

Materialbedarf von Stromerzeugungssystemen - Szenarienpfadanalyse für Deutschland

Forschungsarbeit

angefertigt von
B. Sc. Manuel Wetzel
Matr.-Nr.: 2660972

The periodic table below is color-coded according to the legend:

- Mengenmaterialien (Green):** B, Al, Ga, In, Sn, Pb, Uuq
- Technologiemarkaterialien (Blue):** Li, Be, Na, Mg, K, Ca, Sc, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, Ge, As, Se, Br, Kr, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Mo, Tc, Ru, Rh, Pd, Ag, Cd, In, Sn, Sb, Te, I, Xe, Cs, Ba, Lu, Hf, Ta, W, Re, Os, Ir, Pt, Au, Hg, Tl, Pb, Bi, Po, At, Rn, Fr, Ra, Lr, Rf, Db, Sg, Bh, Hs, Mt, Uun, Uuu, Uub, Uuq
- Spezialmaterialien (Red):** None are visible in the provided image.

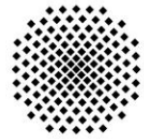
Mengenmaterialien Technologiemarkaterialien Spezialmaterialien

Studienrichtung: Nachhaltige elektrische Energieversorgung

Datum der Abgabe: 18. Mai 2015

Prüfer: Prof. Dr.-Ing. K. Hufendiek
Dr. sc. agr. L. Eltrop

Universität Stuttgart



Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung
Prof. Dr.-Ing. K. Hufendiek

Abteilung Systemanalyse und Erneuerbare Energien
Dr. sc. agr. L. Eltrop

Betreuung durch:
Dipl.-Ing. T. Telsnig

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt



Institut für Technische Thermodynamik

Abteilung für Systemanalyse und Technikbewertung

Betreuung durch:
Dipl.-Ing. D. Hess

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	I
Abbildungsverzeichnis.....	III
Tabellenverzeichnis.....	V
Abkürzungsverzeichnis.....	IX
Kurzfassung.....	XI
Abstract.....	XIII
1 Einleitung.....	1
1.1 Zielsetzung der Studie.....	1
1.2 Literaturübersicht.....	1
1.3 Datenverfügbarkeit und Datenqualität.....	5
1.4 Systemgrenzen und Limitationen.....	7
2 Methodik und Vorgehensweise.....	9
2.1 Methodische Ansätze.....	9
2.1.1 Lebenszyklusanalyse.....	9
2.1.2 Materialsystemanalyse.....	10
2.1.3 Methodik der Studie.....	10
2.2 Klassifizierung der Technologien.....	13
2.3 Klassifizierung der Materialien.....	13
2.4 Materialbedarfsanalyse.....	15
2.5 Szenarienpfade.....	16
2.6 Implementierung in Excel/VBA.....	16
Weiterführende methodische Ansätze.....	17
3 Technologien.....	19
3.1 Konventionelle Energieträger.....	19
3.1.1 Braun- und Steinkohlekraftwerke.....	19
3.1.2 Gasturbinen und GuD-Kraftwerke.....	20
3.1.3 Kernkraftwerke.....	20
3.2 Regelbare erneuerbare Energien.....	22
3.2.1 Biomassekraftwerke.....	22
3.2.2 Solarthermische Kraftwerke.....	23

3.2.3	Geothermische Anlagen	25
3.3	Fluktuierende erneuerbare Energien	27
3.3.1	Photovoltaik.....	27
3.3.2	Windenergie.....	29
3.3.3	Laufwasserkraftwerke	31
3.4	Elektrische Energiespeicher.....	32
3.4.1	Pumpspeicherkraftwerke	32
3.4.2	Speicherwasserkraft.....	33
3.4.3	Wasserstoffspeicher.....	34
3.4.4	Druckluftspeicher	34
3.4.5	Lithium-Ionen Batterien	35
3.4.6	Vanadium Redox-Flussbatterien	36
3.5	Materialmatrix.....	37
	Weiterführende technologiebezogene Ansätze	37
4	Auswertung	39
4.1	Szenarienanalyse.....	39
4.2	Materialsummenanalyse	43
4.2.1	Mengenmaterialien	43
4.2.2	Technologiematerialien	46
4.2.3	Spezialmaterialien	51
4.3	Materialflussanalyse	55
4.3.1	Mengenmaterialien	55
4.3.2	Technologiematerialien	57
	Weiterführende szenarienbasierte Ansätze	60
5	Fazit und Ausblick	61
	Literaturverzeichnis	63
A	Fortsetzung Materialbedarf für Windenergie	69
B	Materialmatrix	70
C	Diagramme Materialsummenanalyse	73
D	Tabellen Materialsummen und -flussanalyse	76
	Erklärung	87

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1:	Schema der standardisierten Ökobilanz nach ISO 14040	9
Abbildung 2-2:	Schematische Darstellung des betrachteten Materialsystems für die Stromerzeugung.....	10
Abbildung 2-3:	Einfluss von Substitutionen, Recycling und Materialeffizienz auf das System	12
Abbildung 3-1:	Schema eines hierarchischen Komponentenmodells für Photovoltaik	38
Abbildung 4-1:	Installierte Leistung in den Jahren 2030, 2050 und 2070 für die betrachteten Szenarien 1 und 2.....	42
Abbildung 4-2:	Erzeugte elektrische Energie in den Jahren 2030, 2050 und 2070 für die betrachteten Szenarien 1 und 2.....	42
Abbildung 4-3:	Gesamte Materialsomme an Beton und Zement für die Szenarien 1 und 2	43
Abbildung 4-4:	Gesamte Materialsomme an Stahl und Eisen für die Szenarien 1 und 2	44
Abbildung 4-5:	Gesamte Materialsomme an Aluminium für die Szenarien 1 und 2	45
Abbildung 4-6:	Gesamte Materialsomme an Glas für die Szenarien 1 und 2.....	45
Abbildung 4-7:	Gesamte Materialsomme an Kupfer für die Szenarien 1 und 2.....	46
Abbildung 4-8:	Gesamte Materialsomme an Blei für die Szenarien 1 und 2	47
Abbildung 4-9:	Gesamte Materialsomme an Silber für die Szenarien 1 und 2	48
Abbildung 4-10:	Gesamte Materialsomme an Silizium für die Szenarien 1 und 2	49
Abbildung 4-11:	Gesamte Materialsomme an Lithium für die Szenarien 1 und 2.....	50
Abbildung 4-12:	Gesamte Materialsomme an Vanadium für die Szenarien 1 und 2	50
Abbildung 4-13:	Gesamte Materialsomme an Indium für die Szenarien 1 und 2	51
Abbildung 4-14:	Gesamte Materialsomme an Tellur für die Szenarien 1 und 2.....	53
Abbildung 4-15:	Gesamte Materialsomme an Neodym für die Szenarien 1 und 2.....	54

Abbildung 4-16:	Materialinput und –output an Aluminium für Szenario 1b.....	55
Abbildung 4-17:	Materialinput und –output an Aluminium für Szenario 2b.....	56
Abbildung 4-18:	Materialinput und –output an Glas für Szenario 1b.....	56
Abbildung 4-19:	Materialinput und –output an Glas für Szenario 2b.....	57
Abbildung 4-20:	Materialinput und –output an Kupfer für Szenario 1b.....	57
Abbildung 4-21:	Materialinput und –output an Kupfer für Szenario 2b.....	58
Abbildung 4-22:	Materialinput und –output an Lithium für Szenario 1b	59
Abbildung 4-23:	Materialinput und –output an Lithium für Szenario 2b	59
Abbildung C-1:	Gesamte Materialsomme an Kunststoffen für die Szenarien 1 und 2.....	73
Abbildung C-2:	Gesamte Materialsomme an Graphit für die Szenarien 1 und 2	73
Abbildung C-3:	Gesamte Materialsomme an Gallium für die Szenarien 1 und 2	74
Abbildung C-4:	Gesamte Materialsomme an Selen für die Szenarien 1 und 2	74
Abbildung C-5:	Gesamte Materialsomme an Cadmium für die Szenarien 1 und 2.....	75
Abbildung C-6:	Gesamte Materialsomme an Dysprosium für die Szenarien 1 und 2.....	75

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1-1:	Auf Versorgungsrisiken untersuchte Materialien in der Literatur	5
Tabelle 2-1:	Einteilung der im Detail betrachteten Materialien	15
Tabelle 3-1:	Literaturwerte für den spezifischen Materialbedarf für Braun- und Steinkohlekraftwerke	19
Tabelle 3-2:	Literaturwerte für den spezifischen Materialbedarf für Gasturbinen- und GuD-Kraftwerken	20
Tabelle 3-3:	Literaturwerte für den spezifischen Materialbedarf für Kernkraftwerke	21
Tabelle 3-4:	Literaturwerte für den spezifischen Materialbedarf für Biomassekraftwerke und vergleichbare Anlagentypen.....	22
Tabelle 3-5:	Literaturwerte für den spezifischen Materialbedarf für solarthermische Kraftwerke.....	23
Tabelle 3-6:	Literaturwerte für den spezifischen Materialbedarf für Übertragungsleitungen	24
Tabelle 3-7:	Spezifischen Materialbedarf für die HVDC Leitungen.....	25
Tabelle 3-8:	Literaturwerte für den spezifischen Materialbedarf für geothermische Kraftwerke.....	26
Tabelle 3-9:	Literaturwerte für den spezifischen Materialbedarf für Photovoltaikmodule	28
Tabelle 3-10:	Literaturwerte für den spezifischen Materialbedarf für Photovoltaik BOS.....	29
Tabelle 3-11:	Literaturwerte für den spezifischen Materialbedarf für Windenergieanlagen.....	30
Tabelle 3-12:	Literaturwerte für den spezifischen Materialbedarf für Laufwasserkraftwerke	31
Tabelle 3-13:	Literaturwerte für den spezifischen Materialbedarf für Speicherwasserkraftwerke.....	33
Tabelle 3-14:	Literaturwerte für den spezifischen Materialbedarf für Brennstoffzellenstacks und Speicher für komprimierten Wasserstoff.....	34

Tabelle 3-15:	Literaturwerte für den spezifischen Materialbedarf für Druckluftspeicher und vergleichbare Anlagentypen	35
Tabelle 3-16:	Literaturwerte für den spezifischen Materialbedarf für Lithium-Ionen Batterien.....	36
Tabelle 3-17:	Literaturwerte für den spezifischen Materialbedarf für Vanadium Redox-Flussbatteriestacks und Elektrolytspeicher.....	37
Tabelle 4-1:	Installierte Leistungen für Szenario 1 in den Jahren 2030, 2050 und 2070	39
Tabelle 4-2:	Installierte Leistungen für Szenario 2 in den Jahren 2030, 2050 und 2070	40
Tabelle 4-3:	Angenommene Entwicklung der Marktanteile für Szenariovariation a	41
Tabelle 4-4:	Angenommene Entwicklung der Marktanteile für Szenariovariation b	41
Tabelle A-1:	Spezifischer Materialbedarf für Windenergieanlagen mit Permanentmagnet	69
Tabelle A-2:	Spezifischer Materialbedarf für Windenergieanlagen mit getriebelosem Synchrongenerator.....	69
Tabelle A-3:	Spezifischer Materialbedarf für Windenergieanlagen mit Asynchronmaschine.....	69
Tabelle D-1:	Anteile von gebundenem Stahl und Eisen an weltweiten Reserven und Ressourcen.....	76
Tabelle D-2:	Anteil der mittleren jährlichen Materialflüsse an der Jahresproduktion von Eisen und Stahl	76
Tabelle D-3:	Anteil der mittleren jährlichen Materialflüsse an der Jahresproduktion.....	77
Tabelle D-4:	Anteile von gebundenem Kupfer an weltweiten Reserven und Ressourcen.....	77
Tabelle D-5:	Anteil der mittleren jährlichen Materialflüsse an der Jahresproduktion von Kupfer.....	78
Tabelle D-6:	Anteile von gebundenem Blei an weltweiten Reserven und Ressourcen	78
Tabelle D-7:	Anteil der mittleren jährlichen Materialflüsse an der Jahresproduktion von Blei.....	79

Tabelle D-8:	Anteil der mittleren jährlichen Materialflüsse an der Jahresproduktion von Silizium	79
Tabelle D-9:	Anteile von gebundenem Silber an weltweiten Reserven	79
Tabelle D-10:	Anteil der mittleren jährlichen Materialflüsse an der Jahresproduktion von Silber	80
Tabelle D-11:	Anteile von gebundenem Lithium an weltweiten Reserven und Ressourcen	80
Tabelle D-12:	Anteil der mittleren jährlichen Materialflüsse an der Jahresproduktion von Lithium	81
Tabelle D-13:	Anteile von gebundenem Vanadium an weltweiten Reserven.....	81
Tabelle D-14:	Anteil der mittleren jährlichen Materialflüsse an der Jahresproduktion von Vanadium	81
Tabelle D-15:	Anteil der mittleren jährlichen Materialflüsse an der Jahresproduktion von Gallium.....	82
Tabelle D-16:	Anteile von gebundenem Indium an weltweiten Reserven.....	82
Tabelle D-17:	Anteil der mittleren jährlichen Materialflüsse an der Jahresproduktion von Indium	82
Tabelle D-18:	Anteile von gebundenem Cadmium an weltweiten Reserven.....	83
Tabelle D-19:	Anteil der mittleren jährlichen Materialflüsse an der Jahresproduktion von Cadmium	83
Tabelle D-20:	Anteile von gebundenem Tellur an weltweiten Reserven.....	83
Tabelle D-21:	Anteil der mittleren jährlichen Materialflüsse an der Jahresproduktion von Tellur	84
Tabelle D-22:	Anteile von gebundenem Neodym an weltweiten Reserven.....	84
Tabelle D-23:	Anteil der mittleren jährlichen Materialflüsse an der Jahresproduktion von Neodym	84
Tabelle D-24:	Anteile von gebundenem Dysprosium an weltweiten Reserven.....	85
Tabelle D-25:	Anteil der mittleren jährlichen Materialflüsse an der Jahresproduktion von Dysprosium	85

Abkürzungsverzeichnis

ANL	Argonne National Laboratory
BOS	Anlagentechnik (Balance Of System)
CCS	Carbon Capture and Storage
CMR	Cumulative Material Requirement
CMS	Critical Material Strategy
CRM	Critical Raw Materials
CSP	Concentrated Solar Power
DDPMG	Direct Drive Permanent Magnet Generator
DDSG	Direct Drive Synchrongenerator
DFIG	Doppeltgespeiste Asynchronmaschine (Double Fed Induction Generator)
DOE	Department of Energy
HREE	Schwere seltene Erdelemente (Heavy Rare Earth Elements)
IEA	International Energy Agency
JRC	Joined Research Centre
LREE	Leichte seltene Erdelemente (Light Rare Earth Elements)
NREL	National Renewable Energy Laboratory
PV	Photovoltaik
REE	Seltene Erdelemente (Rare Earth Elements)
RMI	Raw Material Initiative
USGS	United States Geological Survey
VBA	Visual Basic for Applications
VRFB	Vanadium Redox-Flussbatterie
WEC	Windenergieanlagen (Wind Energy Converters)

Kurzfassung

Um ein nachhaltiges Stromerzeugungssystem mit niedrigen Stromgestehungskosten und geringen Emissionen zu erreichen, sind hohe Anteile erneuerbarer Energien notwendig. Diese Anlagentypen sind gegenüber konventionellen Kraftwerken einerseits mit einem deutlich geringeren Bedarf an energetisch genutzten Rohstoffen während der Betriebsphase verbunden, benötigen dafür bei der Installation mehr nicht-energetisch genutzte Rohstoffe. Zudem kommen dabei eine größere Anzahl unterschiedlicher Metalle zum Einsatz. Daher werden für Deutschland zwei unterschiedliche Stromerzeugungssysteme hinsichtlich ihrer gebundenen Materialsummen untersucht. Der Schwerpunkt des ersten Szenarios liegt auf der Nutzung von heimischen fluktuierenden Energieträgern wie Photovoltaik und Windenergie, während im anderen Szenario der Import von gut regelbarer erneuerbarer Energie aus solarthermischen Kraftwerken in Nordafrika im Vordergrund steht. Zudem werden anhand von zwei Szenariovariationen die Auswirkungen von hohen sowie niedrigen Marktanteilen von Dünnschichtphotovoltaik und getriebelosen Windenergiegeneratoren aufgezeigt. Auf der Basis von Literaturwerten wird der jeweilige technologiespezifische Materialbedarf erfasst und ein szenarienbasiertes Materialmodell erstellt. Für Mengengmaterialien, welche als breit verfügbar angesehen werden können, fallen die Unterschiede zwischen den zwei Szenarien verhältnismäßig gering aus. Der Bedarf an Spezialmaterialien wird demgegenüber in erster Linie durch die Rohstoffverfügbarkeit und Preisdynamik beeinflusst. Daher liegt der Fokus der Materialanalyse auf den Technologiematerialien Kupfer, Blei, Silizium, Silber, Lithium sowie Vanadium. Durch Importe von regelbarer erneuerbarer Energie aus solarthermischen Kraftwerken in Nordafrika lassen sich die gebundenen Materialsummen dieser Materialien deutlich reduzieren. Neben den Materialsummen zu den Betrachtungszeitpunkten der Szenarien lassen sich die Materialflüsse über die Systemgrenzen ableiten und ins Verhältnis zur Jahresproduktion setzen. Dabei zeigt sich, dass im Szenario der Importe von solarthermisch erzeugter Energie sich sowohl deutliche Reduktionen des Materialinputs als auch gleichmäßigere Materialströme erzielen lassen. Um langfristige Engpässe in der Materialverfügbarkeit zu identifizieren werden darüber hinaus die gebundenen Materialsummen den weltweiten verfügbaren Reserven und Ressourcen gegenüber gestellt.

Abstract

In order to achieve a sustainable system for electricity generation at low system costs and low emissions high fractions of renewable energy systems have to be deployed. These sustainable power plants are related to much lower consumption of energy resources during operation but higher consumption of non-energy resources during construction. Also a wider base of metals is used for these applications. Therefore two different electricity generating systems in Germany are to be assessed in regard to their in-use stocks of materials. One of them focuses on the usage of volatile domestic resources such as wind energy and photovoltaics, while the emphasis of the other scenario lies on dispatchable renewable energies like concentrated solar power (CSP) imported from North Africa. Furthermore two scenario variations show the effects of high and low market shares of thin-film photovoltaics and direct drive generators for wind energy converters (WEC). Based on a systematic literature review the materials for construction are collected for each technology in order to model the system. For bulk materials which can be considered as widely available the differences between the two scenarios are reasonably low. Regarding speciality materials the main drivers of demand will be the availability of resources and price dynamics. Main focus of material analysis will therefore lie on the technology materials copper, lead, silicon, silver, lithium and vanadium. By importing dispatchable renewable energy produced by concentrated solar power in North Africa the in-use stocks for these materials can be reduced drastically. Furthermore the material flows are derived and compared to annual production of resources. It is shown that huge reductions in material inputs as well as a more evenly flow of materials can be achieved in case of the scenario with import of CSP energy. In order to identify potential long term bottlenecks regarding the availability of resources the total in-use material stocks are compared to the global base of reserves and resources.

„As for non-renewable resources, like fossil fuels and minerals, their use reduces the stock available for future generations. But this does not mean that such resources should not be used. In general the rate of depletion should take into account the criticality of that resource, the availability of technologies for minimizing depletion, and the likelihood of substitutes being available. Thus land should not be degraded beyond reasonable recovery. With minerals and fossil fuels, the rate of depletion and the emphasis on recycling and economy of use should be calibrated to ensure that the resource does not run out before acceptable substitutes are available. Sustainable development requires that the rate of depletion of non renewable resources should foreclose as few future options as possible.“

„As a system approaches ecological limits, inequalities sharpen. [...] When mineral resources become depleted, late-comers to the industrialization process lose the benefits of low-cost supplies. Globally, wealthier nations are better placed financially and technologically to cope with the effects of possible climatic change.“

„Non-fuel mineral resources appear to pose fewer supply problems. Studies done before 1960 that assumed an exponentially growing demand did not envisage a problem until well into the next century. since then, world consumption of most metals has remained nearly constant, which suggests that the exhaustion of non-fuel minerals is even more distant. The history of technological developments also suggests that industry can adjust to scarcity through greater efficiency in use, recycling, and substitution. More immediate needs include modifying the pattern of world trade in minerals to allow exporters a higher share in the value added from mineral use, and improving the access of developing countries to mineral supplies, as their demands increase.“

- Brundtlandbericht 1987 „Our common future“

1 Einleitung

1.1 Zielsetzung der Studie

Die Transformation des Energieerzeugungssystems mit dem Ziel einer deutlichen CO₂-Reduktion führt zu einer Vielzahl an technischen Herausforderungen. Im Bereich des Stromerzeugungssystems stellt eine dieser Herausforderungen die Umstellung auf erneuerbare Energien dar. Diese können einen großen Beitrag zur Vermeidung von Treibhausgasen und Umweltverschmutzung leisten. Allerdings ist der Umstieg auf erneuerbare Energien im Vergleich zu konventionellen Kraftwerken mit einer erheblich höheren Materialintensität bei der Installation der Anlagen verbunden (Hertwich et al. 2014). Bei der konventionellen Stromerzeugung beläuft sich der nichtenergetische Materialbedarf der Kraftwerke in erster Linie auf die Mengematerialien Stahl, Aluminium und Beton, sowie Metalle für die Legierung der Stähle und Kupfer für die Generatoren und Stromleitungen (Schwaiger 1996). Demgegenüber kommen für die Nutzung erneuerbaren Energien zusätzlich technologiespezifische Materialien wie beispielsweise Cadmium und Tellur für die aktive Schicht in der Dünnschichtphotovoltaik zum Einsatz. Bei der Transformation des Stromversorgungssystems durch die Installation von Stromerzeugungstechnologien auf Basis erneuerbarer Energien findet daher sowohl eine Verschiebung hin zu anderen Materialien als auch eine Steigerung des gesamten Materialbedarfs statt.

Um Aussagen bezüglich der Materialintensität des Energieerzeugungssystems treffen zu können sind die benötigten Materialmengen im Rahmen einer Literaturrecherche quantifiziert. Durch die Anwendung des technologiespezifischen Materialbedarfs auf Szenarienpfade des deutschen Energieerzeugungssystems besteht die Möglichkeit der Vergleichbarkeit von Handlungsoptionen.

