenhandel August 2024, https://www.destatis.de/DE/Themen/Wirtschaft/Aussenhandel/Publikationen/Downloads-Aussenhandel/statistischer-bericht-aussenhandel-2070100241085.xlsx?__blob=publicationFile (Abruf am 13. November 2024).
- U.S. Geological Survey (2023): Historical Statistics for Mineral and Material Commodities in the United States, <https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/historical-statistics-mineral-and-material-commodities> (Abruf am 4. Dezember 2023).
- U.S. Geological Survey (2023): Mineral commodity summaries 2023, <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2023/mcs2023.pdf> (Abruf am 4. Dezember 2023).

- Umweltbundesamt [Hrsg.] (2012): Indikatoren / Kennzahlen für den Rohstoffverbrauch im Rahmen der Nachhaltigkeitsdiskussion, <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/461/publikationen/4237.pdf> (Abruf am 4. Dezember 2023).
- Umweltbundesamt [Hrsg.] (2019): Wege in eine ressourcenschonende Treibhausgasneutralität, https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/rescue_studie_cc_36-2019_wege_in_eine_ressourcenschonende_treibhausgasneutralitaet.pdf (Abruf am 4. Dezember 2023).
- Umweltbundesamt [Hrsg.] (2012): Glossar zum Ressourcenschutz., <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/4242.pdf> (Abruf am 4. Dezember 2023).
- Umweltbundesamt (2023): Indikator: Rohstoff-Fußabdruck, <https://www.umweltbundesamt.de/daten/umweltindikatoren/indikator-rohstoffkonsum#die-wichtigsten-fakten> (Abruf am 4. Dezember 2023).
- Umweltbundesamt (2023): Recyclingpapier ist gut für die Umwelt, <https://www.umweltbundesamt.de/umwelttipps-fuer-den-alltag/haushalt-wohnen/papier-recyclingpapier#so-gelingt-ein-klimafreundlicher-umgang-mit-papier> (Abruf am 4. Dezember 2023).
- Umweltbundesamt (2023): Altglas richtig trennen und entsorgen, <https://www.umweltbundesamt.de/umwelttipps-fuer-den-alltag/haushalt-wohnen/altglas#wie-sie-altglas-richtig-trennen-und-entsorgen> (Abruf am 4. Dezember 2023).
- Umweltbundesamt (2023): Faktor X, <https://www.umweltbundesamt.de/themen/abfall-ressourcen/ressourcenschonung-in-produktion-konsum/faktor-x> (Abruf am 4. Dezember 2023).
- Vereinigung der Bayerischen Wirtschaft e.V. (vbw) (2022): Rohstoffsituation der bayerischen Wirtschaft, <https://www.vbw-bayern.de/vbw/Themen-und-Services/Rohstoffe-Ressourcen/Rohstoffsituation-der-bayerischen-Wirtschaft-24.jsp> (Abruf am 4. Dezember 2023).
- Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie (2013): Material Flow Analysis – Systematik der Indikatoren, https://wupperinst.org/uploads/tx_wupperinst/MFA_d01_de.pdf (Abruf am 4. Dezember 2023).