1.2 Literaturübersicht

Insbesondere in den Jahren zwischen 2009 und 2011 entstanden viele Forschungsprojekte die das Ziel hatten, den Materialbedarf versorgungskritischer Rohstoffe zu erfassen und Möglichkeiten der Sicherung der Rohstoffversorgung sowie Möglichkeiten der Rohstoffreduktion zu evaluieren. Demgegenüber wird im Rahmen dieser Studie auf die Anwendung einer Materialbedarfsinventarliste im Rahmen von Szenarienpfadanalysen eingegangen. Als Einstiegspunkt in die Thematik ist folgende Auswahl an Studien und Projekten empfehlenswert:

- **Strategic Energy Technology-Plan (SET) (JRC 2011):** Studie des European Joint Research Centers (JRC) anlässlich der politischen Risiken und geographischen Konzentration von Materialien. Eine Verknappung dieser Materialien kann, gemäß der Studie, den Ausbau von Technologien mit geringen CO₂ Auswirkungen gefährden. Dabei werden die Technologien Kernenergie, Photovoltaik, Solarthermie, Windenergie, Biomasse, CO₂-Abscheidung und -Speicherung sowie elektrische Energienetze berücksichtigt. Dabei wird der erwartete Bedarf zwischen 2020 und 2030 mit der Jahresproduktion von 2010 verglichen. Dabei werden 14 Metalle für die Realisierung des Energieversorgungssystems identifiziert, deren jährlicher Bedarf zwischen 2020 und 2030 mehr als 1 % der Jahresproduktion des Jahres 2010 benötigt. Als besonders versorgungskritisch werden dabei die seltenen Erden Neodym und Dysprosium sowie die Nebenprodukte aus anderen Metallaufschlussprozessen Indium, Tellur sowie Gallium gesehen. Als wichtige weiterführende Schritte werden insbesondere weitere regelmäßige Studien zur Verfügbarkeit und der Nachfrage nach versorgungskritischen Materialien, Verbesserung des Recyclings der Metalle, verstärkte Forschung an Aufschlussprozessen der Metallerze und Forschung an alternativen Technologien empfohlen.
- **Kritische mineralische Ressourcen und Stoffströme bei der Transformation des deutschen Energieversorgungssystems (KRESSE) (Viebahn 2014):** Im Rahmen der Studie des Wuppertal Instituts wird von der politischen Zielsetzungen der deutschen Bundesregierung von einer Erhöhung des Anteils erneuerbarer Energien am Bruttoendenergieverbrauch von 18 % in 2020 und 60 % in 2050 ausgegangen. Dabei wird in der Studie von einer Nachhaltigkeitsbewertung anhand verschiedener Kriterien wie unter anderem der Ressourcenbewertung ausgegangen. Auch hier liegt der Fokus auf der langfristigen Verfügbarkeit und dem Bedarf an mineralischen Rohstoffen die für die Herstellung der Anlagen und Infrastruktur benötigt werden. Kriterien für die kritischen Materialien sind im Rahmen der Studie die langfristige Verfügbarkeit, die Versorgungssituation, die Recyclingfähigkeit und die Umweltbedingungen der Förderung (KRESSE). Dabei wird hervorgehoben, dass hinsichtlich der Reserven die Verfügbarkeit der Materialien grundsätzlich keine limitierende Größe für die Transformation des Energieversorgungssystems darstellt. Dies wird durch die Aussage relativiert, dass jedoch nicht jede Technologievariante in beliebiger Leistung realisiert werden kann. Dies trifft insbesondere die Windenergie mit Generatoren in denen Neodym-Dysprosium Magneten eingesetzt werden, sowie die Photovoltaiktechnologien Cadmium-Indium-Gallium-Diselenit und amorphe Silizium Zellen in denen ebenfalls Indium-Zinn Oxide als leitende Schicht eingesetzt werden. Für Cadmium-Tellurit gehen die Autoren der Studie aufgrund der Toxizität von einem Auslaufen der Technologie bis zum Jahr 2020 aus.

Als Empfehlungen der Studie werden die Sicherung der deutschen Rohstoffversorgung mit Schwerpunkt auf Effizienz- und Recyclingstrategien sowie Strategien zur Verlängerung der Nutzungs- und Lebensdauer vorgeschlagen. Für die Forschung wird die Verknüpfung von Langfrist-Energieszenarien mit Ressourcenanalysen für die Entwicklung von Ressourcenminimierungskonzepten empfohlen.

- **Critical Material Strategy (CMS) (DOE 2010, 2011):** Report des Department of Energy (DOE) in der aktualisierten Version des ursprünglichen Reports aus dem Jahr 2010. Dabei wird die Bedeutung von seltenen Erden und anderen Materialien für die Umsetzung einer CO₂ neutralen Energiewirtschaft untersucht. Insbesondere stehen dabei die Technologien Windenergie und Photovoltaik sowie Elektromobilität im Vordergrund. Im Rahmen der Studie wird die benötigte Materialsomme abgeschätzt um Aussagen über die Versorgungssituation und Versorgungsrisiken der Materialien in einer kurzfristigen, (2010-2015), einer mittelfristigen Perspektive (2015-2025) sowie darüber hinaus aufzeigen zu können. Dabei werden in der Studie Materialien identifiziert, die von Versorgungsengpässen betroffen sein können, darunter insbesondere die seltenen Erdmetalle Dysprosium, Neodym, Terbium, Europium und Yttrium. Dies wird im Rahmen der Technologieanalyse für einige der Technologien durch die Handlungsmöglichkeiten der Industrie relativiert, da in vielen Technologien neben den versorgungskritischen Materialien auch andere nicht betroffene Materialien eingesetzt werden können. Dies geht jedoch in der Regel mit einer Verschlechterung der Leistung einher, sodass von Seiten der Hersteller ein Abwägen zwischen der Preis und dem Bedarf bei den Rohstoffen erfolgen muss. Nur bei langfristig hohen Preisen werden Firmen in die Forschung und Entwicklung von Substitutionsmaterialien investieren. Die Studie sieht auch in den kommenden Jahren einen großen Handlungsbedarf für die Diversifizierung der Rohstoffversorgung durch Erschließung von heimischen Rohstoffvorkommen. Weitere Schwerpunkte liegen auf der Entwicklung von Substitutionsmaterialien sowie der Steigerung von Recyclingraten.
- **Critical Raw Materials (CRM) (EU 2010, 2014b):** Aktualisierte Version der Studie aus dem Jahr 2010. Dabei werden Rohstoffe mit großer wirtschaftlicher Bedeutung für Europa sowie hohen Versorgungsrisiken untersucht. Von den betrachteten Materialien stammen dabei 90 % aus Quellen außerhalb Europas. Um den Lebensstandard sowie Arbeitsplätze zu sichern, geht die Studie auf entscheidende nicht-energetische Rohstoffe und Bedenken über deren Verfügbarkeit ein. Als wichtige Aspekte der Versorgungsrisiken werden dabei insbesondere Angebotskonzentrationen und damit verbunden Abhängigkeiten von einzelnen Ländern, wie beispielsweise China für seltene Erden, Antimon, Magnesium sowie Wolfram, genannt. Die europäische Rohstoffinitiative (EU Raw Material Initiative, RMI) nennt dafür drei Punkte die in einem europäischen Rahmen umgesetzt werden sollen. Erstens die Chancengleichheit

für die Zugang zu Rohstoffen in Drittländern, zweitens die Schaffung einer nachhaltigen Rohstoffversorgung aus europäischen Quellen sowie drittens die Förderung von Ressourceneffizienz und Recycling. Eine Bewertung der wirtschaftlichen Bedeutung erfolgt in der Studie durch die Summe der Produkte aus Endnutzungssektor des Rohstoffes und der Bruttowertschöpfung des Sektors. Für die Bewertung des Versorgungsrisikos wird der World Governance Index (WGI) der Weltbank sowie der Herfindahl-Hirschman-Index (HHI) als Bewertungsmaß der Angebotskonzentration verwendet. Über die Indikatoren Recycling und Substituierbarkeit verringert sich das Versorgungsrisiko zusätzlich. Als Empfehlungen werden in der Studie die Umsetzung von Schritten zur Sicherung des ungestörten und zuverlässigen Zugangs zu versorgungskritischen Rohstoffen, regelmäßige Aktualisierungen sowie detailliertere Analysen der europäischen Materialflüsse, Reserven und Ressourcen empfohlen.

- **Rohstoffe für Zukunftstechnologien (Angerer et al. 2009):** Angerer (2009) führt in der Studie die Preisschwankungen an den Rohstoffmärkten auf ein Ungleichgewicht von Angebot und Nachfrage zurück, welches durch neue Marktteilnehmer und deren Rohstoffnachfrage ausgelöst wird. Als weitere Gründe für die Schwankungen werden Fehleinschätzungen auf Märkten und Nachfrageeffekte aus Innovationen genannt. Daher wird in der Studie ein Bottom-up Ansatz ausgehend von Innovationen mit zu erwartenden Impulsen auf die Rohstoffnachfrage der globale Bedarf bis zum Jahr 2030 analysiert. Als Indikator für die Impulse wählt Angerer (2009) das Verhältnis von erwartetem jährlichem Rohstoffbedarf für die Zukunftstechnologien zu der jährlichen Weltproduktion im Jahr 2006. Dabei werden für Gallium, Neodym, Indium, Germanium, Scandium und Platin Werte größer als 1 angegeben. Große Bedeutung liegt dabei auf der effizienteren Nutzung von Rohstoffen und der Schließung von Stoffkreisläufen. Für eine Einschätzung der Abhängigkeit der Wirtschaft von diesen Materialien sieht Angerer (2009) insbesondere Forschungsbedarf im Bereich der Substitutionen sowie des Recyclings und den damit verbundenen Kosten.

In allen Studien werden für die Bewertung der Risiken in der Rohstoffversorgung das politische Risiko eines Versorgungsengpasses, die Marktmacht der Anbieterländer mit hohen Marktanteilen sowie weitere Dimensionen wie die wirtschaftliche Bedeutung der Materialien (EU 2014b) oder der Bedeutung für ein Energiesystem mit niedrigen CO₂ Emissionen verwendet (DOE 2011). Graedel et al. (2012) unterscheiden in ihrem methodischen Ansatz zwischen verschiedenen Organisationsebenen und kurz- sowie langfristigen Effekten. Dabei lässt sich klar zwischen den langfristigen Versorgungsrisiken, in denen die geologische, technische sowie wirtschaftliche Verfügbarkeit betrachtet wird, und den kurzfristigen Versorgungsrisiken unterscheiden, in denen ein zusätzliches Risiko durch gesellschaftliche, politische sowie geopolitische Risiken mitberücksichtigt werden.

Im Rahmen der unterschiedlichen Studien findet sich je nach Betrachtungsschwerpunkt eine Vielzahl an unterschiedlichen Materialgruppen, die hinsichtlich ihrer Versorgungsrisiken untersucht werden. Dabei werden in den Studien die in **Tabelle 1-1** aufgeführten Materialien als für das Stromerzeugungssystem relevant identifiziert.

Tabelle 1-1: Auf Versorgungsrisiken untersuchte Materialien in der Literatur

Studie	EU 2014b	DOE 2011	Angerer et al. 2009	Lutz 2010	Graedel et al. 2014
Gallium	X	X	X		X
Germanium	X		X	X	X
Graphit	X				
Indium	X	X	X	X	X
Kobalt	X	X	X	X	X
Kupfer			X	X	
Lithium		X		X	X
Mangan		X			
Nickel		X			
Niob	X		X	X	X
Platinmetalle	X		X	X	X
Selen			X		
Seltene Erden	X	X	X	X	X
Silber			X		
Tellur		X			
Zinn			X	X	

1.3 Datenverfügbarkeit und Datenqualität

Hinsichtlich der Verfügbarkeit von Inventardaten der Technologien ergeben sich durch verschiedene Gründe Probleme, die dazu führen dass der spezifische Materialbedarf in vielen Fällen nicht konkret eingeschätzt werden kann. Die Probleme der Datenverfügbarkeit und Datenqualität lassen sich in folgende Kategorien einteilen:

- Methodik der Studien:** Viele der Inventardaten sind auf ein Life Cycle Assessment einer Technologie zurückzuführen. Abhängig vom Detailgrad der Studien und der jeweiligen Zielsetzung werden Materialmengen mit sehr geringen Auswirkungen auf die Emissions- und Energiebilanz vernachlässigt. Dabei betroffen sind in vielen Fällen versorgungskritische Materialien aufgrund der geringen eingesetzten Mengen. Das andere Extrem stellt dabei die SET Studie (JRC 2011) dar, in der ausschließlich der Bedarf der metallischen Rohstoffe der Technologien betrachtet wird, ohne auf die gleichzeitig anfallenden Materialien, welche in größeren Mengen vorkommen, einzugehen. Im Rahmen dieser Studie wird ein ganzheitlicher Zusammenhang der Materialien für die jeweiligen Technologien dargestellt.

- **Technische Systemgrenze:** Für eine ganzheitliche Betrachtung der Zusammenhänge zwischen Technologie und den dafür benötigten Materialien ergibt sich durch die Betrachtung von Studien, in denen nur eine Anlage oder ein Anlagentyp untersucht wird, eine sehr große Spannweite für den spezifischen Materialbedarf. Dies ist unter anderem auf die in den Studien gewählte Systemgrenze zurückzuführen. Beispielsweise werden in einigen Studien die elektrischen Komponenten eines Kraftwerks vernachlässigt. Auch für gleiche Technologien finden sich in der Literatur verschiedene Systemgrenzen, dies zeigt sich insbesondere bei fluktuierenden erneuerbaren Energien sowie elektrischen Energiespeichern in denen Anlagenkomponenten wie Seekabel oder Wechselrichter in verschiedenen Studien unterschiedlich berücksichtigt werden.
- **Zeitliche Dimension:** Durch die kontinuierliche Entwicklung der Technologien ergibt sich für den Zeitpunkt der Betrachtung eine gewisse Unsicherheit hinsichtlich des Materialbedarfs. Davon sind in erster Linie die fluktuierenden erneuerbaren Energien betroffen. Diese Unsicherheit lässt sich am Einfachsten durch eine Korrektur des Wirkungsgrades mindern, jedoch geschieht dies unter der Annahme, dass die Wirkungsgradverbesserung unabhängig von der Materialsumme stattfindet. Durch diese Korrektur können jedoch keine Reduktionen des Materialbedarfs oder Substitutionen von Materialien berücksichtigt werden. Bessere Abschätzungen für den Materialbedarf heutiger und zukünftiger Technologien können anhand von Roadmaps getroffen werden, in denen Zeiträume für Verbesserungen in den Komponenten oder im gesamten System eingeschätzt werden.
- **Standortabhängigkeit:** Der Materialbedarf für Anlagen an unterschiedlichen Standorten lässt sich in zwei Komponenten aufteilen. Zum einen muss berücksichtigt werden, dass unterschiedliche Standortbedingungen bei Photovoltaik, Windenergie oder Solarthermie zu verschiedenen Energieerträgen führen, gleiche Anlagentypen jedoch hinsichtlich des leistungsbezogenen spezifischen Materialbedarfs identisch ausfallen. Zum anderen können einige Komponenten aufgrund verschiedener Standortbedingungen unterschiedlich ausfallen, wie beispielsweise der Staudamm in Wasserkraftwerken mit identischen Turbinen oder die Förderkomponenten in geothermischen Kraftwerken. Dies resultiert in einer breiten Streuung der Werte des Materialbedarfs für diese Technologien.
- **Skaleneffekte:** Für modulare Technologien wie beispielsweise Photovoltaik, Lithium-Ionen Batterien oder Vanadium Redox-Flussbatterien treten nahezu keine Skaleneffekte auf. Demgegenüber zeigt sich in den Studien für einige der Anlagen, wie beispielsweise Kohlekraftwerke ein mit steigender Leistung sinkender spezifischer Materialbedarf (Dones et al. 2007).

1.4 Systemgrenzen und Limitationen

Neben der Qualität und Verfügbarkeit von Materialdaten entstehen durch die gewählte Methodik und Vorgehensweise Einschränkungen, die im Rahmen der Ergebnisse der Studie berücksichtigt werden müssen. In den folgenden Abschnitten wird jeweils am Kapitelende auf weiterführende Ansätze eingegangen, die zu einer Verbesserung der Qualität der Inputdaten, sowie der Einschätzung bestehender Unsicherheiten beitragen können.

- **Szenarienbasierter Ansatz:** Da eine exakte Struktur des zukünftigen deutschen Stromerzeugungssystems und dem damit verbundenen Materialbedarf nicht möglich ist, wird im Rahmen der Studie ein szenarienbasierter Ansatz gewählt. Für die zugrunde liegende Szenarien erfolgt eine Bilanzierung der Leistungen in Stundenauflösung um die Versorgungssicherheit des Systems zu berücksichtigen. Zudem muss eine Betrachtung der ökonomischen Kosten und der ökologischen Auswirkungen erfolgen. Als Richtlinie für die zulässigen Anteile fossiler Energieträgern dienen die derzeitigen politischen Ziele hin zu einem Stromerzeugungssystem mit hohen Anteilen erneuerbarer Energien. Dabei wird durch die verschiedenen untersuchten Szenarien ein Bereich möglicher Systeme aufgespannt, um die Folgen der Entscheidungen die zu den Szenarien führen abschätzen zu können.
- **Technologiespezifischer Materialbedarf:** Die Anzahl unterschiedlicher Technologien und Hersteller führt dazu, dass für den technologiespezifischen Materialbedarf an nicht-erneuerbaren und nicht-energetischen Stoffen ein Wertebereich existiert. Im Rahmen der Studie werden Werte aus der Literatur entnommen und um Abschätzungen ergänzt um zu einer möglichst ganzheitlichen Datenbasis zu gelangen. Dafür werden aufgrund der Datensituation jeweils nur ein literaturbasierter Wert und keine Wahrscheinlichkeitsverteilung für den technologiespezifischen Materialbedarf angegeben. Dadurch kann keine Unsicherheit innerhalb der Szenarien angegeben, sondern nur durch den Vergleich zwischen Szenarien erfasst werden.
- **Zeitliche Entwicklung des Materialbedarfs:** Zeitliche Änderungen im technologiespezifischen Materialbedarf lassen sich nur berücksichtigen, wenn eingeschätzt werden kann, welche Technologien zu welchem erwarteten Zeitpunkt zur Verfügung stehen und mit welchem spezifischen Materialbedarf diese verbunden sind. Dabei kann durch eine Lernrate eine Verknüpfung der spezifischen Materialintensität der Technologien für die kostenintensivsten Materialien mit der kumulierten installierten Leistung erfolgen (Viebahn et al. 2008). Aufgrund der fehlenden Daten zu vielen der Technologien und der betrachteten Technologieanzahl wird im Rahmen der Studie von einem konstanten Bedarf ausgegangen.

- **Systemgrenzen:** In der Studie erfolgt die Betrachtung des deutschen Stromerzeugungssystems, dieses beinhaltet die Gesamtheit der Kraftwerke die in Deutschland installiert sind sowie die Kraftwerke (inkl. Punkt-zu-Punkt Verbindungen) von denen ein potentieller Import stattfindet. In der Modellierung werden dabei nur negative Austauschleistungen von Deutschland in angrenzende Länder zugelassen. Es erfolgt dabei eine Berücksichtigung der Anknüpfungsleitungen für solarthermische Kraftwerke und Offshore-Windenergie, jedoch keine Berücksichtigung der innerdeutschen Übertragungs- und Verteilnetze. Für die einzelnen Technologien sind die spezifischen Systemgrenzen in Kapitel 3 aufgeführt.

2 Methodik und Vorgehensweise

2.1 Methodische Ansätze

2.1.1 Lebenszyklusanalyse

Lebenszyklusanalyse (Life Cycle Assessment, LCA) nach (ISO 14040)(ISO 14040)(ISO 14040)EN ISO 14040 ermöglicht die Bewertung von Prozessen oder Produktsystemen hinsichtlich ihrer Umweltauswirkungen. Dabei wird der komplette Lebensweg ausgehend von der Gewinnung der Rohstoffe bis zum Lebensende eines Produktsystems betrachtet. Im Rahmen von EN ISO 14040, siehe **Abbildung 2-1**, wird dabei zwischen der Ökobilanz und Sachbilanz unterschieden, wobei die Ökobilanz eine durch die Abschätzung der Umweltauswirkung erweiterte Sachbilanz darstellt.

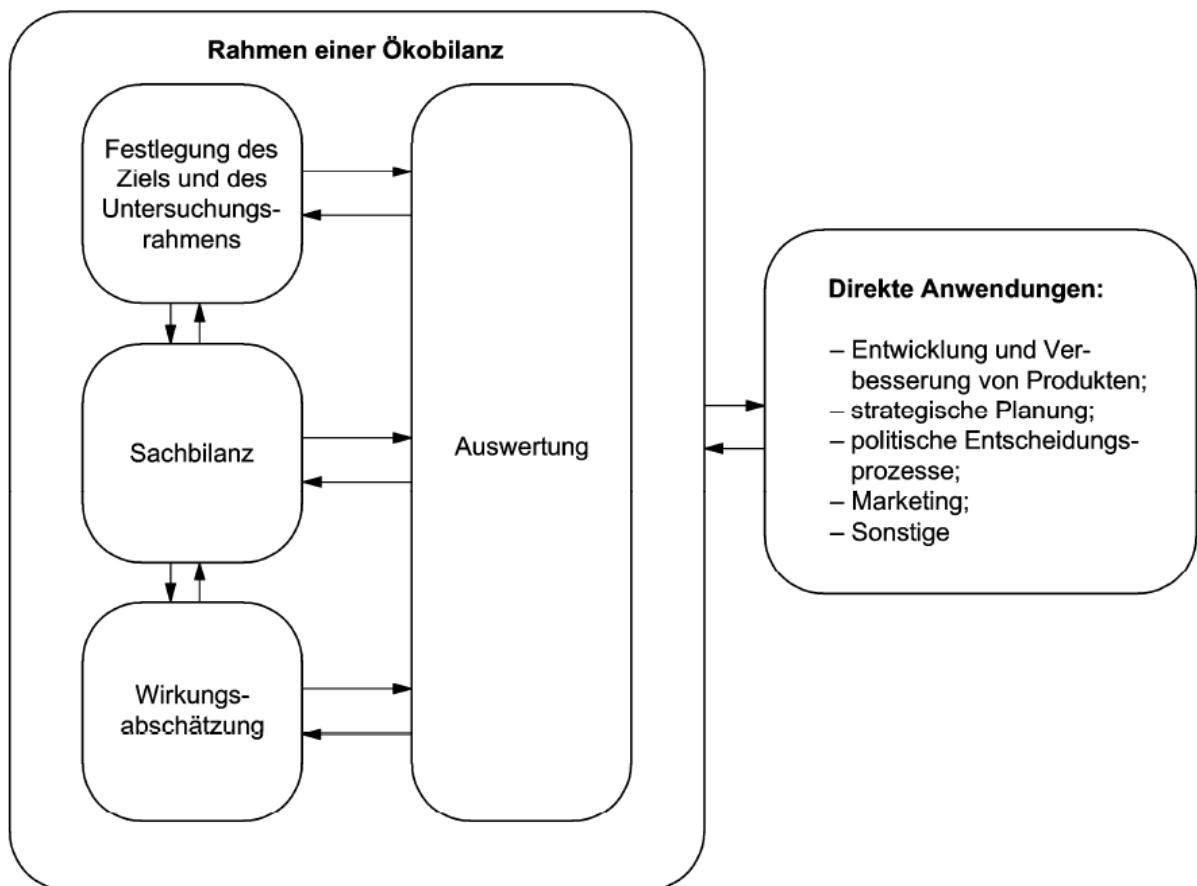


Abbildung 2-1: Schema der standardisierten Ökobilanz nach ISO 14040

Die erstellte Öko- oder Sachbilanz wird auf eine funktionelle Einheit bezogen. Für Techniken der Stromerzeugung bildet üblicherweise die bereitgestellte elektrische Energie der Größe 1 kWh die funktionelle Einheit. Zudem muss gemäß der Norm die zeitliche sowie geographische Referenz angegeben werden um eine Vergleichbarkeit mit anderen LCA Studien zu ermöglichen

2.1.2 Materialsystemanalyse

Gegenüber der Lebenszyklusanalyse liegt der Fokus von Materialsystemanalysen (MSA) auf der Quantifizierung von Material- und Energieströmen in einem System, sowie den Zusammenhängen zwischen Materialströmen, Wirtschaft und Umweltauswirkungen (OECD 2008). Dabei wird in vielen Fällen ebenfalls der komplette Lebenszyklus von Materialien betrachtet und hinsichtlich der Massenflüsse bilanziert.