Abbildungsverzeichnis

- Abb. 1: Schematische Darstellung der Circular Economy mit der Kreislaufwirtschaft als „Motor“ der Circular Economy. S. 9
- Abb. 2: Strategien der Circular Economy: das „9R Framework“ S. 10
- Abb. 3: Rohstoffverbrauch biotischer und abiotischer Stoffe in Bayern (DMI einschließlich Saldo des Intrahandels) S. 13
- Abb. 4: Entwicklung des abiotischen und biotischen Rohstoffverbrauchs (DMI) in Bayern und Deutschland, gegenüber 1994 (=100) S. 15
- Abb. 5: Entwicklung der abiotischen Rohstoffproduktivität in Bayern und Deutschland, gegenüber 1994 (=100) S. 15
- Abb. 6: Bayerns Außenhandel mit Rohstoffen und Rohmaterialien in Millionen Euro und Anteil an Deutschland in Prozent 2008–2022 S. 16
- Abb. 7: Bayerns Außenhandel mit Rohstoffen und Rohmaterialien in Tausend t und Anteil an Deutschland in Prozent 2018–2022 S. 16
- Abb. 8: Bayerns Top 10 Importe von Rohstoffen und Rohmaterialien in Tonnen 2009, 2013, 2017 und 2021 S. 17
- Abb. 9: Bayerns Top 10 Importe von Rohstoffen und Rohmaterialien in Tausend Euro 2009, 2013, 2017 und 2021 S. 17
- Abb. 10: Bayerns Export von Rohstoffen und Rohmaterialien in Tausend Euro und Tonnen 2009, 2013, 2017 und 2021 S. 18
- Abb. 11: Bayerns Export von Rohstoffen und Rohmaterialien in Tausend Euro und Tonnen 2009, 2013, 2017 und 2021 S. 18
- Abb. 12: Zusammenfassung der Materialflüsse auf Basis der Umweltökonomischen Gesamtrechnung der Länder und verfügbaren Abfalldaten für 2020 in Millionen Tonnen. S. 19
- Abb. 13: Importnachfrage 2022 nach Aluminium in Millionen € und Tausend Tonnen. S. 28
- Abb. 14: Preisentwicklung von Aluminium S. 28
- Abb. 15: Volatilität von Aluminium S. 28
- Abb. 16: Importnachfrage 2022 nach Eisen und Stahl in Millionen € und Tausend Tonnen. S. 29
- Abb. 17: Volatilität von Eisen und Stahl S. 29
- Abb. 18: Preisentwicklung von Eisen und Stahl S. 29
- Abb. 19: Importnachfrage 2022 nach Indium in Millionen € und Tausend Tonnen. S. 30
- Abb. 20: Preisentwicklung von Indium S. 30
- Abb. 21: Volatilität von Indium S. 30
- Abb. 22: Importnachfrage 2022 nach Kobalt in Millionen € und Tausend Tonnen. S. 31
- Abb. 23: Preisentwicklung von Kobalt S. 31

Abb. 24: Volatilität von Kobalt	S. 31	Abb. 55: Bruttowertschöpfung im Fahrzeugbau	S. 47
Abb. 25: Importnachfrage 2022 nach Kupfer in Millionen € und Tausend Tonnen.	S. 32	Abb. 56: Szenario des Materialeinsatzes im Fahrzeugbau zwischen 1994 und 2035, gemessen in Tausend Tonnen	S. 48
Abb. 26: Preisentwicklung von Kupfer	S. 32	Abb. 57: Vergleich der CO ₂ -Emissionen der drei Szenarien im Fahrzeugbau, gemessen in Tausend Tonnen	S. 49
Abb. 27: Volatilität von Kupfer	S. 32	Abb. 58: Bruttowertschöpfung im Fahrzeugbau in Millionen Euro	S. 50
Abb. 28: Importnachfrage 2022 nach Lithium in Millionen € und Tausend Tonnen.	S. 33	Abb. 59: Szenario des Materialeinsatzes im Maschinenbau zwischen 1994 und 2035, gemessen in Tausend Tonnen	S. 50
Abb. 29: Preisentwicklung von Lithium	S. 33	Abb. 60: Vergleich der CO ₂ -Emissionen der drei Szenarien im Maschinenbau, gemessen in Tausend Tonnen	S. 51
Abb. 30: Volatilität von Lithium	S. 33	Abb. 61: Bruttowertschöpfung in der Elektrobranche in Millionen Euro	S. 52
Abb. 31: Importnachfrage 2022 nach Magnesium in Millionen € und Tausend Tonnen.	S. 34	Abb. 62: Szenario des Materialeinsatzes in der Elektrobranche zwischen 1994 und 2035, gemessen in Tausend Tonnen	S. 52
Abb. 32: Preisentwicklung von Magnesium	S. 34	Abb. 63: Vergleich der CO ₂ -Emissionen der drei Szenarien in der Elektrobranche, gemessen in Tausend Tonnen	S. 53
Abb. 33: Volatilität von Magnesium	S. 34	Abb. 64: Bruttowertschöpfung in der Baubranche in Millionen Euro	S. 54
Abb. 34: Importnachfrage 2022 nach Platin in Millionen € und Tausend Tonnen.	S. 35	Abb. 65: Szenario der Entwicklung des Materialeinsatzes in der Metallbranche zwischen 1994 und 2035, gemessen in Millionen Tonnen	S. 54
Abb. 35: Preisentwicklung von Platin	S. 35	Abb. 66: Vergleich der CO ₂ -Emissionen der drei Szenarien in der Elektrobranche, gemessen in Tausend Tonnen	S. 55
Abb. 36: Volatilität von Platin	S. 35		
Abb. 37: Importnachfrage 2022 nach Seltenen Erden in Millionen € und Tausend Tonnen.	S. 36		
Abb. 38: Preisentwicklung von Seltenen Erden	S. 36		
Abb. 39: Volatilität von Seltenen Erden	S. 36		
Abb. 40: Importnachfrage 2022 nach Silizium in Millionen € und Tausend Tonnen.	S. 37		
Abb. 41: Preisentwicklung von Silizium	S. 37		
Abb. 42: Volatilität von Silizium	S. 37		
Abb. 43: Importnachfrage 2022 nach Tantal in Millionen € und Tausend Tonnen.	S. 38		
Abb. 44: Preisentwicklung von Tantal	S. 38		
Abb. 45: Volatilität von Tantal	S. 38		
Abb. 46: Importnachfrage 2022 nach Zinn in Millionen € und Tausend Tonnen.	S. 39		
Abb. 47: Preisentwicklung von Zinn	S. 39		
Abb. 48: Volatilität von Zinn	S. 39		
Abb. 49: Rohstoffnähe der bayerischen Industriebranchen, geordnet nach Gesamtrohstoffeinsatz (inkl. Vorketten) beziehungsweise Bruttowertschöpfung in Bayern im Jahr 2020*	S. 42		
Abb. 50: Rohstoffeinsatz bei der Herstellung in den Industriebranchen, letzte inländische Verwendung und Exporte in Millionen Tonnen Rohstoffäquivalenten nach Gütergruppen in Bayern, 2020	S. 43		
Abb. 51: Rohstoffproduktivität der bayerischen Leitbranchen, Bruttowertschöpfung in Euro je Tonne Rohstoffeinsatz in Rohstoffäquivalenten 2020.	S. 43		
Abb. 52: Bruttowertschöpfung Metallbranche in Millionen €	S. 46		
Abb. 53: Szenario des Materialeinsatzes in der Metallbranche zwischen 1994 und 2035, gemessen in Tausend Tonnen	S. 46		
Abb. 54: Vergleich der CO ₂ -Emissionen der drei Szenarien in der Metallbranche, gemessen in Tausend			