Eine Erweiterung des Ansatzes stellen die Stocks-and-Flows Modelle dar, in denen neben den Flussgrößen Bestandsgrößen im System berücksichtigt werden, die für einen Betrachtungszeitraum keine Systemgrenzen überschreiten, in späteren Zeiträumen jedoch wieder als In- oder Outputgrößen auftreten können (Gerst und Graedel 2008).

2.1.3 Methodik der Studie

Die für diese Studie gewählte Vorgehensweise zeigt einige Parallelen zu der Stocks-and-Flows Modellierung unterscheidet sich jedoch in einigen Punkten davon. **Abbildung 2-2** zeigt innerhalb der Systemgrenze die Zusammenhänge zwischen der **Technologieebene a)** und der **Materialebene b)**.

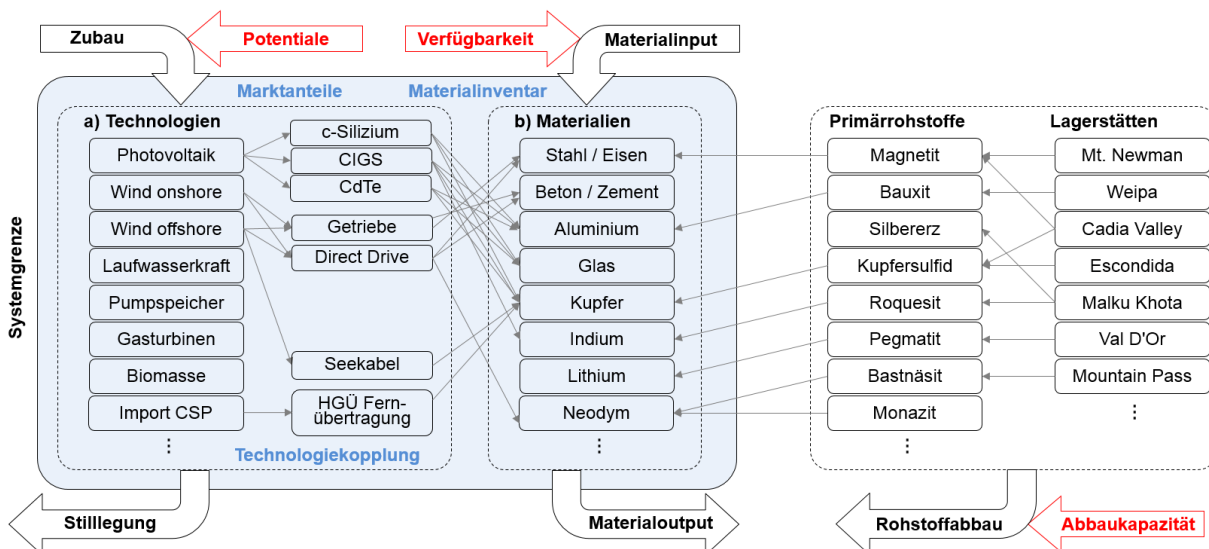


Abbildung 2-2: Schematische Darstellung des betrachteten Materialsystems für die Stromerzeugung

Die Zusammenhänge innerhalb der Technologieebene kann durch die Marktanteile von Subtechnologien wie der Dünnschichtphotovoltaik und Technologiekopplungen wie Hochspannungsgleichstromübertragungsleitungen (HGÜ) für Importe von in Nordafrika solarthermisch erzeugtem Strom dargestellt werden. Der Zusammenhang zwischen **Technologieebene a)** und **Materialebene b)** wird durch den spezifischen Materialbedarf der Technologien hergestellt. Für die Bereitstellung der Materialien erfolgt eine Materialentnahme aus dem Ökosystem. Dabei sind unterschiedliche Erzzusammensetzungen in den Lagerstätten sowie Nebenproduktionen von Metallen mit zu berücksichtigen.

Ausgehend von den installierten Leistungen lässt sich über den jährlichen Zubau und die jährliche Stilllegung von Anlagen auf die damit verbundenen Materialflüsse über die Systemgrenze schließen. Limitierende Faktoren für den Zubau und den Materialinput sind die im betrachteten System vorhandenen Potentiale für Kraftwerke und elektrische Energiespeicher sowie die geopolitische Verfügbarkeit der dafür notwendigen Rohstoffe. Für kurzfristige Betrachtungen spielt neben der Verfügbarkeit der Materialien auch die Abbaukapazität der Primärrohstoffe eine Rolle. Die Unterschiede gegenüber einem Life Cycle Assessment sowie einer Materialsystemanalyse liegen vor allem in den folgenden Punkten.

- **Materialentnahme aus der Umwelt wird nicht erfasst:** In der Modellierung wird der Abbau von Erzen nicht erfasst, stattdessen wird über die benötigten zu installierenden Leistungen auf die Materialinputs in das System geschlossen. Durch diesen Ansatz kann nicht drauf zurückgeschlossen werden ob die Materialien durch Primärproduktionen aus Erzen oder durch Recycling aus anderen Sektoren gewonnen werden. Gegebenenfalls wird jedoch an entsprechender Stelle auf Koproduktionen von Metallen sowie der damit verbundenen Konsequenzen eingegangen.
- **Keine Berücksichtigung des vollständigen Lebenszyklus:** Der Schwerpunkt der Studie liegt auf den Systemgrenzen des Stromerzeugungssystems, daher ist von Interesse welche Materialströme in das System hinein und herausfließen, sowie welche Materialmengen für die Dauer der technischen Lebenszeit in den Kraftwerken und Energiespeichern gebunden sind.
- **Umweltauswirkungen werden nicht abgeschätzt:** Da im Rahmen der Studie weder der vollständige Lebenszyklus noch die benötigte Energie und emittierten Schadstoffe berücksichtigt werden, lassen sich die Umweltauswirkungen im Vergleich zu einer Lebenszyklusanalyse nicht in die Ergebnisse miteinbeziehen.

Dem gegenüber ermöglicht der methodische Ansatz folgende Aussagen.

- **Vergleich von Handlungsalternativen:** Unterschiedliche Szenarien für Stromerzeugungssysteme lassen sich für einen langfristigen Zeitraum hinsichtlich ihrer gesamten gebundenen Materialintensität sowie den daraus resultierenden Materialflüssen vergleichen. Auf Basis der Unterschiede lassen sich Empfehlungen für eine nachhaltige Entwicklung des Stromerzeugungssystems aufzeigen.
- **Identifikation von Risiken und Chancen:** Ausgehend von den abgeleiteten Materialflüssen können Einschätzungen zu Versorgungsrisiken getroffen werden. Diese können sowohl langfristig aufgrund begrenzter Reserven und Ressourcen als auch kurzfristig aufgrund der geopolitischen Verfügbarkeit der benötigten Materialmengen sein. Demgegenüber lassen sich jedoch auch Potentiale für verstärktes Recycling und notwendige Forschung für die Substitution oder Reduktion von Materialien in den Technologien identifizieren.

Eine Minderung der Materialintensität des Stromerzeugungssystems kann dabei in erster Linie durch die drei Faktoren: **Substitutionen**, **Recycling** sowie **Materialeffizienz** erreicht werden. Deren Einfluss auf das betrachtete System ist in **Abbildung 2-3** (grün) dargestellt. Substitutionen können dabei sowohl innerhalb der Technologieebene durch Verschiebung der Marktanteile als auch beim spezifischen Materialbedarf durch Einsatz anderer Materialien erfolgen. Für Recycling muss berücksichtigt werden, dass Materialien die wieder als Input im System eingesetzt werden sollen zu einem früheren Zeitpunkt das System als Output verlassen haben oder aus anderen Anwendungsfeldern zur Verfügung stehen müssen. Eine Erhöhung der Materialeffizienz, durch beispielsweise höhere Wirkungsgrade bei gleichbleibendem Materialeinsatz, wirkt sich sowohl auf den Materialinput durch Primärrohstoffe, als auch auf den Materialinput durch Recycling aus.

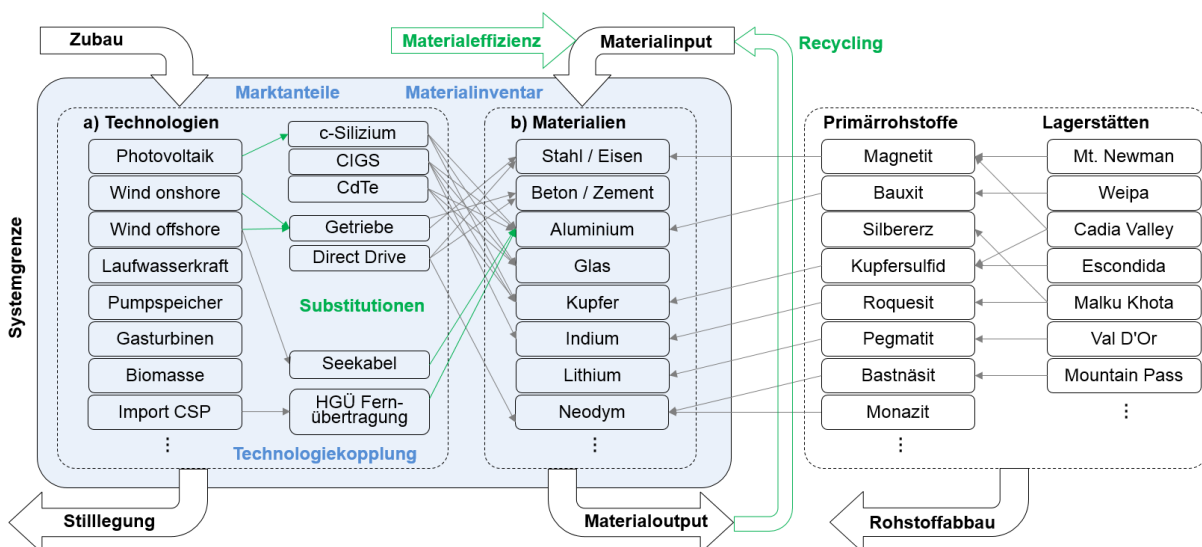


Abbildung 2-3: Einfluss von Substitutionen, Recycling und Materialeffizienz auf das System

2.2 Klassifizierung der Technologien

Für die Betrachtung eines breiten Spektrums an Technologien und deren Bedeutung für das Energieerzeugungssystem in Deutschland muss eine grundlegende Einteilung in Kategorien erfolgen. Die Unterteilung erfolgt in den Kategorien **Erzeugung und Speicherung** elektrischer Energie, die Unterkategorien **konventionelle und erneuerbare Erzeugung** sowie **regelbare und fluktuierende erneuerbare Erzeugung**.

- **Konventionelle Kraftwerke**
 - Stein- und Braunkohlekraftwerke
 - Gasturbinen- und GuD-Kraftwerke
 - Kernkraftwerke
- **Regelbare erneuerbare Energien**
 - Biomassekraftwerke
 - Geothermische Kraftwerke
 - Solarthermische Kraftwerke
- **Fluktuierende Erneuerbare Energien**
 - Photovoltaikanlagen
 - Windkraftanlagen
 - Laufwasserkraftwerke
- **Elektrische Energiespeicher**
 - Pumpspeicherkraftwerke
 - Speicherwasserkraftwerke
 - Wasserstoffspeicher
 - Druckluftspeicher
 - Lithium-Ionen Speicher
 - Vanadium-Redox Flussbatterien

2.3 Klassifizierung der Materialien

Unter Materialien werden im Rahmen der Studie nicht-erneuerbare und nicht-energetisch genutzte Stoffe verstanden. Die betrachtete gebundene Materialsomme stellt dabei nicht den Gesamtbedarf einer Technologie an Materialien dar, sondern erfasst nur die Stoffe, die nach der Installation des Kraftwerks oder elektrischen Energiespeichers für die Dauer der Lebenszeit einer Technologie gebunden werden.

Eine korrekte Quantifizierung der Materialsommen ist aufgrund der Vielzahl der Annahmen nur eingeschränkt möglich. Auch besteht eine gewisse Problematik bei der Abgrenzung des Systems hinsichtlich der als notwendig betrachteten Materialien. Im Rahmen der Arbeit werden die Rohstoffe daher den drei gewählten Materialgruppen: **Mengenmaterialien**, **Technologiematerialien** sowie **Spezialmaterialien** zugeordnet um für die Kategorien

Aussagen hinsichtlich der Materialintensität eines Energieerzeugungssystems treffen zu können. Diese Eingrenzung dient der besseren Veranschaulichung der Bedeutung der Materialgruppen. Da jedoch weitere funktional wichtige Materialien für einige Technologien benötigt werden, wird auf diese separat an entsprechender Stelle eingegangen.

- **Mengenmaterialien:** Unter Mengenmaterialien werden im Rahmen der Arbeit Materialien verstanden, deren Einsatz in erster Linie von struktureller Bedeutung für die Anlagen ist. Darunter fallen wie auch bei konventionellen Kraftwerken die Stoffe Beton und Zement für Fundamente und Bautechnik, Stahllegierungen und Eisen für die Maschinentechnik und den Stofftransport. Glas und Aluminium spielen insbesondere in den Solartechnologien eine entscheidende Rolle.
- **Technologiematerialien:** Ein wesentlicher Bestandteil der Technologien sind Materialien die deren Funktionalität gewährleisten, wie beispielsweise Silizium in Photovoltaikmodulen oder Lithium und Vanadium für die Speicherung elektrischer Energie. Zudem entsteht durch den Aspekt der Dezentralität selbst unter Vernachlässigung des innerdeutschen Übertragungs- und Verteilnetzes ein großer Materialbedarf an Kupfer für Generatoren in Windkraftanlagen und Wechselrichtern für Photovoltaikmodule. Blei ist in Seekabeln insbesondere für die Anbindung der Offshorewindenergieparks aber auch für die HVDC Übertragung von Solarstrom beim Stand der Technik noch von Bedeutung.
- **Spezialmaterialien:** Als Spezialmaterialien werden im Rahmen dieser Studie metallische Rohstoffe definiert, die für den Einsatz von Subtechnologien benötigt werden. Diese Stoffe führen gegenüber der Haupttechnologie zu einer effizienteren Funktionsweise. Die Photovoltaik Dünnschichttechnologien Kupfer-Indium-Gallium-Diselenid (CIGS) sowie Cadmium-Tellurit (CdTe) profitieren von einem geringeren Materialbedarf und einfacheren Prozessschritten. Für die Dünnschichttechnologien werden auch bessere Wirkungsgrade sowie zusätzliche Anwendungsgebiete erwartet, wie der Einsatz in transparenten Solarzellenfenstern. Der Bedarf nach Neodym und Dysprosium in Stromversorgungssystemen resultiert aus dem Einsatz von Neodym-Eisen-Bor Magneten in getriebelosen Windkraftanlagen. Diese Magnete besitzen eine deutlich bessere magnetische Flussstärke, was zu kleineren Windkraftanlagen bei gleicher Leistung führt.

Eine Zusammenfassung der im Detail betrachteten Materialien ist in **Tabelle 2-1** aufgeführt.

Tabelle 2-1: Einteilung der im Detail betrachteten Materialien

Mengenmaterialien	Technologiematerialien	Spezialmaterialien
<ul style="list-style-type: none"> • Beton/Zement • Stahl/Eisen • Aluminium • Glas 	<ul style="list-style-type: none"> • Kupfer • Blei • Silizium • Silber • Lithium • Vanadium 	<ul style="list-style-type: none"> • Gallium • Indium • Cadmium • Tellur • Neodym • Dysprosium

Dabei ist jedoch keine klare Abgrenzung zwischen den Materialgruppen möglich und die Einteilung kann durch andere Einflussfaktoren wie die Marktanteile von Technologien und dem regional nutzbaren Potentialen unterschiedlich ausfallen. Für Deutschland lassen sich nach Scholz (2012) die größten Anteile regionaler erneuerbarer Energien in den Bereichen der Photovoltaik sowie der Windenergie erreichen. In Kombination mit dem Marktanteil im Jahr 2014 der siliziumbasierten Photovoltaik von 90 % (ISE 2014) erfolgt die Einordnung von Silizium und Silber unter Technologiematerialien während Materialien für Dünnschichttechnologien unter den Spezialmaterialien eingeordnet werden.

2.4 Materialbedarfsanalyse

Ausgehend von Literaturdaten zu den unterschiedlichen Technologien erfolgt eine Einschätzung des Materialbedarfs pro installierter Leistung sowie pro installierter Energiekapazität bei den elektrischen Energiespeichern. Der spezifische Materialbedarf erfolgt, sofern nicht anders angegeben, immer in Bezug auf 1 MW installierter Leistung und 1 MWh Speicherkapazität. Für eine bessere Einschätzung der Skaleneffekte und Betriebsbedingungen sind, sofern in den Studien gegeben, die Leistung, die Lebensdauer und der Kapazitätsfaktor der Referenzanlagen aus den Studien ebenfalls mitaufgeführt. Zur Vergleichbarkeit mit anderen Studien die auf Informationen des Globalen Emissions-Modells Integrierter Systeme (GEMIS) Datenbank zurückgreifen, sind neben dem Gesamtmaterialbedarf der einzelnen Technologien die GEMIS Werte der kumulierten Mengenanforderungen (Cumulative Material Requirement, CMR) angegeben (Fritsche 2001; Streicher 2014). Obwohl die Daten der GEMIS die Summe der gesamten Rohstoffentnahme aus der Umwelt darstellen, können diese Werte, umgerechnet auf den leistungsbezogenen Materialbedarf, zusätzliche Informationen über Skaleneffekte und die Größenordnung des Materialbedarfs liefern.

2.5 Szenarienpfade

Für die Anwendung der spezifischen Materialbedarfswerte kommen die Szenarien nach Trieb und Hess (2013) für das deutsche Stromerzeugungssystem zum Einsatz. Die Modellierung und Bilanzierung der Werte erfolgte im Excel basierten Tool ELCALC-DE. Die zwei Szenarien die hinsichtlich ihrer Materialintensität untersucht werden unterscheiden sich in erster Linie durch die gewählten Technologien die für den Ausbau berücksichtigt werden. In einem ersten Szenario liegt der Schwerpunkt auf der heimischen Bereitstellung von elektrischer Energie durch den Einsatz von fluktuierenden erneuerbaren Energien sowie einem Ausbau elektrischer Energiespeicher. Demgegenüber wird im zweiten Szenario verstärkt auf die Bereitstellung von regelbarer Energie gesetzt, welche aufgrund der begrenzten Potentiale in Deutschland über solarthermische Kraftwerke in Nordafrika und Hochspannungsgleichstromübertragungsleitungen (HGÜ) bereitgestellt wird.

Die Szenarien bilden dabei eine Entwicklung des deutschen Stromerzeugungssystems hin zu hohen Anteilen erneuerbarer Energien ab. Der zeitliche Rahmen richtet sich dabei teilweise nach den politischen Zielen zum Anteil erneuerbarer Energien und setzt den geplanten Ausbau konsequent fort um langfristige Effekte aufzeigen zu können. Dabei ergeben sich Anteile erneuerbarer Energien am Bruttostrombedarf von 50 % im Jahr 2030, 80 % im Jahr 2050 sowie 95 % im Jahr 2070. Zudem wird erwartet, dass der elektrische Jahresenergieverbrauch bis 2030 geringfügig auf 630 TWh ansteigt, sowie sich durch Elektromobilität und Wärmepumpen langfristig für die Jahre 2050 und 2070 auf 700 TWh beläuft (SRU 2011).

Zudem müssen für die Marktanteile der Wind- und Photovoltaiktechnologien langfristige Werte angenommen werden. Dabei wird von zwei Unterszenarien ausgegangen um den Einfluss von Marktanteilen auf die Materialsummen und -flüsse zu untersuchen. In der ersten Szenariovariation **a** wird dabei von einem verstärkten Einsatz von Dünnschichtphotovoltaik und getriebelosen Windenergieanlagen ausgegangen, während in der zweiten Szenariovariation **b** eine Verringerung der Marktanteile durch regulatorische Maßnahmen oder mangels Verfügbarkeit der Rohstoffe angenommen wird.

2.6 Implementierung in Excel/VBA

Für die Auswertung und den szenarienbasierten Vergleich der Materialsumme müssen die betrachteten Technologien und der damit verbundene Materialbedarf als Inputdaten zur Verfügung gestellt werden. Dies geschieht auf dem Tabellenblatt *Materialbedarf*. In den Tabellenblättern *Leistung* sowie *Energie* werden die installierten Leistungen und erzeugten elektrischen Energien zu den betrachteten Jahren und Szenarien festgelegt.

Über den Namensmanager in Excel werden aus den zu Verfügung gestellten Daten automatisch Vektoren für die Technologien, Materialien, Jahre und Szenarien erstellt. Die Berechnung der Ergebnisse erfolgt mittels Visual Basic for Applications (VBA), einer Skriptsprache zur

Steuerung von Excel Abläufen. Dabei wird durch das Ausführen des Skriptes (Schaltfläche „Generieren“ auf der Tabellenblatt *Ergebnisse*) eine Tabelle mit allen Daten erstellt, welche die gebundene Materialsomme pro Technologie für jedes Szenario und jedes Jahr enthält. Auf den Tabellenblättern Tabelle Ergebnisse sowie Diagramm Ergebnisse kann diese dynamisch mittels Pivot-Tabelle beziehungsweise -Diagramm ausgewertet werden.

Um von den gebundenen Materialsommen auf die jährlichen Materialflüsse über die Systemgrenze schließen zu können, müssen Annahmen hinsichtlich der technischen Lebensdauer der Anlagen und den Zeitpunkt der Deinstallation getroffen werden. Der Zubau an installierter Leistung teilt sich auf in eine lineare Komponente für die Änderung zwischen den gegebenen Szenarienjahren und eine dynamische Komponente, welche die im selben Jahr deinstallierte Leistung ausgleicht. Die Deinstallation wird unter Zuhilfenahme einer Weibulldichteverteilung modelliert und einen unschärferen Zeitraum für die Anlagenstillegungen zu erhalten.

Weiterführende methodische Ansätze

- **Ausweitung des Modells auf ein Life Cycle Assessment auf Systemebene:** Um neben den gebundenen Materialsommen sowie daraus resultierenden Materialflüssen die Umweltauswirkungen von verschiedenen Szenarien für Stromerzeugungssysteme abschätzen zu können, bietet es sich an die Systemgrenzen zu erweitern. Dazu zählen insbesondere das Erfassen der Rohstoffentnahmen aus der Umwelt die mit dem spezifischen Materialbedarf verbunden sind, aber auch die Emissionen der Herstellungsprozesse und Transporte sowie dem notwendigen Energieaufwand. Je nach angestrebtem Detailgrad lässt sich dieser Ansatz mit dem komponentenbasierten Ansatz für die Technologien auf Seite 37 verbinden um Auswirkungen von Herstellungsschritten besser identifizieren zu können.
- **Optimierung von Zubau und Deinstallation:** Die Annahmen zu den Änderungen an der installierten Leistung ermöglichen zwar eine Abschätzung der Materialflüsse über die Systemgrenzen, dabei wird jedoch zwischen zwei gegebenen Jahren der Szenarien nur interpoliert ohne das System erneut zu bilanzieren. Durch zusätzliche Stützpunkte für die das Jahr ebenfalls bilanziert wird lässt sich so gegenüber dem linearen Zubau ein realitätsnäherer Verlauf generieren. Zudem liegen zu den tatsächlichen technischen Lebensdauern insbesondere der fluktuierenden erneuerbarer Energien noch relativ wenige Daten vor.

3 Technologien

3.1 Konventionelle Energieträger

3.1.1 Braun- und Steinkohlekraftwerke

Für Braun- und Steinkohlekraftwerke umfasst der Großteil des Materialbedarfs die Mengematerialien Beton und Stahl. Dabei zeigen sich Skaleneffekte in der Studie von Dones et al. (2007) zwischen den betrachteten 100 und 500 MW Varianten. Mit sinkendem spezifischen Materialbedarf bei steigender installierter Kraftwerksleistung. Dabei liegen jedoch alle Werte über denen der drei anderen Studien von Pacca und Horvath (2002), Spath et al. (1999) sowie White und Kulcinski (1998). Die Studie von White gibt mit einem Gesamtmaterialbedarf von 115 t/MW die geringsten Werte für den Materialbedarf an, dies liegt unter anderem auch an der angenommenen Lebensdauer von 40 Jahren. Demgegenüber steht ein sehr hoher Gesamtmaterialbedarf von 642 t/MW für Steinkohlekraftwerke und 838 t/MW für Braunkohlekraftwerke in der sehr detaillierten Studie von Schwaiger. Die Werte für den Gesamtmaterialbedarf werden im Rahmen der GEMIS Datenbank (Fritsche 2001) noch höher eingeschätzt.

Tabelle 3-1: Literaturwerte für den spezifischen Materialbedarf für Braun- und Steinkohlekraftwerke

Quelle Bezeichnung	Pacca 2002	Spath 2000	White 1998	Dones 2007	Dones 2007	Dones 2007	Dones 2007
				Steinkohle	Braunkohle	Steinkohle	Braunkohle
Leistung [MW]	913	360	1000	100	100	500	500
Lebensdauer [a]	30	30	40				
Kap. Faktor [%]	70,0	60,0	75,0				
Beton [t/MW]	195,00	159,00	74,30	400,00	400,00	250,00	250,00
Stahl [t/MW]	68,20	50,70	40,30	100,00	130,00	80,00	100,00
Aluminium [t/MW]	0,68	0,42	0,26	1,00	1,00	0,60	0,60
Kunststoffe [t/MW]				1,50	1,50	1,00	1,00
Kupfer [t/MW]			0,45	1,50	1,50	1,30	1,30
Gesamt [t/MW]	263,88	210,12	115,31	505,00	535,00	333,65	353,65
Ref. GEMIS [t/MW]				2664,00	4104,00	2664,00	4104,00

Bei den Legierungen für die Hochtemperaturstähle kommt es nach JRC (2011) in der Zukunft zu einem verstärkten Einsatz von insbesondere Nickel, Kobalt und Chrom aber auch Titan und Molybdän. Auch hier lässt sich aufgrund der großen Spannweite der Werte für den Stahlbedarf von 40 t/MW bis 130 t/MW kein konkreter Zusammenhang herstellen. Für die Materialmatrix wird auf die 500 MW Kraftwerke nach Dones et al. (2007) zurückgegriffen.

3.1.2 Gasturbinen und GuD-Kraftwerke

Eine Unterscheidung zwischen GuD-Kraftwerken und Gasturbinenkraftwerken kann aufgrund der Datenbasis im Rahmen dieser Studie nicht durchgeführt werden. Der kumulierte Materialbedarf nach der GEMIS Datenbank (Fritsche 2001) legt nahe, dass der spezifische Materialbedarf für GuD-Kraftwerke mit 558 t/MW deutlich höher liegt als der spezifische Materialbedarf der Gasturbinen mit 204 t/MW. Demgegenüber gibt Schwaiger (1996) für die GuD-Kraftwerke einen spezifischen Gesamtmaterialbedarf von 125 t/MW an, welcher aufgrund der detaillierten Angaben der Studie als realistischer eingeschätzt wird. Daher wird für Gasturbinenkraftwerke und GuD-Kraftwerke derselbe spezifische Materialbedarf angenommen. Der Bedarf an Kupfer wird von Schwaiger (1996) mit 0,558 t/MW angegeben, in den anderen Studien jedoch immer vernachlässigt. Die Werte nach Meier (2002), insbesondere für den Stahlbedarf, erscheinen im Vergleich zu den anderen Studien als deutlich zu gering angesetzt.

Tabelle 3-2: Literaturwerte für den spezifischen Materialbedarf für Gasturbinen- und GuD-Kraftwerken

Quelle Bezeichnung	Pacca 2002	Spath 2000	Meier 2000
Leistung [MW]	875	505	620
Lebensdauer [a]	30	30	40
Kap. Faktor [%]	72,4	80,0	75,0
Beton [t/MW]	81,40	97,80	47,70
Stahl [t/MW]	58,50	31,00	2,50
Eisen		0,62	0,12
Aluminium [t/MW]	0,26	0,20	
Gesamt [t/MW]	140,16	129,62	50,32
Ref. GEMIS [t/MW]	204,00	204,00	204,00

Für die Materialmatrix werden im Folgenden die Werte nach Pacca und Horvath (2002) verwendet, wobei angenommen wird, dass sich der Kupferbedarf in einer ähnlichen Größenordnung wie die von Schwaiger (1996) angegebenen Werte befindet. Daher wird für die Materialmatrix der Wert für Kupfer mit 0,6 t/MW abgeschätzt.

3.1.3 Kernkraftwerke

Die Kernenergie zeichnet sich im Vergleich zu den anderen konventionellen Kraftwerken durch höhere spezifische Materialwerte aus. Dabei kann davon ausgegangen werden, dass dies in erster Line auf die komplexere Anlagentechnik und Anzahl an Sicherheitsebenen zurückzuführen ist. Die Werte des spezifischen Materialbedarfs sind in **Tabelle 3-3** aufgeführt. Die Angaben zum Bedarf an Kupfer, sowie Papier und Öl lassen darauf schließen dass in der

Studie von Dones et al. (2007) die elektrischen Komponenten vollständig erfasst wurden. Generell liegen in dieser Studie die Werte im Vergleich zu den Studien von Bryan und Dudley (1974) und Anigstein et al. (2004) etwas höher, jedoch handelt es sich dabei um die Daten der schweizerischen Kernkraftwerke Gösgen und Leibstadt. Die Unterschiede zwischen den zwei Ausführungen als Siedewasserreaktor und als Druckwasserreaktor zeigen hinsichtlich des spezifischen Materialbedarfs bei der Installation nur sehr geringe Unterschiede. Jedoch ist die technische Ausführung als Druckwasserreaktor aufgrund der Sicherheitsaspekte für die Zukunft die wahrscheinlichste Option. Aufgrund des im Jahr 2011 beschlossenen Ausstiegs aus der Kernenergie werden in Deutschland keine neuen Kernkraftwerke mehr gebaut. Hinsichtlich der gebundenen Materialsummen wird im Rahmen dieser Studie somit nur die Deinstallation betrachtet. Aufgrund der Kontamination mancher Materialgruppen lassen sich nicht alle Materialien uneingeschränkt für andere Anwendungen nutzen, dies wird jedoch aufgrund der geringen freiwerdenden Materialsummen vernachlässigt. Für die Materialmatrix werden die Werte des Druckwasserreaktors nach Dones et al. (2007) verwendet.

Tabelle 3-3: Literaturwerte für den spezifischen Materialbedarf für Kernkraftwerke

Quelle	Bryan 1974	Anigstein 2000	Dones 2007	Dones 2007
Bezeichnung			PWR Gösgen	BWR Leibstadt
Leistung [MW]	1000	1155	970	1165
Lebensdauer [a]	40	40	40	40
Kap. Faktor [%]	75,0	75,0	91,5	84,8
Beton [t/MW]	180,00	307,00	418,64	412,43
Zement [t/MW]			5,46	4,55
Stahl [t/MW]	42,60	29,50	63,05	56,69
Eisen [t/MW]	1,30			
Aluminium [t/MW]	0,02	0,06	0,21	0,17
Kupfer [t/MW]	0,69	0,60	1,52	1,26
Blei [t/MW]	0,46			
Titan [t/MW]				0,11
Papier [t/MW]			0,88	3,65
Öl [t/MW]			0,21	0,17
Gesamt [t/MW]	225,07	337,16	489,96	479,03

3.2 Regelbare erneuerbare Energien

3.2.1 Biomassekraftwerke

Grundsätzlich muss bei Biomassekraftwerken zwischen der Verbrennung von Biomasseabfällen und Biomasse aus Energiepflanzen unterschieden werden. Aufgrund der fehlenden Inventardaten für Biomasseabfallkraftwerken und der vermuteten technischen Ähnlichkeit der Anlagen, werden die Werte des spezifischen Materialbedarfs der Biomassekraftwerke mit Biomasse aus Energiepflanzen für beide Kategorien übernommen.

Ein Vergleich mit den konventionellen Kraftwerken zeigt, dass sich der spezifische Materialbedarf für die Installation des Kraftwerks in einem ähnlichen Bereich wie Kohle- oder Gasturbinenkraftwerke befindet. Konkrete Zahlen für Biomasseanlagen finden sich in einem Vergleich der benötigten Materialmengen verschiedener Kraftwerksanlagen in der Studie zu geothermischen Kraftwerken des Argonne National Laboratory (ANL) (Sullivan et al. 2010) sowie in der Studie des National Renewable Energy Laboratory (NREL) (Mann und Spath 1997). Problematisch ist in beiden Fällen die fehlende Angabe des benötigten Kupfers, so dass davon ausgegangen werden kann, dass elektrische Komponenten vernachlässigt wurden. Der Vergleich in **Tabelle 3-4** mit den Werten der gewählten Materialbedarfswerte der Kohlekraftwerke in Kapitel 3.1.1 und Gasturbinenkraftwerke in Kapitel 3.1.2 zeigt eine ähnliche Größenordnung im Bereich zwischen dem Gasturbinenkraftwerk und dem Braunkohlekraftwerk. Für eine detaillierte Betrachtung werden insbesondere Werte für den elektrischen Anlagenteil sowie für die Komponenten der Abgasaufbereitung benötigt, da hier mögliche versorgungskritische Materialien wie Platin oder Palladium auftreten können.

Tabelle 3-4: Literaturwerte für den spezifischen Materialbedarf für Biomassekraftwerke und vergleichbare Anlagentypen

Quelle	Sullivan et al.	Mann und Spath	Pacca 2002	Dones 2007	Dones 2007
	2010	1997			
Bezeichnung	Biomasse	Biomasse	Gasturbine	Braunkohle	Kernkraft
Leistung [MW]	88,5	113	875	500	970
Lebensdauer [a]	30	30	30		40
Kap. Faktor [%]	88,2	80,0	72,4		91,5
Beton [t/MW]	159,00	156,27	81,40	250,00	418,64
Zement [t/MW]					5,46
Stahl [t/MW]	51,00	58,45	58,50	100,00	63,05
Eisen [t/MW]	0,90	0,68			
Aluminium [t/MW]	1,30	0,46	0,26	0,60	0,21
Kupfer [t/MW]				1,30	1,52
Gesamt [t/MW]	212,20	215,86	140,16	353,65	489,96
CMR GEMIS [t/MW]	252,00	252,00	204,00	4104,00	

Für die Materialmatrix werden die von Sullivan et al. (2010) angegebenen Werte angenommen, zudem wird für die elektrischen Komponenten des Kraftwerks ein spezifischer Kupferbedarf analog zu den Gasturbinenkraftwerken in Kapitel 3.1.2 mit 0,6 t/MW angenommen.

3.2.2 Solarthermische Kraftwerke

Bei den solarthermischen Kraftwerken liegen vom National Renewable Energy Laboratory (NREL) Inventardaten aus einem Life Cycle Assessment sowohl für zwei verschiedene Ausführungen als Parabolrinnenkraftwerke (Heath und Turchi 2009) als auch Daten für ein Solarturmkraftwerk (Heath et al. 2013) vor. In beiden Studien werden dabei detaillierte Werte für den Materialbedarf der Kraftwerkskomponenten angegeben. Dabei wird zwischen Komponenten des Hochtemperaturfluidsystems, des Solarfeldes, des thermischen Energiespeichers und dem Turbinenteil des Kraftwerks differenziert. Nach der Zusammenfassung der Stoffe in die Materialien dieser Studie und Skalierung der Speicherkapazität des thermischen Energiespeichers von 2140 MWh_{th} auf 6130 MWh_{th} was einer Steigerung der Volllaststunden aus einem vollständigen Speicherzyklus von 6,3 Stunden auf 18 Stunden entspricht, ergeben sich für den Materialbedarf die in **Tabelle 3-5** aufgelisteten Werte.

Tabelle 3-5: Literaturwerte für den spezifischen Materialbedarf für solarthermische Kraftwerke

Quelle	NREL 2009	NREL 2009	NREL 2013
Bezeichnung	Parabolrinne (nass)	Parabolrinne (trocken)	Solarturm
Leistung [MW]	103	103	100
Lebensdauer [a]	30	30	30
Kap. Faktor [%]			
Beton [t/MW]	796,48	822,11	1561,64
Zement [t/MW]	0,48	0,48	
Stahl [t/MW]	340,53	394,05	424,79
Eisen [t/MW]	0,88	0,88	
Aluminium [t/MW]	0,87	4,29	3,20
Glas [t/MW]	114,96	123,71	100,00
Kunststoffe [t/MW]	11,51	11,51	4,48
Kupfer [t/MW]	1,34	1,39	3,05
Zink [t/MW]			0,40
NaNO ₃ KNO ₃ [t/MW]	1719,83	1852,98	524,10
Kalziumsilikat [t/MW]	40,05	42,27	1,32
Silber [t/MW]	0,010	0,011	
Nickel [t/MW]	0,112	0,121	0,057
Gesamt [t/MW]	3027,06	3253,81	2623,03
CMR GEMIS [t/MW]	1943,00	1943,00	1943,00

Für die Parabolrinnenkraftwerke wird der Bedarf an Silber für die Installation mit 10 kg/MW angegeben. Nach Angerer et al. (2009) liegt der Bedarf bei 4 kg/MW für die Parabolrinnenkraftwerke und 8 kg/MW für die Solarturmkraftwerke. Im Rahmen des SET Projekts wird ein spezifischer Silberbedarf von 7 kg/MW angegeben, dabei wird jedoch nicht zwischen den Technologieausführungen unterschieden (JRC 2011). Für die Abschätzung des Materialbedarfs in den Szenarien wird im Folgenden mit den Werten von Heath und Turchi (2009) für das Parabolrinnenkraftwerk gearbeitet.

Zudem muss für die Hochspannungsgleichstromübertragung (HVDC) der Materialbedarf für die elektrische Leitung berücksichtigt werden. Hierfür stehen in erster Linie Daten für Wechselstromleitungen zur Verfügung, aufgelistet in **Tabelle 3-6** (Jorge et al. 2012a; Nes 2012). Für die Anlagentechnik gibt die Studie von Jorge et al. (2012b) ebenfalls nur Werte für Wechselspannungen auf Verteilnetzebene an, so dass diese im Rahmen dieser Studie mangels Daten vernachlässigt werden.

Tabelle 3-6: Literaturwerte für den spezifischen Materialbedarf für Übertragungsleitungen

Quelle Bezeichnung	Jorge 2011 Freileitung 400 kV (AC)	Jorge 2011 Freileitung 150 kV (AC)	Jorge 2011 Erdkabel 150 kV (AC)	Jorge 2011 Seekabel 150 kV (AC)	Nes 2012 Seekabel 450 kV (AC)	May 2005 Freileitung 800 kV (DC)	May 2005 Seekabel 800 kV (DC)
Strecke	1 km	1 km	1 km	1 km	1 km	1 km	1 km
Lebensdauer [a]						50	50
Beton [t/km]	288,00	129,60				200,00	
Zement [t/km]	0,09	0,05					
Stahl [t/km]	61,65	21,88	3,40	15,80	65,48	81,40	24,00
Eisen [t/km]	15,00	6,00					
Aluminium [t/km]	18,47	7,30				17,40	
Glas [t/km]	1,35	0,56					
Kunststoffe [t/km]			3,60	1,80	3,00		2,30
Kupfer [t/km]			14,70	14,70	13,00		19,00
Blei [t/km]			14,20	14,20	23,00		17,00
Zink [t/km]	1,60	0,20			0,51		
Keramik [t/km]						2,000	
Papier [t/km]							6,000
Gesamt [t/km]	386,15	165,59	35,90	46,50	104,99	300,80	68,30

Für eine Übertragungsleistung von 10 GW sind nach May (2005) 2 Freileitungstrassen oder 8 Seekabel notwendig. Dabei wird angenommen, dass sämtliche Landleitungen als Freileitungen ausgeführt sind. Unter Berücksichtigung der Strecke einer HVDC Leitung von einem solarthermischen Kraftwerk in Marokko für den Export nach Deutschland nach Hess (2013) ergibt sich für die zwei betrachteten Strecken Marrakesch nach Daxlanden (2534 km Freileitung, 28 km Seekabel) und Missouri nach Eichstetten (1049 km Freileitung, 1245 km Seekabel) der leistungsspezifische Materialbedarf in **Tabelle 3-7**.

Tabelle 3-7: Spezifischen Materialbedarf für die HVDC Leitungen

Bezeichnung	HVDC Marrakesch - Daxlanden	HVDC Missouri - Eichstetten
Leistung [GW]	10	10
Lebensdauer [a]	50	50
Beton [t/MW]	101,36	41,96
Stahl [t/MW]	41,75	40,98
Aluminium [t/MW]	8,82	3,65
Kunststoffe [t/MW]	0,05	2,29
Kupfer [t/MW]	0,40	18,9
Blei [t/MW]	0,35	16,9
Keramik [t/MW]	1,01	0,42
Papier [t/MW]	0,12	5,98
Gesamt [t/MW]	153,89	132,13

Für die Materialmatrix wird die Strecke Missouri nach Eichstetten nach Hess (2013) verwendet, damit unter der Annahme eines ähnlichen Materialbedarfs zwischen HVDC Seekabeln und Erdkabeln den Materialbedarf für Teilstrecken aus Erd- und Seekabeln einschätzen zu können. Zudem wird berücksichtigt, dass auf der Strecke 10 % Transportverluste auftreten. Daher werden sowohl die Leistung für das solarthermische Kraftwerk, als auch für die HVDC Leistung 10 % größer angesetzt.

3.2.3 Geothermische Anlagen

Bei geothermischen Kraftwerken hängt der Materialbedarf der Installation in erster Linie vom Standort und dem technischen Aufwand der Erschließung der geothermischen Energie ab. Dies führt zu erheblichen Unsicherheiten bei allen verwendeten Materialien. Die Literaturwerte für geothermische Kraftwerke sind in **Tabelle 3-8** aufgeführt. Nach einer Studie des Argonne National Laboratory (ANL) liegt der Materialbedarf geothermischer Binär- und Flashanlagen in etwa bei einem Drittel des Bedarfs von EGS-Systemen (Sullivan et al. 2010). Unter Berücksichtigung der Literaturwerte zweier anderer Studien (Rule et al. 2009; Frick et al. 2010) ergibt sich eine Spannweite des gesamten spezifischen Materialbedarfs von 765 bis 3226 t/MW wobei der Hauptanteil auf Stahl, Beton und Zement fällt. In allen Studien werden nur die Materialien mit den größten Massenanteilen betrachtet um den Einfluss der Technologien auf die Umwelt zu bewerten. Dies führt dazu, dass bei vielen anderen Materialien, wie beispielsweise Kupfer für Generatoren und elektrische Leitungen, entsprechende Werte fehlen. In den Ergebnissen der SET Studie (JRC 2011) finden sich Werte für den Materialbedarf für die Legierungen, allerdings lassen sich durch die stark variierenden Werte für den Bedarf an Stahl, der fehlenden Klassifizierung der Stahlsorten und den unterschiedlichen Wärmequellentemperaturen bei den verschiedenen Technologie-ausführungen keine Rückschlüsse auf den Bedarf der Legierungsmetalle der anderen Studien ziehen. Durch die

physikalischen Anforderungen an den Stahl, kann jedoch davon ausgegangen werden, dass ein hoher Anteil der Stähle einen Legierungsanteil von Chrom, Nickel und Molybdän benötigt.

Tabelle 3-8: Literaturwerte für den spezifischen Materialbedarf für geothermische Kraftwerke

Quelle	ANL 2010	ANL 2010	ANL 2012	ANL 2013	Rule 2009	Frick 2010
Bezeichnung	EGS-20	EGS-50	HT-Binary-10	HT-Flash		
Leistung [MW]	20	50	10	48,4	162	0,93
Lebensdauer [a]	30	30	30	30	100	30
Kap. Faktor [%]	95,0	95,0	95,0	95,0	93,0	
Beton [t/MW]	460,00	460,00	459,00	159,00	1883,00	41,50
Zement [t/MW]	988,00	987,00	87,40	232,00	777,00	59,90
Stahl [t/MW]	1204,00	1175,00	356,00	295,00	566,00	1138,00
Eisen [t/MW]	3,90	2,80	4,28	2,02		
Aluminium [t/MW]	45,20	45,20	46,10			
Bentonit [t/MW]	283,00	282,00	34,00	77,00		
Gesamt [t/MW]	2984,10	2952,00	986,78	765,02	3226,00	1239,40
CMR GEMIS [t/MW]	2790,00	2790,00	2790,00	2790,00	2790,00	2790,00

Der Bedarf an Beton und Zement in der Studie von Rule et al. (2009) lässt sich durch die angenommene Lebenszeit von 100 Jahren und der daraus resultierenden Anzahl an Erneuerungen erklären. Demgegenüber fällt in der Studie von Frick et al. (2010) der Bedarf an Beton und Zement am geringsten aus, obwohl der Bedarf an Stahl in der Größenordnung der EGS-Systeme aus der Studie des ANL liegt. Für die Berechnung der Materialsummen wird auf die Werte der geothermischen Flashanlage aus der Studie der ANL Geothermie (Sullivan et al. 2010) zurückgegriffen, da dies die zum Zeitpunkt der Studie am weitesten verbreitete Bauform darstellt. Der Marktanteil der Single- und Double-Flashanlagen der im Jahr 2014 weltweit installierten Leistung von 12,6 GW beträgt 62 % (Bertani 2014). Für die Materialmatrix wird angenommen, dass sich der Kupferbedarf mit 1,3 t/MW in einer ähnlichen Größe wie der Bedarf für Braun- und Steinkohlekraftwerke liegt. Im Fall der geothermischen Systeme ist die Zusammenfassung der verschiedenen Legierungsmetalle in die Kategorie Stahl und Eisen durchaus problematisch, jedoch fallen die Fehler dieser Vereinfachung bei der Betrachtung des deutschen Energieerzeugungssystems aufgrund der begrenzten Potentiale gering aus (Scholz 2012).

3.3 Fluktuierende erneuerbare Energien

3.3.1 Photovoltaik

Für die Photovoltaik wird eine grundlegende Unterscheidung zwischen kristallinen Siliziumtechnologien und den Dünnschichttechnologien Kupfer-Indium-Gallium-Diselenid (CIGS) und Cadmium-Tellurid (CdTe) vorgenommen. Dabei stehen für die Module detaillierte Angaben zu Produktionsschritten und dem damit verbundenen Materialbedarf für kristalline Siliziumtechnologien nach de Wild-Scholten und Alsema (2005) in einer aktualisierten Version aus dem Jahr 2007 zur Verfügung. Im Rahmen einer anderen Studie erfolgte eine Erweiterung des Datensatzes um Dünnschichttechnologien durch Jungbluth et al. (2012). Dabei wird in beiden Studien von einer Lebensdauer von 25 Jahren ausgegangen.