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Exkurs: Relevante Stoffstromindikatoren im Überblick	S. 14
Tabelle 2: Zentrale Industrierohstoffe im Überblick	S. 24

Bildnachweis

ktsdesign/123rf.com: Titelseite Bild 1, 3, 6 u. 8 (von links oben nach rechts unten), S. 56;

Andreas Brücklmair: S. 4;

Adobe Stock:

nosorogua/stock.adobe.com: Titelseite Bild 2; SN040288/stock.adobe.com: Titelseite Bild 4; Mirko/stock.adobe.com: Titelseite Bild 5; Paweł Michałowski/stock.adobe.com: Titelseite Bild 7; Karl Allen Lugmayer/stock.adobe.com: S. 6 u. 13; industrieblick/stock.adobe.com: S. 7 o., S. 21; Tom Bayer/stock.adobe.com: S. 7 u. S. 41; Chanchai/stock.adobe.com: S. 8;

© Prognos AG/LfU: S. 9 Abb. 1, S. 19 Abb. 12; © Prognos AG: S. 10 Abb. 2; S. 13 Abb. 3; S. 15 Abb. 4 u. 5; S. 16 Abb. 6 u. 7; S. 17 Abb. 8 u. 9; S. 18 Abb. 10 u. 11; S. 28 Abb. 13–15; S. 29 Abb. 16–18; S. 30 Abb. 19–21; S. 31 Abb. 22–24; S. 32 Abb. 25–27; S. 33 Abb. 28–30; S. 34 Abb. 31–33; S. 35 Abb. 34–36; S. 36 Abb. 37–39; S. 37 Abb. 40–42; S. 38 Abb. 43–45; S. 39 Abb. 46–48; S. 42 Abb. 49; S. 43 Abb. 50 u. 51; S. 46 Abb. 52 u. 53; S. 47 Abb. 54; S. 48 Abb. 55 u. 56; S. 49 Abb. 57; S. 50 Abb. 58 u. 59; S. 51 Abb. 60; S. 52 Abb. 61 u. 62; S. 53 Abb. 63; S. 54 Abb. 64 u. 65; S. 55 Abb. 66;

LfU, Frank Karlstetter: Icons S. 41, S. 46, S. 48, S. 50, S. 52, S. 54;