Für die Inventardaten dieser Studie werden unabhängig von den Prozessschritten die tatsächlich gebundenen Materialien der Module betrachtet. Als Referenztechnologie für siliziumbasierte kristalline Solarzellen wird aufgrund des höchsten Wirkungsgrades der Datensatz für die monokristallinen Zellen verwendet. Der gebundene Materialbedarf zwischen den Technologien monokristallines Silizium, polykristallines Silizium sowie String-Ribbon Silizium unterscheidet sich bei angenommenem Wirkungsgrad von 14,7 % nur hinsichtlich des Siliziumgehaltes. Als technologietypische Wirkungsgrade sind 14,0 % für monokristallines Silizium, 13,2 % für polykristallines Silizium sowie 12,0 % für ribbon Silizium angegeben. Diese geringeren Wirkungsgrade erhöhen den spezifischen Materialbedarf, sodass die monokristallinen Siliziummodule nach spezifischem Gesamtgewicht am besten abschneiden, obwohl der spezifische Siliziumbedarf leicht über dem des ribbon Siliziums liegt. Bei den Modulen wurde der Modulrahmen aus Aluminium mitberücksichtigt. Die daraus resultierenden Werte sind in **Tabelle 3-9** aufgelistet.

Dabei bestehen insbesondere bei den Materialien der aktiven Schicht für die Dünnschichtphotovoltaik erhebliche Unsicherheiten. Das Verhältnis von Gallium und Indium erfolgt dabei ausgehend von der Masse der aktiven Schicht nur in einer Abschätzung durch Jungbluth et al. (2012). Die gewählten Werte entsprechen dabei einem Gallium-Indium Verhältnis von 77 % – 28 %. Demgegenüber schätzt Zimmermann (2013) für CIGS Zellen den Bedarf an Gallium mit 2 – 20 kg/MW und den Bedarf an Indium mit 10 – 23 kg/MW ab. Ähnliche Werte finden sich auch in der Critical Material Strategy, die den Bereich mit 12,4 – 18,5 kg/MW für Gallium und 15,4 – 23,1 kg/MW für Indium noch enger begrenzt. Nach der chemischen Strukturformel $\text{CuIn}_x\text{Ga}_{1-x}\text{Se}_2$ ergibt sich daraus ein Gallium-Indium Verhältnis von 57 % - 43 % und eine Spannweite für den Selenbedarf von 19,8 – 24,6 kg/MW. Für Cadmium-Tellurit Dünnschichtzellen liegt der Wert für Tellur mit 106 kg/MW über dem Wertebereich des DOE (2011) mit 17 – 74 kg/MW und am unteren Ende des Wertebereichs von Zimmermann (2013) mit 93 – 182 kg/MW. Der Cadmiumwert liegt mit 116 kg/MW geringfügig unter dem Wertebereich von Zimmermann (2013) mit 140 – 167 kg/MW. Damit

sind die Werte für die Cadmium-Tellurit Dünnschichtmodule im Gegensatz zu den Werten der CIGS Module in einem realistischen Bereich.

Tabelle 3-9: Literaturwerte für den spezifischen Materialbedarf für Photovoltaikmodule

Quelle	de Wild-Scholten 2005	Jungbluth 2012	Jungbluth 2012
Bezeichnung	mono c-Si	CIGS	CdTe
Leistung [Wp]	165	72	84
Lebensdauer [a]	25	25	25
Wirkungsgrad	14,0	10,0	11,7
Aluminium [t/MW]	21,00	15,70	13,42
Glas [t/MW]	80,49	150,00	141,00
Kunststoffe [t/MW]	13,65	9,10	5,00
Kupfer [t/MW]	0,90	0,45	0,09
Silizium [t/MW]	8,90		0,030
Silber [t/MW]	0,05		
Gallium [kg/MW]		110	
Indium [kg/MW]		55	
Cadmium [kg/MW]		264	116
Tellur [kg/MW]			106
Gesamt [t/MW]	125,00	175,68	159,76
CMR GEMIS [t/MW]	294,00	294,00	294,00

Für die Werte der Materialmatrix wird der Materialbedarf an Indium, Gallium und Selen mit dem Mittelwert des CMS Wertebereiches abgeschätzt. Zudem erfolgt eine Skalierung des spezifischen Materialbedarfs auf den durchschnittlichen Wirkungsgrad für kristalline Siliziumtechnologien von 16 %. Es ergibt sich mit 7,8 t/MW ein immer noch höherer Siliziumbedarf gegenüber der Angabe von 6 t/MW, jedoch im Vergleich zu der Angabe von 16 t/MW für 2004 durchaus eine realistische Größe (ISE 2014).

Für die Photovoltaikanlagen muss neben den Modulen der Materialaufwand für die Installation als Dach- oder Freiflächenanlage berücksichtigt werden, dazu zählen neben der Dachhalterung bzw. Aufständigung auf einer Freifläche auch der Wechselrichter, sowie die notwendige Verkabelung. Die Literaturwerte für die Anlagenkomponenten ist in **Tabelle 3-10** aufgeführt. Im Falle der Freiflächenanlage muss zudem in vielen Ländern eine Einzäunung erfolgen. Die Gesamtheit der zusätzlichen Komponenten wird als Balance of System (BOS) bezeichnet. Hierfür ergibt sich auch die Notwendigkeit einer Umrechnung der Bezugsgröße auf eine leistungsbezogene Einheit, welche der Leistung der Photovoltaikmodule entspricht. In der Studie von Mason et al. (2006) erfolgt eine Skalierung der Anlage auf die installierte Nennleistung von 1 MW bei einem Modulwirkungsgrad von 12,2 %. Demgegenüber geben Pacca und Horvath (2002) in ihrer Studie für die auf 4,1 GW skalierte Anlage um bis zu dem

Faktor 20 größere Werte an. Diese erscheinen unter Berücksichtigung der Werte nach Mason und Jungbluth et al. (2012) als nicht sehr plausibel, so dass diese Werte vernachlässigt werden.

In der Studie nach Jungbluth wird als Bezugseinheit für die Dachhalterung Quadratmeter verwendet, für die Verkabelung und die Elektronik jedoch Watt. Für die bessere Vergleichbarkeit sind die Werte pro Quadratmeter unter Annahme eines Wirkungsgrades von 12,2 % in Werte pro MW umgerechnet. Im direkten Vergleich besitzt die Freiflächenanlage den höheren Materialbedarf, kann jedoch durch die leistungsstärkeren Wechselrichter zu Einsparungen an Kupfer und Kunststoffen führen. Für die Marktanteile an Freiflächenanlagen wurden nach BSW (2014) 10 % angesetzt. Aufgrund der relativ konstanten Werte der letzten Jahre wird dieses Verhältnis für den gesamten Betrachtungszeitraum beibehalten.

Tabelle 3-10: Literaturwerte für den spezifischen Materialbedarf für Photovoltaik BOS

Quelle	Pacca 2002	Mason 2006	Jungbluth 2012	Jungbluth 2012	Jungbluth 2012
Bezeichnung	Freiflächenanlage	BOS Freifläche	BOS Dach Montageschienen	BOS Dach Elektronik	BOS Dach Verkabelung
Referenz	4118 MW	1 MW	1 m ²	2500 W	3000 W
Lebensdauer [a]	30	30	30	30	30
Kap. Faktor [%]	15,4	12,2	12,2		
Beton [t/MW]	540,00	65,70			
Stahl [t/MW]	1117,00	55,90	12,30	3,92	
Aluminium [t/MW]	43,20	1,29	22,95	0,72	
Glas [t/MW]	259,00				
Kunststoffe [t/MW]		5,83			6,57
Kupfer [t/MW]	117,00	7,53		2,34	9,80
Gesamt [t/MW]	2076,20	136,25	35,25	6,98	16,37
CMR GEMIS [t/MW]	810,00	810,00	294,00	294,00	294,00

3.3.2 Windenergie

Für die Bestimmung des Materialbedarfs von Windenergieanlagen steht eine Vielzahl von Studien zur Verfügung. Die Werte des technologiespezifischen Materialbedarfs der Studien über Windenergieparks sind in **Tabelle 3-11** aufgelistet (Pacca und Horvath 2002; Elsam Engineering 2004, Schleisner 2000, 2000). Die größten Unterschiede hinsichtlich des gesamten Materialbedarfs ergeben sich bei den Offshoreanlagen durch den Einsatz von Betonfundamenten gegenüber Monopile- oder Tripodverankerungen, was sich auch in den Werten der GEMIS Datenbank widerspiegelt (Fritsche 2001). Dies trifft begrenzt auch auf Onshoreanlagen zu, hier ist jedoch der Einsatz von Betonfundamenten, sofern die Bodenbeschaffenheit es zulässt, die kostengünstigste Option. Dies führt zu einer maximalen Spannweite der Werte für den spezifischen Materialbedarf an Beton von 8,59 t/MW bis zu 1130 t/MW, wobei der Großteil der Anlagen zwischen 400 und 600 t/MW liegt. In allen Studien zu Offshorewindparks werden Werte für Blei, welches in den Seekabeln verwendet

wird angegeben. Hierbei spielt die Entfernung zwischen dem Windpark und dem Anschlusspunkt an der Küste eine entscheidende Rolle.

Über Tradeoffs beim Einsatz von Neodym-Eisen-Bor Magneten finden sich in der Literatur sehr verschiedene Angaben. So benötigt die von Guezuraga et al. (2012) untersuchte Windenergieanlage mit Permanentmagnet lediglich 44 % des Gesamtmaterialbedarfs im Vergleich zu der untersuchten Windenergieanlage mit Getriebe. Zimmermann et al. (2013) verfolgen in ihrer Studie einen komponentenbasierten Ansatz und stellen anhand einer größeren Anzahl untersuchter Anlagen einen funktionalen Zusammenhang zwischen den Skalen der einzelnen Komponenten her. Daraus wird für die drei Technologien Direct-Drive mit Permanentmagnetgenerator (DDPMG), Direct-Drive Synchrongenerator (DDSG) und doppelt gespeiste Asynchronmaschinen (DFIG) für Leistungsklassen von 1,5 MW bis 24 MW der Materialbedarf für zukünftige Anlagen abgeschätzt. Die Werte sind aus Gründen der Übersichtlichkeit in Anhang A: Fortsetzung Materialbedarf für Windenergie aufgelistet. Anhand dieser Werte lässt sich nicht zeigen, dass der Einsatz von seltenen Erden den Materialbedarf reduziert.

Tabelle 3-11: Literaturwerte für den spezifischen Materialbedarf für Windenergieanlagen

Quelle Bezeichnung	Pacca 2002	Vestas 2006	Schleisner 2000	Schleisner 2000	Elsam 2004	Elsam 2004
	Onshore	Offshore	Onshore	Offshore	Onshore	Offshore
Leistung [MW]	2688	300	18 x 0,5	10 x 0,5	8 x 2,0	80 x 2,0
Lebensdauer [a]	20	20	20	20	20	20
Kap. Faktor [%]	23,6	40,8			32,2	46,2
Beton [t/MW]	471,00	443,00	565,00	1130,00	402,50	8,59
Stahl [t/MW]	108,00	102,30	105,40	113,20	118,24	190,64
Eisen [t/MW]			2,40	4,80	10,34	11,16
Aluminium [t/MW]	2,33	4,77	2,80	2,80	0,88	4,05
Glas [t/MW]	1,83	14,80	2,20	2,20		
Kunststoffe [t/MW]	7,50	6,40	4,00	5,08	12,97	18,00
Kupfer [t/MW]	0,58	2,48	0,70	5,86	1,54	6,84
Blei [t/MW]		16,10		6,72		14,72
Zink [t/MW]					0,10	4,96
Gesamt [t/MW]	591,24	589,85	682,50	1270,66	546,57	258,96
CMR GEMIS [t/MW]	827,00	396,00	827,00	396,00	827,00	396,00

Bei den Onshorewindanlagen besitzt die Variante mit der Asynchronmaschine den geringsten spezifischen Gesamtmaterialbedarf, während bei den Offshorewindanlagen alle Werte, auch für die einzelnen Materialien nur geringe Unterschiede aufweisen. In der Studie wurde der Bedarf an Blei für die Seekabel vernachlässigt. Aufgrund der Anzahl an erfassten Windenergieanlagen werden die Werte aus der Studie von Zimmermann et al. (2013) verwendet. Für die Onshorewindanlage werden die 3 MW Varianten DFIG und DDPMG, für

die Offshorewindanlagen die entsprechenden 12 MW Anlagen, aufgrund des Einsatzes von Monopile Fundamenten. Um den Stand der Technik für Offshorewindparks zu repräsentieren wird darüber hinaus für die Offshorewindanlagen der spezifische Bleibedarf der Elsam Studie übernommen. In dieser wird von ein Windpark mit 80 x 2 MW Vestas Windenergieanlagen mit einer Entfernung zur Küste von 14 km untersucht. Dieser Parameter hängt jedoch stark von der Distanz zwischen den einzelnen Anlagen sowie der Distanz des Windparks zur Küste ab und wird sich mit steigender Distanz zur Küste und größeren Rotordurchmessern beziehungsweise daraus resultierenden Abständen zwischen den Anlagen erhöhen.

Die benötigten Materialmengen an Neodym und Dysprosium für die Permanentmagneten werden in der CMS Studie des DOE (2011) zwischen 62 bis 186 kg/MW für Neodym und 4 bis 24 kg/MW für Neodym eingeschätzt. Dies entspricht sehr gut den Werten vom Zimmermann et al. (2013) welche, abhängig von der Leistungsklasse, Werte von 157 bis 168 kg/MW für Neodym und 11 bis 12 kg/MW für Dysprosium angeben. Die SET Studie (JRC 2011) geht mit 41 kg/MW für Neodym und 3 kg/MW für Dysprosium von deutlich niedrigeren Werten aus. In allen anderen betrachteten Studien wurden keine Angaben zum Bedarf an seltenen Erden gemacht.

3.3.3 Laufwasserkraftwerke

In der Studie von Flury und Frischknecht (2012) wurden Laufwasserkraftwerke in mit einer Leistung von 190 kW und 8,6 MW untersucht. Zur Vergleichbarkeit mit den angegebenen Werten der Speicherwasserkraft wurden diese Werte ebenfalls in **Tabelle 3-12** dargestellt.

Tabelle 3-12: Literaturwerte für den spezifischen Materialbedarf für Laufwasserkraftwerke

Quelle	Flury 2012	Flury 2012	Dones 2007
Bezeichnung	Laufwasser klein	Laufwasser	Stauwasser
Leistung [MW]	0,19	8,6	95
Lebensdauer [a]	70	80	150
Kap. Faktor [%]	72,0	51,1	22,8
Beton [t/MW]	636,84	6585,56	11026,30
Stahl [t/MW]	23,37	203,92	80,32
Eisen [t/MW]	245,70		
Aluminium [t/MW]	0,14		
Kunststoffe [t/MW]	51,37		
Kupfer [t/MW]	1,15	3,39	3,12
Blei [t/MW]	0,08		
Gesamt [t/MW]	958,65	6792,87	11109,74
CMR GEMIS [t/MW]		7200,00	15037,00

Dabei zeigt sich bei Gesamtmaterialbedarf für die kleine Leistungsklasse eine deutliche Einsparung gegenüber der 8,6 MW Anlage. Dies ist in erster Line auf die geringe Menge an benötigtem Beton zurückzuführen. Nach Zusammenfassung der angegebenen Werte von Stahl und Eisen fällt der Bedarf der kleineren Anlage jedoch größer aus. Ein Vergleich mit den Werten der GEMIS Datenbank (Fritsche 2001) zeigt ein ähnliches Verhältnis zwischen den Laufwasser und Stauwasseranlagen. Für die Materialmatrix werden die Werte der 8,6 MW Laufwasseranlage nach Flury und Frischknecht (2012) verwendet.

3.4 Elektrische Energiespeicher

Für elektrische Energiespeicher liegen nur sehr wenige Studien vor, in denen der benötigte Materialbedarf der Technologie betrachtet wird. Zudem ist eine Aufteilung der Materialmenge in leistungsbezogenen und kapazitätsbezogenen Anteil notwendig. Dies lässt sich nicht in allen Fällen deutlich voneinander unterscheiden. Klar abgrenzbar ist dies beispielsweise bei Vanadium Redox-Flussbatterien in denen der Elektrolyt extern gespeichert wird und komplett unabhängig von der Anlagentechnik zur Energiewandlung betrachtet werden kann. Sind Speicher und Energiewandler jedoch wie in Lithium-Ionen Batterien unmittelbar miteinander verknüpft ist eine Auftrennung nicht möglich. In diesen Fällen muss eine Abschätzung des Materialbedarfs unter Berücksichtigung der technischen Funktionsweise entweder von der Leistung oder von der Speicherkapazität abhängig gemacht werden. Generell werden bei allen elektrischen Energiespeichern genauere Daten zu den einzelnen Komponenten benötigt um den Gesamtbedarf realistisch einschätzen zu können.

3.4.1 Pumpspeicherkraftwerke

Für Pumpspeicherkraftwerke stehen nach intensiver Recherche keine Daten zur Verfügung, daher wird eine Ähnlichkeit des Materialbedarfs mit Speicherwasserkraftwerken angenommen. Dabei hängt insbesondere der Bedarf an Metallen von der technischen Realisierung der Anlage ab. Bei Verwendung von Francis Turbinen mit Synchrongenerator kann von einem ähnlichen spezifischen Materialbedarf an Stahl und Kupfer ausgegangen werden. Demgegenüber ist zu erwarten dass bei Kaplan Turbinen ein zusätzlicher Materialbedarf für die separate Pumpe und Motor anfällt. Der Materialbedarf für die Speicherkapazität ist ebenfalls stark standortabhängig und schwer einschätzbar. Daher wird im Rahmen dieser Studie die Speicherkapazität von 12 MWh/MW als bereits gegeben angenommen, sodass für die Pumpspeicherkraftwerke nur der leistungsspezifische Materialbedarf anfällt. Dabei werden die technologiespezifischen Materialbedarfswerte für die Speicherwasserkraftwerke aus Kapitel 3.4.2 übernommen.

3.4.2 Speicherwasserkraft

Für die Werte der Speicherwasserkraftwerke in **Tabelle 3-13** wird auf die Studien von Pacca und Horvath (2002), Rule et al. (2009) sowie Flury und Frischknecht (2012) zurückgegriffen. Dabei ergibt sich für die Speicherwasserkraft ebenso wie bei den Lauf- und Pumpspeicherwasserkraftwerken eine starke Abhängigkeit vom Standort der Anlage, insbesondere vom Querschnitt des Flusses und der Fallhöhe bzw. des Turbinentyps. Diese Unsicherheiten drücken sich auch in den unterschiedlichen Reihenfolgen des Materialbedarfs aus. Die von Pacca und Horvath (2002) untersuchte Anlage besitzt den geringsten Bedarf an Stahl während die von Rule et al. (2009) betrachtete Anlage den geringsten Bedarf an Beton aufweist. Die Werte für den Kupferbedarf nach Pacca und Horvath (2002) erscheinen als deutlich zu niedrig abgeschätzt, so dass sich ein realistischer Materialbedarf zwischen den Anlagen von Rule et al. (2009) und Flury und Frischknecht (2012) finden dürfte. Anhand der Daten lässt sich jedoch nicht abschätzen ob es sich bei den Unterschieden um Skaleneffekte, Standorteffekte oder Unterschiede in den Technologien handelt. Für die Materialmatrix werden die Werte nach Flury und Frischknecht (2012) verwendet um konsistent zu den Werten der Laufwasseranlagen zu bleiben.

Die technische Lebenszeit der Studien bezieht sich in der Regel auf den Damm, sodass alle anderen Komponenten die eine geringere Lebensdauer aufweisen ein oder mehrmalig ersetzt werden. Während die Lebensdauer für die Gebäude bei 50 bis 80 Jahren liegt muss die Mehrheit der mechanischen Komponenten nach maximal 50 Jahren ausgetauscht werden. Dies ist in der Modellierung der gebundenen Materialsommen nicht berücksichtigt, sodass die Materialsommen der Erstinstallation für die gesamte Lebensdauer beibehalten werden.

Tabelle 3-13: Literaturwerte für den spezifischen Materialbedarf für Speicherwasserkraftwerke

Quelle	Pacca 2002	Rule 2009	Flury 2012
Bezeichnung			Stauwasser
Leistung [MW]	1296	432	95
Lebensdauer [a]	100	100	150
Kap. Faktor [%]	50,0	50,0	22,8
Beton [t/MW]	7644,00	6680,00	11026,30
Stahl [t/MW]	24,80	54,50	80,32
Aluminium [t/MW]	0,05		
Kupfer [t/MW]	0,07	1,50	3,12
Gesamt [t/MW]	7668,92	6736,00	11109,74
CMR GEMIS [t/MW]	15037,00	15037,00	15037,00

3.4.3 Wasserstoffspeicher

Für die Einschätzung des Materialbedarfs des Brennstoffzellenstacks werden die Werte aus der Studie von Handley et al. (2002) verwendet, dargestellt in **Tabelle 3-14**. Darin wird ein Brennstoffzellenstack mit einer Leistung von 70 kW betrachtet, jedoch werden keine Werte für den Materialbedarf des Wasserstoffspeichers angegeben. Diese werden aus der gravimetrischen Energiedichte für verschiedene Wasserstoffspeichersysteme in der Studie StorHy (Strubel 2008) abgeschätzt. Als Referenz dient hierbei der Speicher für komprimierten Wasserstoff 700 bar unter der eigenen Annahme der Aufteilung Gewichtsverhältnisses in 75 % Kohlenstofffaser, 15 % Kunststoff, 10 % Stahl. Für größere Wasserstoffspeicherung in Kavernen liegen keine Daten vor. Je nach Anwendungsfeld kann der Materialbedarf für das Gesamtsystem noch deutlich größer ausfallen, wenn zudem für eine stationäre Anwendung Wechselrichter und Gleichrichter notwendig werden. Zudem kann die Elektrolyse nicht direkt an der PEM-Membran erfolgen, sodass für den Elektrolyseur ein zusätzlicher Materialbedarf anfällt.

Tabelle 3-14: Literaturwerte für den spezifischen Materialbedarf für Brennstoffzellenstacks und Speicher für komprimierten Wasserstoff

Quelle	Handley 2002	StoreHy Report
Bezeichnung	Brennstoffzellenstack	Komprimierter Wasserstoffspeicher
Leistung, Kapazität	70,00 kW	kWh
Lebensdauer [a]		
Stahl [t/MW], [t/MWh]	0,03	0,12
Aluminium [t/MW]	0,06	
Kunststoffe [t/MW], [t/MWh]	0,23	0,18
Graphit [t/MW], [t/MWh]	0,60	0,90
Nafion [t/MW]	0,081	
Platin [t/MW]	0,001	
Ruthenium [kg/MW]	0,143	
Gesamt [t/MW], [t/MWh]	1,00	1,20

3.4.4 Druckluftspeicher

Für die Speicherung elektrischer Energie werden im Rahmen der Studie adiabate Druckluftspeicher ohne nachgeschaltete Gasturbine betrachtet. Da zum Zeitpunkt der Arbeit sich nur 2 Anlagen dieses Typs im Betrieb befinden muss die Abschätzung des vollständigen Materialbedarfs in erster Linie anhand von Expertenaussagen und dem Vergleich mit geothermischen Anlagen für die Speicherkapazität, sowie Gasturbinen für die Berücksichtigung der Anlagenkomponenten erfolgen. Die Werte des Materialbedarfs sind dabei den Kapiteln 3.1.2 und 3.2.3 entnommen und in **Tabelle 3-15** dargestellt. Die Gegenüberstellung mit den Werten der SET Studie (JRC 2011) zeigt eine gute

Übereinstimmung hinsichtlich des Stahlbedarfs. Erwartungsgemäß fällt der Kupferbedarf größer aus, aufgrund der aufwendigeren elektrischen Komponenten die neben dem Generator den Kompressor und die zugehörige Anlagentechnik beinhaltet. Analog zur Geothermie ist der Materialbedarf für die Erschließung der Kaverne stark standortabhängig. Als Näherung der Anlagen- und Kavernenkomponenten werden daher die Werte der geothermischen Anlage verwendet. Dies geschieht unter Berücksichtigung der SET Werte für den Bedarf an Kupfer und Aluminium (JRC 2011). Für die Speicherkapazität werden die SET Werte verwendet und um die Angaben nach Zunft (2014) um den Materialbedarf von 15 t/MWh ergänzt. Hierbei wird angenommen, dass 10 t/MWh auf das keramische Speicherinventar, und 5 t/MWh auf das Speichergebäude auf Stahlbeton entfallen.

Tabelle 3-15: Literaturwerte für den spezifischen Materialbedarf für Druckluftspeicher und vergleichbare Anlagentypen

Quelle	ANL 2010	Pacca 2002	JRC 2011	JRC 2011
Bezeichnung	Geothermie Flash	Gasturbine	Druckluftspeicher	Druckluftspeicher
Leistung, Kapazität	48,4 MW	875 MW	2,0 MW	20,0 MWh
Lebensdauer [a]	30	30		
Kap. Faktor [%]	95,0	72,4		
Beton [t/MW]	236,00	81,40		
Zement [t/MW]	232,00			
Stahl [t/MW], [t/MWh]	297,02	58,50	320,00	32,00
Aluminium [t/MW], [t/MWh]		0,26	2,50	0,25
Kupfer [t/MW], [t/MWh]		1,30	5,00	0,50
Gesamt [t/MW], [t/MWh]	765,02	141,46	327,50	32,75
CMR GEMIS [t/MW]	2790,00	558,00		

3.4.5 Lithium-Ionen Batterien

Für den Materialbedarf von Lithium-Ionen Batterien, aufgeführt in **Tabelle 3-16**, werden die Werte aus der Studie von Gaines et al. (2011) verwendet, in der verschiedene technische Ausführungen für die Anwendung in der Elektromobilität untersucht werden. Dabei handelt es sich kathodenseitig um Lithium-Nickel-Kobalt-Aluminiumoxid (NCA), Lithium-Eisen-Phosphat (LFP) sowie Lithium-Manganoxid (LMO) und anodenseitig um Graphit und Lithiumtitanat (TiO).

Generell beläuft sich der Bedarf an Lithium in der Studie zwischen 147 kg/MWh und 495 kg/MWh. Die Werte liegen im Vergleich zu der SET Studie (JRC 2011) mit einem Bereich von 113 kg/MWh bis 423 kg/MWh in einem realistischen Rahmen. Die Studie von Angerer et al. (2009) setzt mit einem Bereich von 180 kg/MWh für Lithium-Kobaltoxid Batterien und 120 kg/MWh für Lithium-Eisenphosphat Batterien ähnlich große Werte an.

Tabelle 3-16: Literaturwerte für den spezifischen Materialbedarf für Lithium-Ionen Batterien

Quelle Bezeichnung	Gaines 2011 NCA-Graphite	Gaines 2011 LFP-Graphite	Gaines 2011 LMO-Graphite	Gaines 2011 LMO-TiO
Kapazität [kWh]	6,0	6,0	6,0	6,0
Lebensdauer [a]				
Eisen [t/MWh]		1,06		
Aluminium [t/MWh]	2,77	3,09	2,26	3,98
Kunststoffe [t/MWh]	0,53	0,63	0,47	0,64
Kupfer [t/MWh]	1,68	1,88	1,41	0,46
Graphit [t/MWh]	2,39	2,37	1,94	0,80
Lithium [t/MWh]	0,240	0,150	0,147	0,495
Nickel [t/MWh]	1,530			
Cobalt [t/MWh]	0,292			
Mangan [t/MWh]			1,117	2,195
Titan [t/MWh]				1,733
Gesamt [t/MWh]	9,44	9,17	7,35	10,30

Im Rahmen der Arbeit werden für die Materialmatrix die Werte der Lithium-Eisen-Phosphat Batterien verwendet um die Materialien Kobalt und Mangan zu vermeiden. Zukünftig werden für die weitere Entwicklung große Potentiale insbesondere bei Lithium-Schwefel und Lithium-Luft Batterien gesehen. Langfristig ist auch davon auszugehen, dass ein großer Anteil der Lithium-Batterien für Elektrofahrzeuge nach Unterschreitung von 80 % nutzbarer Kapazität oder nach Verdopplung des Innenwiderstandes anschließend für stationäre Energiespeicherung eingesetzt wird (Wagner 2014). Auch für die Lithium-Ionen Batterien muss berücksichtigt werden, dass je nach Systemkonfiguration zusätzlich Wechsel- sowie Gleichrichter notwendig werden. Diese können jedoch in einem dezentralen Stromerzeugungssystem auch in Kombination mit Photovoltaikanlagen genutzt werden, sodass kein zusätzlicher Wechselrichter benötigt wird.

3.4.6 Vanadium Redox-Flussbatterien

Werte für den spezifischen Materialbedarf von Vanadium Redox-Flussbatterien finden sich in einem Life Cycle Assessment von Rydh (1999). Aufgrund fehlender weiterer Studien können hier keine Vergleiche gezogen werden. Auch wird in der Studie nur der Materialbedarf für den eigentlichen Speicher aufgeführt, sodass unter Berücksichtigung der weiteren Systemkomponenten der Bedarf deutlich höher ausfallen kann. Analog zu den Lithium-Ionen Batterien ergibt sich hier auch die Problematik, dass im Rahmen einer dezentralen Stromerzeugung elektrische Energiespeicher und Erzeugungsanlagen denselben Wechselrichter nutzen können. Anderenfalls fällt ein zusätzlicher Bedarf für Wechsel- und Gleichrichter an.

Tabelle 3-17 zeigt den spezifischen Materialbedarf für den Redox-Flussbatterie-Stack und die Speichertanks für die Elektrolytlösung. Bei dem Bedarf an Vanadium handelt es sich um die Masse an reinem Vanadium. Die für die Elektrolytlösung notwendigen Mengen an Wasser und Schwefelsäure werden hierbei nicht betrachtet.

Tabelle 3-17: Literaturwerte für den spezifischen Materialbedarf für Vandium Redox-Flussbatteriestacks und Elektrolytspeicher

Quelle	Rydh 1998	Rydh 1998
Bezeichnung	Stack	Speicher
Kapazität [kWh]	50 kW	450 kWh
Lebensdauer [a]		
Stahl [t/MW], [t/MWh]	5,03	
Kunststoffe [t/MW], [t/MWh]	0,66	1,33
Kupfer [t/MW], [t/MWh]	0,37	
Graphit [t/MW], [t/MWh]	0,12	
Membran [t/MW], [t/MWh]	0,208	
Vanadium [t/MW], [t/MWh]		2,943
Gesamt [t/MW], [t/MWh]	6,38	4,28

3.5 Materialmatrix

Für die Anwendung zur Abschätzung des gesamten Materialbedarfs werden aus den vorherigen Kapiteln die gewählten Literaturwerte in einer Materialmatrix zusammengefasst. Aus Gründen der Übersichtlichkeit ist diese der Studie in Anhang B: Materialmatrix auf Seite 69 angehängt. Die Änderungen gegenüber den Literaturwerten sind im Rahmen der jeweiligen Technologien in den Kapiteln 3.1 bis 3.4 aufgeführt.

Weiterführende technologiebezogene Ansätze

Aufgrund der sehr unsicheren Datensituation, insbesondere bei den elektrischen Energiespeichern werden im Folgenden Analogien zum klassischen Life Cycle Assessment und Ansätze zur Verbesserung der technologiespezifischen Werte aufgezeigt.

- **Hierarchisches Komponentenmodell:** Um detailliertere Informationen für Anlagen zu ermitteln, können die Technologien ähnlich wie in der Photovoltaik in Komponenten aufgeteilt werden. Dadurch lassen sich Entwicklungen auf Komponentenebene und deren Auswirkung auf den spezifischen Materialbedarf untersuchen. **Abbildung 3-1** zeigt ein Beispiel anhand der Photovoltaik. Dabei können dynamische Änderungen im System wie eine mögliche Substitution der Silberleiter auf der Zelloberfläche durch eine Kupfernickellegierung ab dem Jahr 2040 oder eine Verschiebung von Marktanteilen besser berücksichtigt werden.

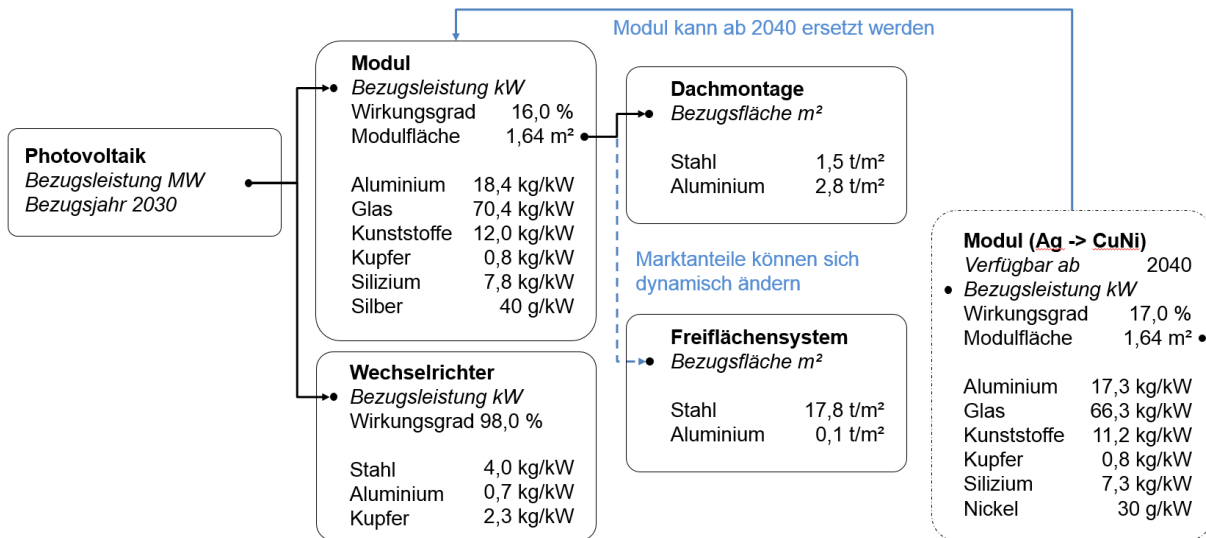


Abbildung 3-1: Schema eines hierarchischen Komponentenmodells für Photovoltaik

Neben abrupten Änderungen wie der Verfügbarkeit von technischen Entwicklungen können auch graduelle Änderungen über funktionelle Zusammenhänge wie beispielsweise Lernraten implementiert werden.

- **Ermittlung der Trade-offs zur Einschätzung der langfristigen Marktanteile:** Untersuchung der derzeitigen und langfristigen Trade-offs zwischen den Technologien die versorgungskritische Materialien einsetzen und Technologien in denen diese vermieden werden. So kann beispielsweise für Offshore-Windenergieanlagen der Einsatz von Neodym-Eisen-Bor Magneten in der Direct-Drive Technologie durch den Wegfall des Getriebes zu geringeren Wartungskosten für die Anlage führen. Daraus lässt sich der Grenzpreis ermitteln bis zu dem ein Einsatz der Permanentmagneten wirtschaftlicher ist.
- **Berücksichtigung von Roadmaps für Technologien:** Um den kurz bis mittelfristigen spezifischen Materialbedarf für Technologien besser einschätzen zu können empfiehlt es sich auf technologiespezifische Entwicklungspfade zurückzugreifen und diese ebenfalls in der Materialbedarfsmodellierung zu hinterlegen (Viebahn et al. 2008).

4 Auswertung

4.1 Szenarienanalyse

Um ausgehend von dem spezifischen Materialbedarf der Technologien auf die gesamte durch das Stromerzeugungssystem gebundene Materialsommen schließen zu können werden Szenarienpfade zu den in Deutschland installierten Leistungen benötigt. Im Rahmen dieser Arbeit werden die Szenarien nach Trieb und Hess (2013) verwendet. Die Szenarien decken die Jahre 2010, 2020, 2022, 2030, 2050 und 2070 ab. Davon werden die Jahre 2030, 2050 und 2070 betrachtet um langfristige Effekte des Materialbedarfs für das Stromerzeugungssystem analysieren zu können. Die installierten Leistungen für die beiden Szenarien zu den betrachteten Jahren sind in **Tabelle 4-1** beziehungsweise **Tabelle 4-2** aufgelistet.

Tabelle 4-1: Installierte Leistungen für Szenario 1 in den Jahren 2030, 2050 und 2070

Jahr	2030	2050	2070
Photovoltaik [MW]	50.000	90.000	174.000
Wind Onshore [MW]	47.500	45.000	70.000
Wind Offshore [MW]	13.800	65.000	90.000
Laufwasserkraft [MW]	5.000	5.000	5.000
Biomasseabfälle, Müll [MW]	2.000	2.000	2.000
Holz, Energiepflanzen, Biogas [MW]	7.000	7.000	7.000
Geothermie [MW]	1.000	1.000	1.000
Import Speicherwasserkraft [MW]	2.000	2.000	2.000
Import regelbarer Solarstrom [MW]	0	0	0
Gasturbinenkraftwerke [MW]	42.000	118.000	132.300
Steinkohlekraftwerke [MW]	15.000	0	0
GuD und BHKW [MW]	38.000	0	0
Kernkraftwerke [MW]	0	0	0
Braunkohlekraftwerke [MW]	5.000	0	0
Pumpspeicher [MW]	7.500	15.000	15.000
Pumpspeicher [MWh]	90.000	180.000	180.000
Wasserstoffspeicher [MW]	1.000	15.000	40.000
Wasserstoffspeicher [MWh]	72.000	1.080.000	2.880.000
Druckluftspeicher [MW]	0	5.000	12.000
Druckluftspeicher [MWh]	0	60.000	144.000
Lithium-Ionen-Batterie [MW]	0	5.000	5.000
Lithium-Ionen-Batterie [MWh]	0	40.000	40.000
Vanadium-Redox-Flussbatterie [MW]	0	5.000	12.000
Vanadium-Redox-Flussbatterie [MWh]	0	40.000	96.000

Tabelle 4-2: Installierte Leistungen für Szenario 2 in den Jahren 2030, 2050 und 2070

Jahr	2030	2050	2070
Photovoltaik [MW]	38.000	52.000	52.000
Wind Onshore [MW]	37.000	35.000	32.000
Wind Offshore [MW]	10.000	30.000	37.000
Laufwasserkraft [MW]	5.000	5.000	5.000
Biomasseabfälle, Müll [MW]	1.500	1.500	5.000
Holz, Energiepflanzen, Biogas [MW]	6.600	6.600	8.000
Geothermie [MW]	1.000	1.000	3.000
Import Speicherwasserkraft [MW]	2.000	2.000	5.000
Import regelbarer Solarstrom [MW]	7.500	25.000	30.000
Gasturbinenkraftwerke [MW]	42.000	90.000	93.000
Steinkohlekraftwerke [MW]	15.000	0	0
GuD und BHKW [MW]	38.000	15.000	0
Kernkraftwerke [MW]	0	0	0
Braunkohlekraftwerke [MW]	5.000	0	0
Pumpspeicher [MW]	7.500	7.500	7.500
Pumpspeicher [MWh]	90.000	90.000	90.000
Wasserstoffspeicher [MW]	200	200	200
Wasserstoffspeicher [MWh]	14.400	14.400	14.400
Druckluftspeicher [MW]	0	0	100
Druckluftspeicher [MWh]	0	0	1.200
Lithium-Ionen-Batterie [MW]	0	0	200
Lithium-Ionen-Batterie [MWh]	0	0	1.600
Vanadium-Redox-Flussbatterie [MW]	0	0	100
Vanadium-Redox-Flussbatterie [MWh]	0	0	800

Um eine Einschätzung des Einsatzes von Spezialmaterialien vornehmen zu können ist es erforderlich Marktanteile für die Technologien der Dünnschichtphotovoltaik sowie den Anteil an Windenergieanlagen mit Neodym-Eisen-Bor Magneten festzulegen. Die Marktanteile beziehen sich dabei auf die installierten Leistungen für Photovoltaik und Windenergie Onshore sowie Offshore in **Tabelle 4-1** beziehungsweise **Tabelle 4-2**. Der Szenariopfad von Szenariovariation a in **Tabelle 4-3** für die Szenarien 1a und 2a sieht dabei eine Steigerung der Marktanteile von Dünnschichtphotovoltaik und den verstärkten Einsatz von getriebelosen Generatoren insbesondere in der Offshorewindenergie vor. Demgegenüber wird in der Szenariovariation b in **Tabelle 4-4** eine schrittweise Reduktion der Marktanteile von Dünnschichtphotovoltaik und getriebelosen Generatoren angenommen.

Tabelle 4-3: Angenommene Entwicklung der Marktanteile für Szenariovariation a

	2012	2020	2030	2050	2070
Photovoltaik					
c-Silizium	87,5 %	83,0 %	74,0 %	65,0 %	60,0 %
CIGS	7,5 %	10,0 %	15,0 %	20,0 %	22,5 %
CdTe	5,0 %	7,0 %	11,0 %	15,0 %	17,5 %
Windenergie Onshore					
Generatoren mit Getriebe	90,0 %	87,5 %	85,0 %	82,5 %	80,0 %
Direct Drive Generatoren	10,0 %	12,5 %	15,0 %	17,5 %	20,0 %
Windenergie Offshore					
Generatoren mit Getriebe	90,0 %	85,0 %	72,5 %	60,0 %	50,0 %
Direct Drive Generatoren	10,0 %	15,0 %	27,5 %	40,0 %	50,0 %

Tabelle 4-4: Angenommene Entwicklung der Marktanteile für Szenariovariation b

	2012	2020	2030	2050	2070
Photovoltaik					
c-Silizium	87,5 %	88,5 %	91,0 %	100,0 %	100,0 %
CIGS	7,5 %	6,5 %	5,0 %	0,0 %	0,0 %
CdTe	5,0 %	5,0 %	4,0 %	0,0 %	0,0 %
Windenergie Onshore					
Generatoren mit Getriebe	90,0 %	92,0 %	95,0 %	97,0 %	100,0 %
Direct Drive Generatoren	10,0 %	8,0 %	5,0 %	3,0 %	0,0 %
Windenergie Offshore					
Generatoren mit Getriebe	80,0 %	85,0 %	92,0 %	99,0 %	100,0 %
Direct Drive Generatoren	20,0 %	15,0 %	8,0 %	1,0 %	0,0 %

Daraus ergeben sich die in **Abbildung 4-1** dargestellten installierten Leistungen. Für Szenario 1 zeigt sich eine kontinuierliche Steigerung der installierten Leistung, während bei Szenario 2 im Jahr 2050 eine Sättigung eintritt. Die unterschiedliche Entwicklung der Leistung in **Abbildung 4-1** ist auf die einzuhaltenden Randbedingungen der Versorgungssicherheit und den Anteilen erneuerbarer Energien am Bruttostromverbrauch zurückzuführen.

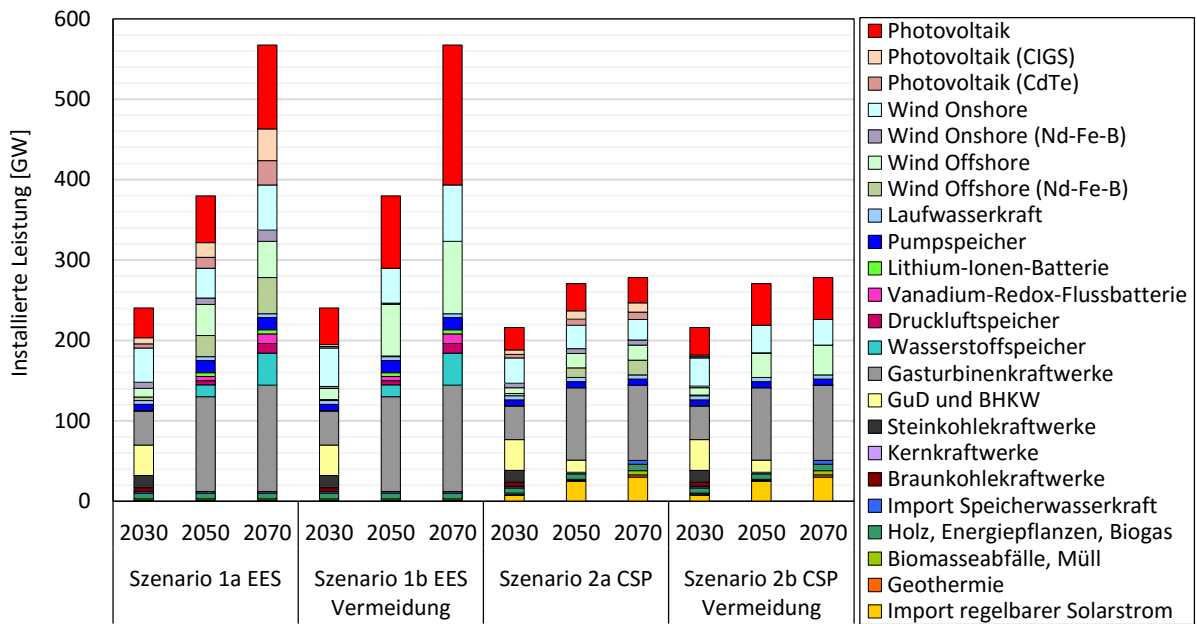


Abbildung 4-1: Installierte Leistung in den Jahren 2030, 2050 und 2070 für die betrachteten Szenarien 1 und 2

Für die erzeugte elektrische Energie in **Abbildung 4-2** ergibt sich ein ähnlicher Verlauf. In Szenario 1 kommt es aufgrund der Wandlungsverluste in den elektrischen Energiespeichern zu einer kontinuierlichen Steigerung der erzeugten elektrischen Energie. Demgegenüber kann in Szenario 2 durch die verstärkte Nutzung von regelbaren erneuerbaren Energien die angenommene elektrische Last von 700 TWh ohne große Überschüsse gedeckt werden.

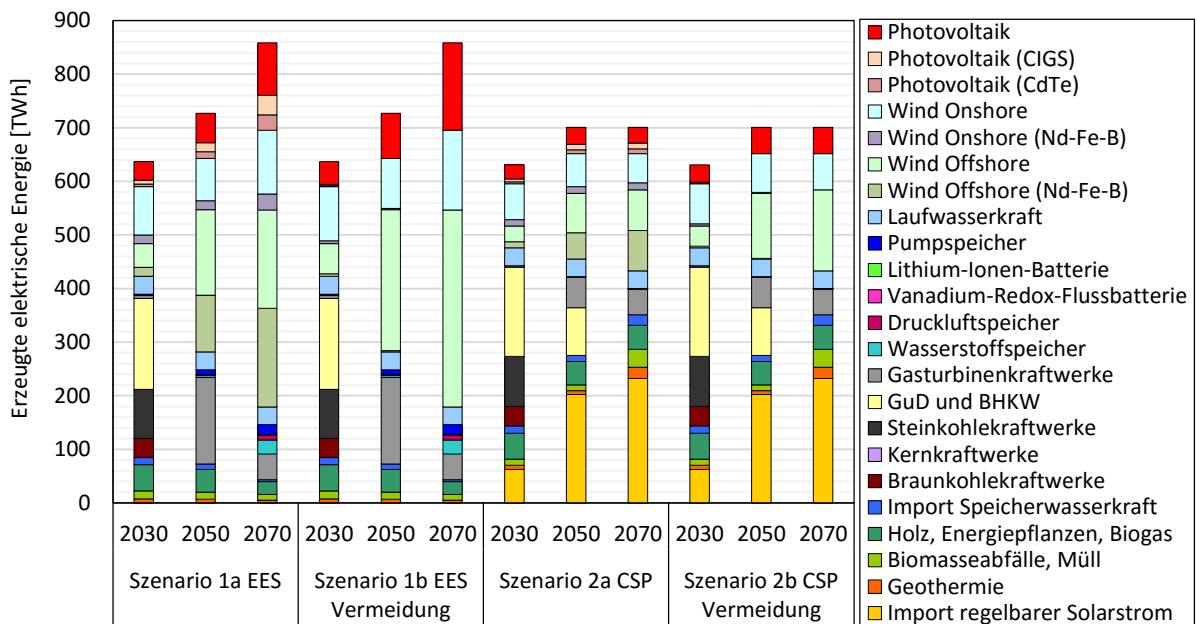


Abbildung 4-2: Erzeugte elektrische Energie in den Jahren 2030, 2050 und 2070 für die betrachteten Szenarien 1 und 2

4.2 Materialsummenanalyse

Für die Materialsummenanalyse wird im Folgenden der Materialbedarf für die drei Kategorien Mengenmaterialien, Technologiemaaterialien sowie Spezialmaterialien im Detail betrachtet. Dabei lassen sich die Materialgruppen Gallium, Indium und Selen sowie Neodym und Dysprosium durch jeweils ein Material der Gruppe, im Folgenden Indium und Neodym, beschreiben, da im Rahmen der Studie keine andere Technologie diese Materialien ebenfalls beansprucht. Die Diagramme für Gallium, Selen, Dysprosium sowie weiterer nicht den Materialgruppen zugeordnete Stoffe sind in Diagramme Materialsummenanalyse auf Seite 73 dargestellt.

4.2.1 Mengenmaterialien

Beton und Zement

Für den Gesamtbedarf an Beton und Zement in **Abbildung 4-3** werden die größten Anteile durch die Wasserkrafttechnologien Pumpspeicher, Laufwasserkraft sowie Speicherwasserkraft beansprucht. Darauf folgt die Onshorewindenergie und solarthermischen Kraftwerke. Die Unterschiede zwischen den Szenarien 1 und 2 fallen durch die begrenzten Speicherpotentiale für Pumpspeicherkraftwerke relativ gering aus.

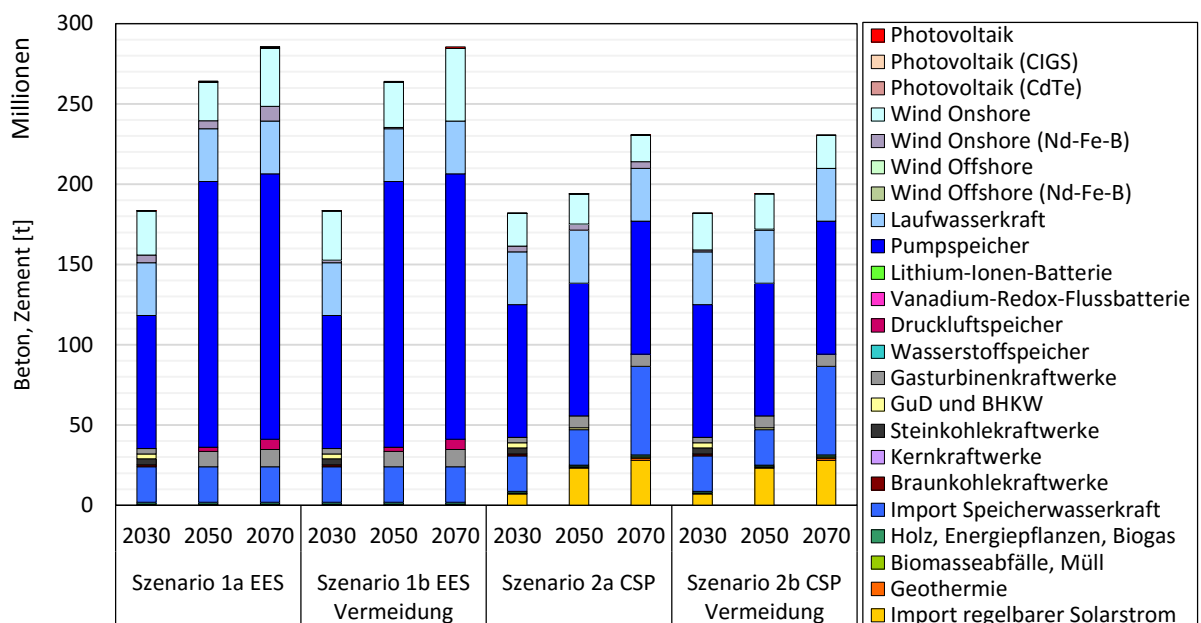


Abbildung 4-3: Gesamte Materialsumme an Beton und Zement für die Szenarien 1 und 2

Der deutlichste Unterschied ergibt sich zum Jahr 2030 wenn für das Szenario 1 bereits große Speicherkapazitäten notwendig werden, während in Szenario 2 der verstärkte Import von Speicherwasserkraft erst im Jahr 2070 anfällt. Zwischen den Szenariovariationen a und b ergeben sich keine Unterschiede im Beton- und Zementbedarfs.

Stahl und Eisen

Für Stahl und Eisen ergibt sich analog zu dem Betonbedarf kein Unterschied zwischen den Szenariovariationen a und b, dafür ein etwas deutlicher Unterschied im Verlauf zwischen den Szenarien 1 und 2 in **Abbildung 4-4**. Für die Jahre 2030 und 2050 ergeben sich hinsichtlich des Gesamtbedarfs sehr ähnliche Werte, während im Jahr 2070 der Gesamtbedarf im Szenario 1 um etwa 20 % größer ist als der in Szenario 2. In Szenario 1 entfällt der größte Anteil des Bedarfs auf die Windenergieanlagen, gefolgt von Gasturbinenkraftwerken und Druckluftspeichern. Demgegenüber beanspruchen in Szenario 2 die solarthermischen Kraftwerke den größten Anteil, gefolgt von Windenergieanlagen und Gasturbinenkraftwerken. Die Jahresproduktion an Stahl in Deutschland lag nach BGR (2013) im Jahr 2012 bei 42,7 Mio. t, bei einem Recyclinganteil von 46 %. Der Primärmaterialinput in Form von Erzen wurde von Deutschland vollständig importiert.

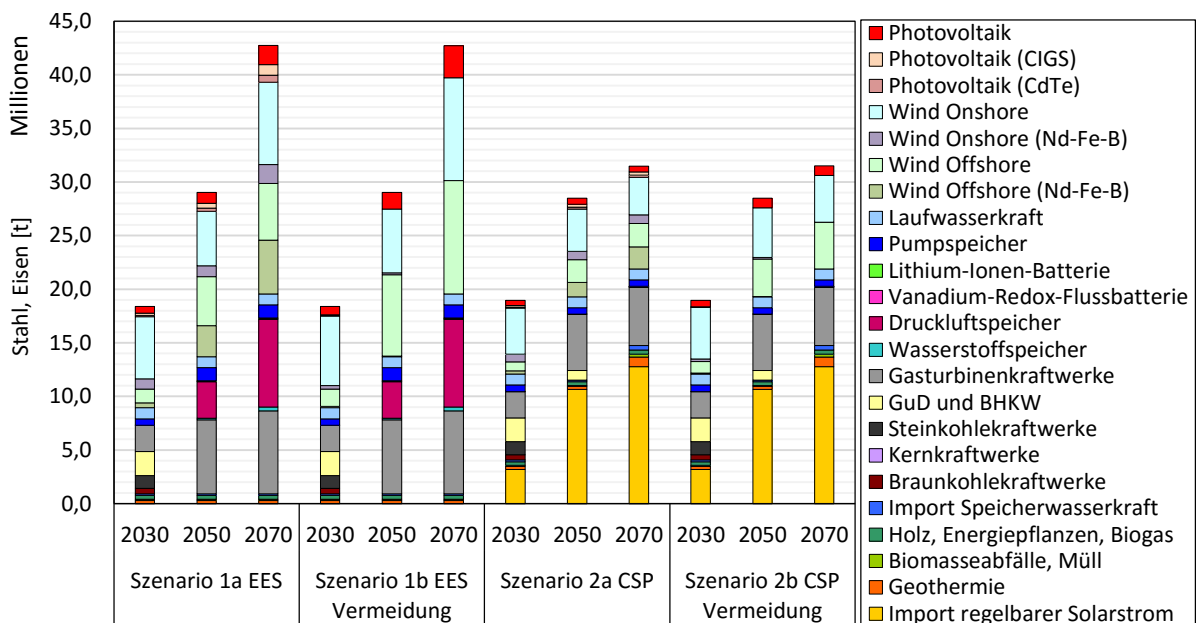


Abbildung 4-4: Gesamte Materialsumme an Stahl und Eisen für die Szenarien 1 und 2

Aluminium

Größter Einflussfaktor auf den Gesamtbedarf an Aluminium, dargestellt in **Abbildung 4-5**, sind die Photovoltaiktechnologien aufgrund des hohen Bedarfs für die Rahmen und Aufständungen der Freiflächen und Dachanlagen. Aufgrund der höheren Wirkungsgrade der monokristallinen Siliziumphotovoltaik fällt der Materialbedarf im Vermeidungsszenario geringfügig niedriger aus. Der Gesamtbedarf an Aluminium liegt bei den Szenarien mit Import von regelbarem Solarstrom um den Faktor 3 niedriger. Auch zeigt sich bereits ab dem Jahr 2050 kein weiterer Anstieg in der gebundenen Materialsumme. Für Deutschland lag die Aluminiumproduktion im Jahr 2012 bei rund 976,9 Tsd. t mit einem Produktionsanteil von Aluminium aus Sekundärmaterial von 65 % (BGR 2013).

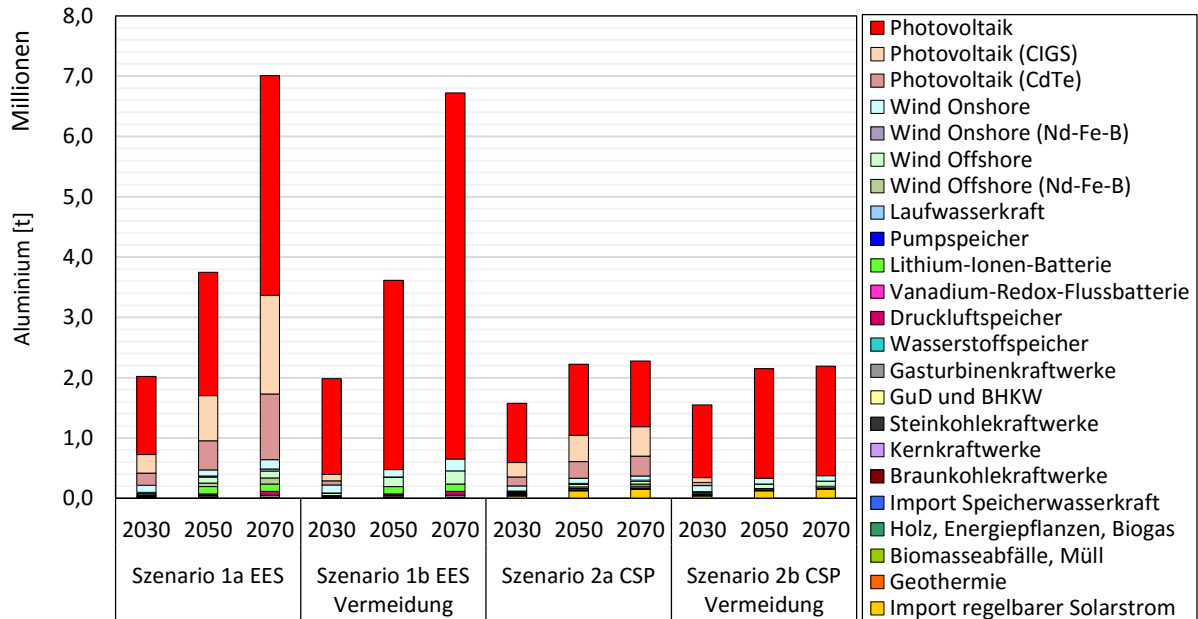


Abbildung 4-5: Gesamte Materialsumme an Aluminium für die Szenarien 1 und 2

Glas

Erwartungsgemäß wird der Bedarf an Glas des Stromerzeugungssystems durch die Solartechnologien Photovoltaik und Solarthermie verursacht. **Abbildung 4-6** zeigt die gebundenen Materialsummen für die betrachteten Szenarien.

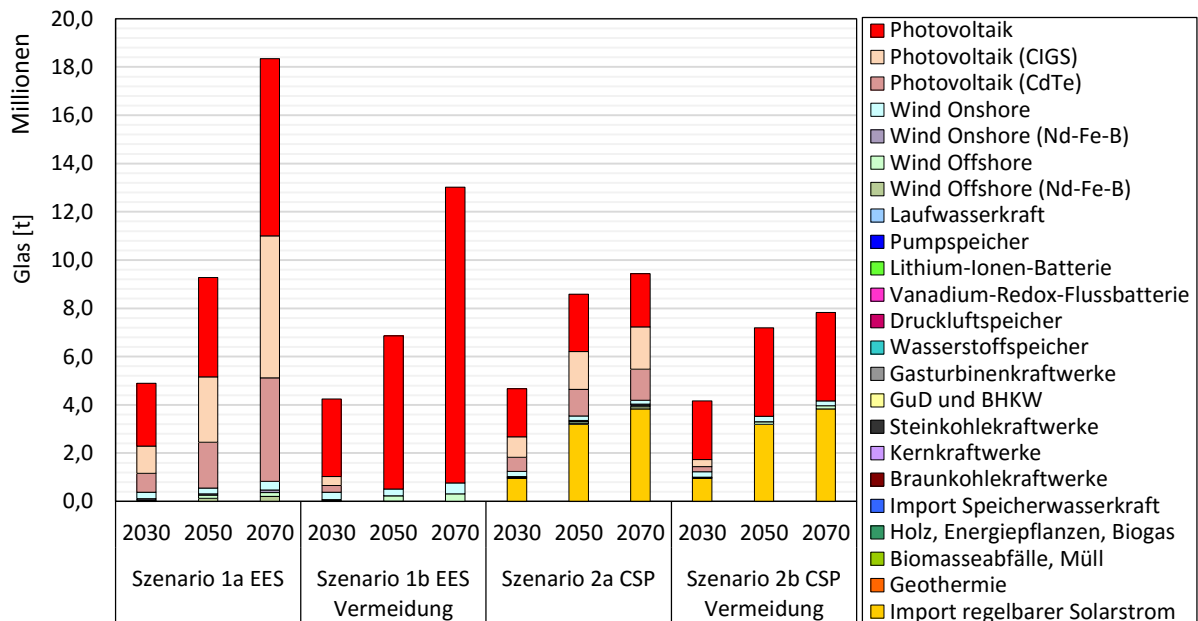


Abbildung 4-6: Gesamte Materialsumme an Glas für die Szenarien 1 und 2

Der 35 % größere Bedarf an Glas in Szenario 1a im Vergleich zu Szenario 1b ergibt sich durch den hohen Anteil an Dünnschichtphotovoltaik. Hierbei fällt durch das Glas als Substrat und

Abdeckung ein deutlich höherer Glasbedarf an als bei den kristallinen Photovoltaiktechnologien, in denen das Glas nur für die Abdeckung genutzt wird. Für Szenarien 2b ergibt sich ein ähnlich großer Materialbedarf für Photovoltaikanlagen und Solarthermie, wobei die Gesamtsumme etwa 43 % kleiner ist als die des vergleichbaren Szenario 1b.

4.2.2 Technologiematerialien

Kupfer

Der Bedarf an Kupfer, dargestellt in **Abbildung 4-7**, wird in erster Line ebenfalls durch die Solartechnologien Photovoltaik und Solarthermie verursacht. Dabei fällt in Szenario 2b analog zum Glasbedarf die gleiche Materialsumme für Photovoltaik und die Anlagen und HVDC Leitungen für den regelbaren solarthermischen Strom an. Im Vergleich zu Szenario 1a ergeben sich Einsparungen von 45 %. Der tatsächlich auftretende Bedarf an Kupfer hängt jedoch stark von der Leitungslänge und dem Verhältnis zwischen Freileitung und Erd- bzw. Seekabeln ab. Darüber verursacht der innerdeutsche Leitungszubau ebenfalls einen erheblichen Materialbedarf, was im Rahmen der Studie nicht berücksichtigt wird.

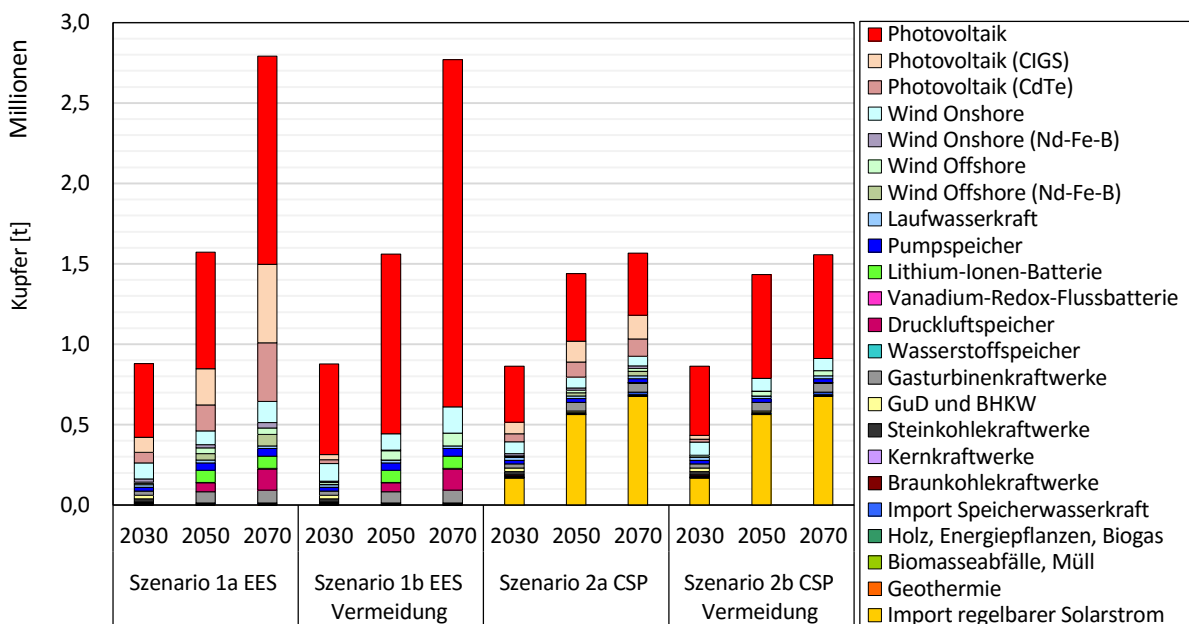


Abbildung 4-7: Gesamte Materialsumme an Kupfer für die Szenarien 1 und 2

Nach Lifton (2011) führt insbesondere die Elektrifizierung von Schwellenländern zu einem starken Anstieg der weltweiten Kupfernachfrage. Die hier angegebenen Werte bei den elektrischen Energiespeichern sind als sehr optimistisch einzuschätzen, da der tatsächliche Materialbedarf aufgrund des Bedarfs für Gleich- und Wechselrichter deutlich höher ausfallen wird. Zudem wird durch Elektromotoren und Generatoren in der Elektromobilität und Industrie ein großer zusätzlicher Bedarf erwartet, was zu Nachfragekonflikten führen kann (Angerer et al. 2009). Nach USGS (2014) lag 2013 die weltweite Jahresproduktion an Kupfer bei 17,9 Mio. t bei nachgewiesenen Reserven von 690 Mio. t,

von denen sich 30 % in Chile befinden. Nachgewiesene Reserven in Europa befinden sich in erster Linie in Polen (EU 2014c). Neben Polen verteilt sich die Produktion von Kupfer in Europa auf Portugal, Schweden, Spanien sowie Finnland. Die innereuropäische Produktion im Jahr 2010 belief sich dabei auf 764 Tsd. t (Reichl et al. 2014) gegenüber dem europäischen Kupferimport für das Jahr 2010 von 1 Mio. t (EU 2014c). Bei einer geschätzten Lebensdauer von 25 Jahren für Photovoltaikanlagen fallen in Szenario 1 fallen für das deutsche Energieversorgungssystem im Jahre ein jährlicher Kupferinput von etwa 86,4 Tsd. t an. Hier ist in beiden Szenarien mit einem großen Potential für Recycling zu rechnen, das derzeit bei 45 % liegt. (EU 2014c). Möglichkeiten zur Substitution von Kupfer durch Aluminium ergeben sich vor allem im Bereich der elektrischen Leitungen (Angerer et al. 2009).

Blei

Der Materialbedarf an Blei ergibt sich in erster Linie aus den Erd- und Seekabeln zur Übertragung elektrischer Energie. **Abbildung 4-8** zeigt die für die Szenarien benötigten Materialsummen für die betrachteten Jahre. Für Szenario 2 ergeben sich gegenüber Szenario 1 Einsparungen in Höhe von 18 %, dabei ist der Bedarf an Blei unabhängig von den betrachteten Szenariovariationen a und b. Durch den Zusammenhang zwischen Materialbedarf und den installierten Leistungen von Offshorewindenergie sowie Solarthermie ergibt sich insbesondere zwischen den Jahren 2030 und 2050 ein hoher Anstieg der durch das deutsche Stromerzeugungssystem gebundenen Materialsumme. Dabei muss angemerkt werden, dass der Materialbedarf für innerdeutsche Netze nicht berücksichtigt ist. Insbesondere Bürgerproteste können dazu führen, dass in Stromtrassen große Abschnitte durch Erdkabel realisiert werden, welche, abhängig von der technischen Ausführung, ebenfalls Blei zur Abschirmung enthalten können.

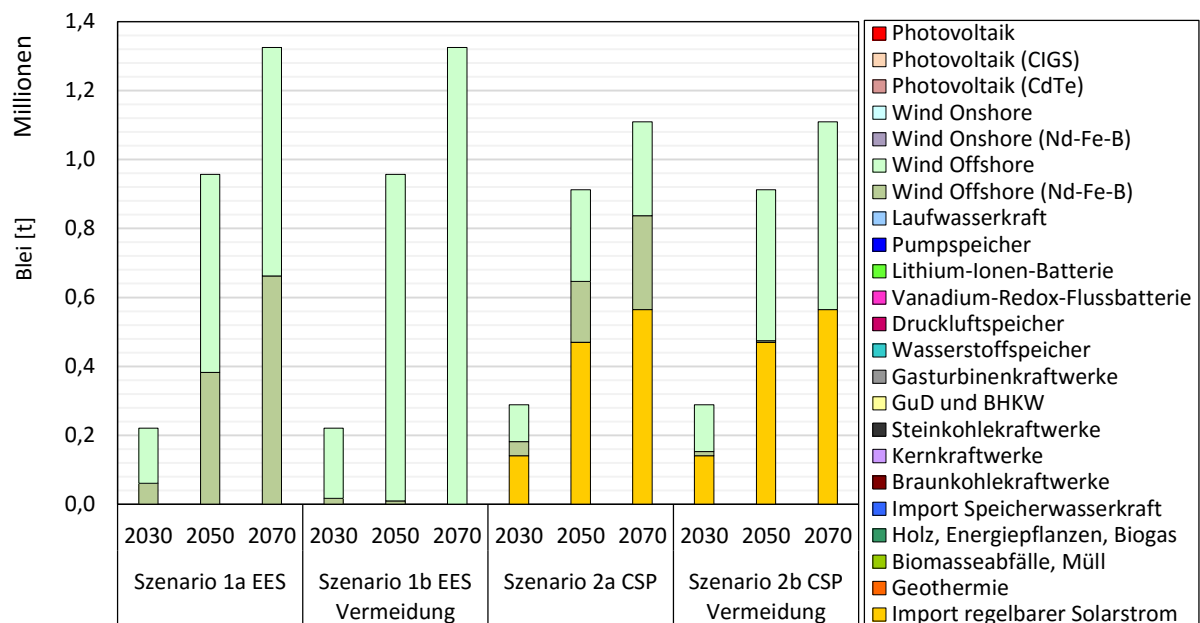


Abbildung 4-8: Gesamte Materialsumme an Blei für die Szenarien 1 und 2

In Deutschland stammten 70 % der Jahresproduktion von 423.000 t aus Sekundärmaterial, insbesondere Altbatterien (BGR 2013). Nach USGS (2014) lag im Jahr 2013 die Bleiproduktion aus Minen bei 5,4 Mio. t mit einer Reservenmenge von 89 Mio. t. Für die Ressourcen wird eine Rohstoffmenge von über 2 Mrd. t angegeben, sodass langfristig keine Engpässe zu erwarten sind. Die gebundene Materialsumme von Blei kann sich zukünftig durch die Substitution von Blei durch Aluminium- oder Kupferabschirmung in See- und Erdkabeln massiv verringern (IEEE 2010).

Silber

Der Bedarf an Silber für das Stromerzeugungssystem hängt in erster Linie von der monokristallinen Photovoltaik ab. Dass die Spiegel für die solarthermischen Anlagen demgegenüber nur eine sehr geringe Rolle spielen zeigt sich in **Abbildung 4-9**. Dadurch entsteht in Szenario 1b, der Vermeidung von Spezialmaterialien, der Silberbedarf gegenüber dem Szenario 1a um 65 % größer aus. Das Szenario 2 liegt in Variation a um 40 % sowie in Szenario b um 66 % unter dem jeweiligen Silberbedarf von Szenario 1. Die Minenproduktion betrug im Jahr 2013 26.600 t (USGS 2014). Für die Vereinigten Staaten von Amerika lag der Anteil der Produktion aus Sekundärmaterial bei 68 %. Der Anteil an primären Silberminen liegt nach (EU 2014c) bei etwa 30 %, während der Großteil des Silbers in Kuppelproduktionen mit Blei und Zink (37 %), Kupfer (21 %) sowie Gold (13 %) gewonnen wird. Dies führt dazu, dass der Preis für Silber nicht nur von Silbernachfrage und –angebot abhängt, sondern auch von der Preisentwicklung der primär produzierten Metalle. Eine Substitution der Silberleiter auf den Photovoltaikzellen kann, sofern die Technologie Marktreife erlangt, zukünftig durch Nickel-Kupfer Legierungen erfolgen.

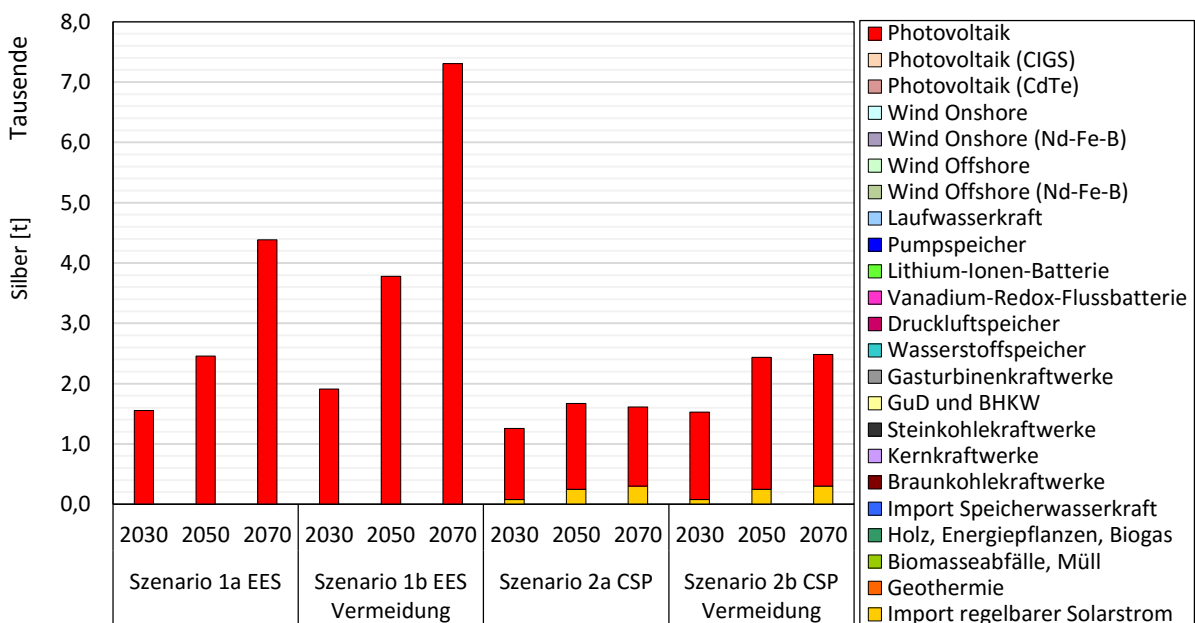


Abbildung 4-9: Gesamte Materialsumme an Silber für die Szenarien 1 und 2

Silizium

Für den Bedarf an Silizium in **Abbildung 4-10** ergibt sich nahezu dasselbe Bild wie für Silber. Ebenfalls zeigt sich hier durch die Verschiebung zu versorgungskritischen Materialien in Szenario 1b ein starker Anstieg gegenüber dem Szenario mit hohen Anteilen an Dünnschichttechnologien. Durch die vergleichsweise geringen installierten Leistungen an Photovoltaik bleiben beide Variationen von Szenario 2 durchgehend unter den Werten für Szenario 1.

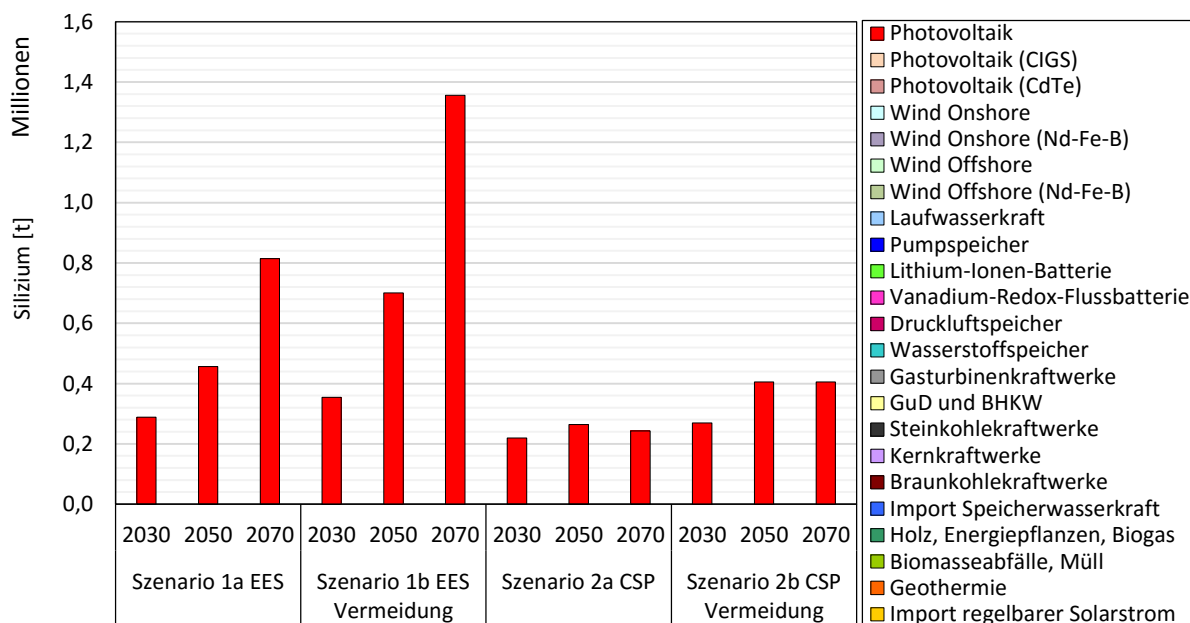


Abbildung 4-10: Gesamte Materialsumme an Silizium für die Szenarien 1 und 2

Die weltweite Produktion von metallischem Silizium in Höhe von 1,9 Mio. t im Jahr 2011 findet zu 56 % in China statt. Im Jahr 2010 wurden 12 % des nachgefragten metallischen Siliziums für Photovoltaiktechnologien verwendet. Der größte Anteil wird für die Herstellung von Aluminium (45 %) und für die chemische Industrie (35 %) eingesetzt (EU 2014a).

Lithium

Für die Materialsummen an Lithium zeigt sich in **Abbildung 4-11** ein deutlicher Unterschied zwischen den Szenarien. Während Szenario 2 mit sehr geringen elektrischen Energiespeicherkapazitäten auskommt muss in Szenario 1, der dezentralen Stromerzeugung mit heimischen fluktuierenden Energieträgern, ein großer Teil der elektrischen Energie zeitlich verschoben werden. Der daraus resultierende Bedarf an Speicherkapazität führt zu hohen gebundenen Materialsummen durch die elektrischen Energiespeicher. Die jährliche Förderung von Lithium betrug im Jahr 2013 35 Tsd. T, davon stammten 39 % aus Chile sowie 38 % aus Australien. Für die Reserven werden 13 Mio. t angegeben, was einer deutlichen Steigerung von 4 Mio. t im Jahr 2009 und 9,9 Mio. t im Jahr 2010 entspricht (USGS 2014).

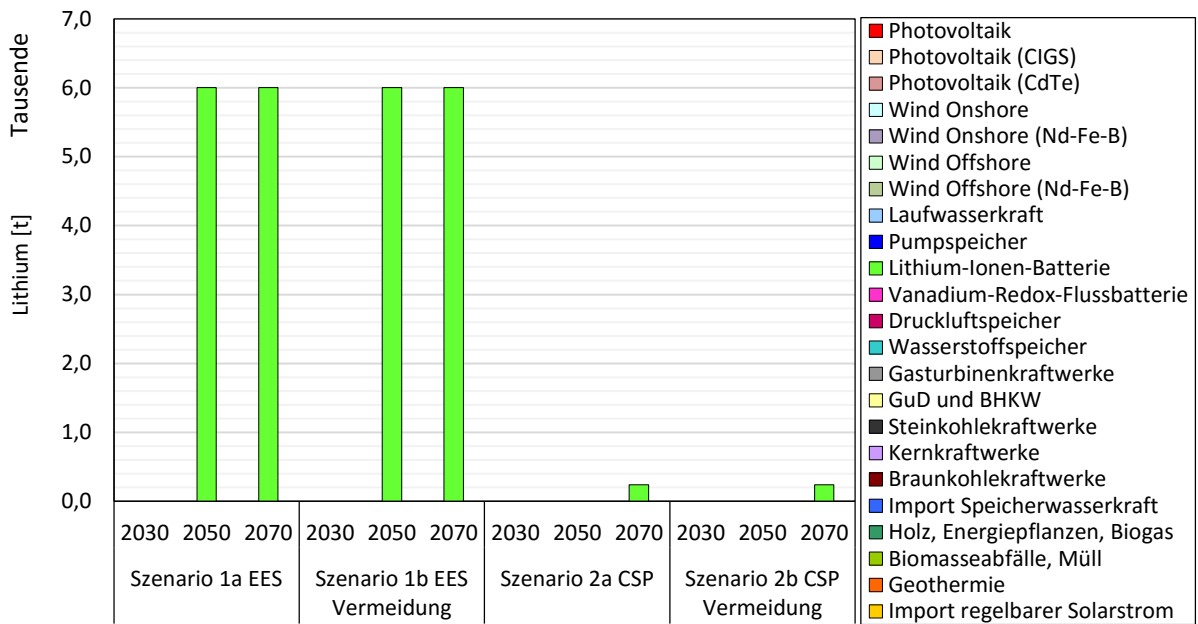


Abbildung 4-11: Gesamte Materialsomme an Lithium für die Szenarien 1 und 2

Vanadium

Für den Vanadiumbedarf der elektrischen Energiespeicher zeigt sich in **Abbildung 4-12** ein ähnliches Bild wie für Lithium, wobei der Ausbau an VRF-Batterien in Szenario 1 einen linearen Verlauf zeigt. In Szenario 2 werden auch im Fall von Vanadium sehr geringe Mengen benötigt. Von den geförderten Mengen von 76 Tsd. t im Jahr 2013 stammten 57 % aus China. Mit 14 Mio. t an die Reserven sowie 63 Mio. t an Ressourcen ergeben sich langfristig hinsichtlich der Versorgung keine Probleme. (USGS 2014)

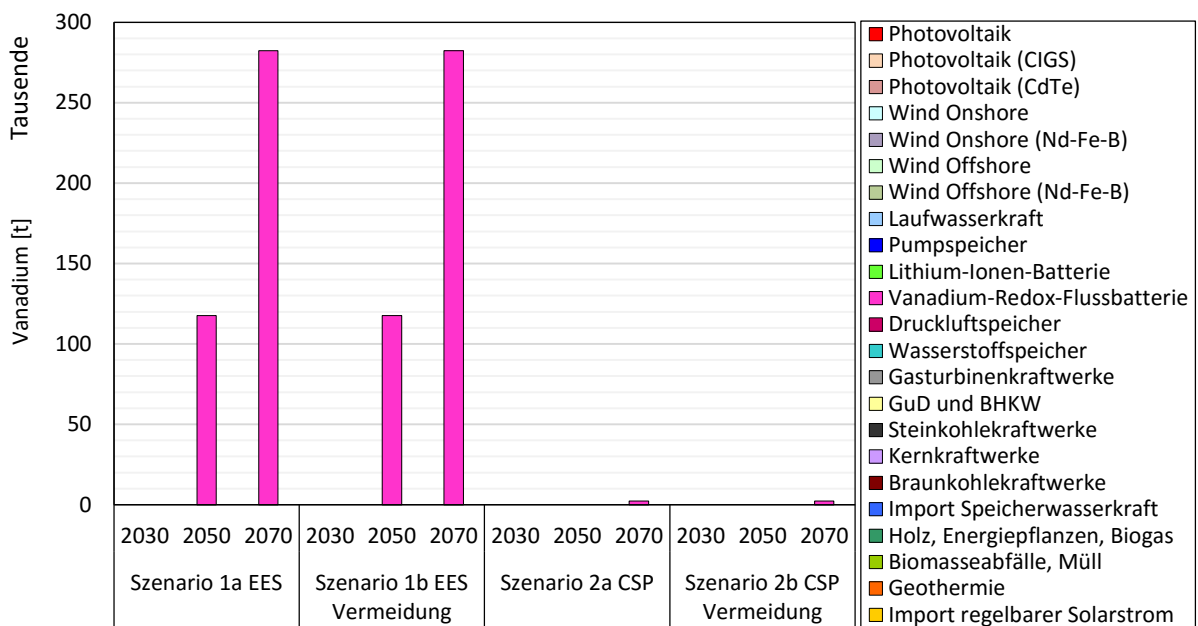


Abbildung 4-12: Gesamte Materialsomme an Vanadium für die Szenarien 1 und 2

Der Großteil des Vanadiums wird jedoch als Nebenprodukt der Gewinnung anderer Rohstoffe hergestellt, damit können sich je nach Ausbaugeschwindigkeit der elektrischen Energiespeicherung in VRF-Batterien kurz bis mittelfristig Engpässe ergeben.

4.2.3 Spezialmaterialien

Indium, Gallium

Der Bedarf an Gallium und Indium für das Stromerzeugungssystem wird für die betrachteten Technologien ausschließlich durch die CIGS-Dünnschichtphotovoltaik verursacht. Daher ist in **Abbildung 4-13** repräsentativ für den Materialsummenverlauf der Bedarf an Indium dargestellt, sowie der Bedarf für Gallium der Studie in Anhang C: Diagramme Materialsummenanalyse aufgeführt. Für Szenario 1a ergibt sich analog zur installierten Leistung der Photovoltaiktechnologien ein steigender Verlauf, während bei Szenario 2a ein Abflachen des Materialbedarfs eintritt. Für die zwei Szenariovariationen 1b und 2b erfolgt eine Verschiebung der Marktanteile zum ausschließlichen Einsatz siliziumbasierter Photovoltaiktechnologien, daher verschwindet der Materialbedarf vollständig. Dadurch lässt sich die Spannweite der Marktanteile zwischen hohen Anteilen von CIGS mit 22,5 % im Jahr 2070 in Szenario gegenüber der vollständigen Vermeidung einschätzen. Der tatsächliche Bedarf wird stark abhängen vom erzielbaren Wirkungsgrad im Vergleich zu den anderen Technologien, der Materialintensität der aktiven Schicht sowie der Verfügbarkeit von Gallium und Indium.

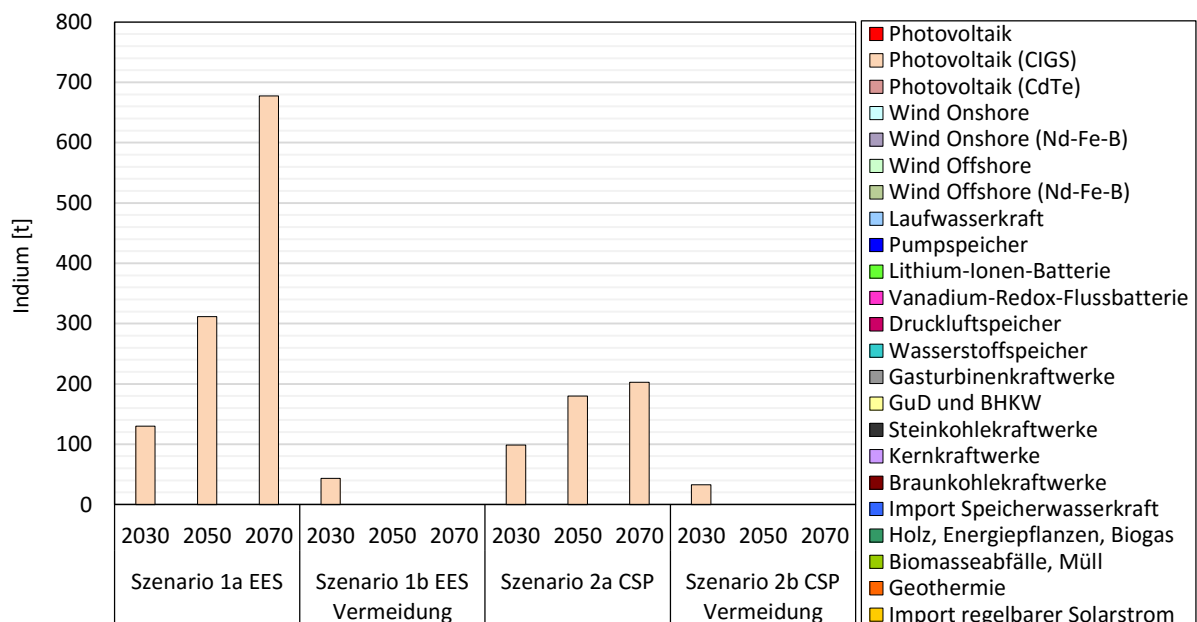


Abbildung 4-13: Gesamte Materialsumme an Indium für die Szenarien 1 und 2

Für Indium ergibt sich unter den gegebenen Annahmen ein maximaler Bedarf von 680 t für die gebundene Materialsumme im Jahr 2070 für das Szenario 1a. Für das Szenario 2a fallen 2070

demgegenüber nur 200 t Indium an. Nach den Angaben des USGS (2014) betrug die Primärproduktion von Indium im Jahr 2013 770 t, von denen 53 % in China produziert wurden. Die Reserven werden mit 15 Tsd. t in Zink und Kupfervorkommen abgeschätzt. Problematisch ist dabei, dass aufgrund verschiedener Raffinationstechniken und geringer erzielbarer Gewinne nur 25 – 30 % des enthaltenen Indiums aus den Erzen gewonnen wird (EU 2014a). Insbesondere durch die Nutzung in Indium-Zinn-Oxiden (ITO) für die Herstellung von Displays können Nachfragekonflikte entstehen. Diese führten dazu, dass Japan massiv auf das Recycling von Indium setzte und mit einer Indiumproduktion aus Sekundärmaterial von 680 t gegenüber der Produktion aus Primärmaterial von 60 t weltweit die höchste Recyclingrate besitzt (Watanabe 2011).

Im Fall von Gallium ergibt sich ein maximaler Bedarf von 5,4 Tsd t in Szenario 1a und 1,6 Tsd. t für das Szenario 2a (siehe Anhang C, **Abbildung C-3**). Analog zu Indium kann es durch den Einsatz siliziumbasierter Photovoltaikmodule in den Vermeidungsszenarien 1b und 2b vollständig vermieden werden. Gallium wird ausschließlich als Nebenprodukt während der Aluminiumherstellung (90 %) sowie der Zinkherstellung (10 %) produziert. Auch hier sind die erzielbaren Umsätze im Vergleich zu den Hauptprodukten sehr gering (EU 2014a). Für die weltweit produzierten Mengen werden auf 383 t in 2012 sowie 280 t in 2013 eingeschätzt. Dieser Produktionsrückgang ist auf die produzierten Überschüsse zurückzuführen. Da nur schätzungsweise 10 % der gewinnbaren Mengen an Gallium während des Prozesses extrahiert werden, besteht auch hier noch Potential, wenn sich die Nachfrage und der Preis erhöhen (EU 2014a). Für Galliumreserven finden sich in der Literatur keine Angaben, während bei den Ressourcen weltweit über 1 Mio. t in Bauxitressourcen vermutet werden (USGS 2014).

Tellur, Cadmium

Unter den getroffenen Annahmen hinsichtlich der Marktanteile ergibt sich für Cadmium und Tellur ein ähnliches Bild wie für Gallium und Indium. Die hier zugrunde liegende Technologie der Cadmium-Tellurit Dünnschichtphotovoltaik führt zu dem gleichen Verlauf für Cadmium und Tellur, sodass an dieser Stelle Tellur repräsentativ für Cadmium aufgeführt ist, während die Auswertung für Cadmium der Studie in Anhang C: Diagramme Materialsummenanalyse angehängt ist.

Es zeigt sich in **Abbildung 4-14** für Tellur ein maximaler Bedarf von 3,4 Tsd. t in Szenario 1a sowie ein Bedarf von 1,0 Tsd. t für das Szenario 2a. In beiden Szenariovariationen 1b und 2b ist die vollständige Vermeidung möglich. Für den Weltmarkt für Tellur stehen nur sehr eingeschränkt Informationen zur Verfügung. Die Schätzungen für die weltweite Jahresproduktion reichen von 450 t bis 630 t pro Jahr bei einer Reservemenge von 24 Tsd. t in Kupfervorkommen. 90 % des produzierten Tellurs fällt als Nebenprodukt bei der Raffination von Kupfer an (EU 2014a). Die Studie der europäischen Kommission geht mittel bis langfristig von einem starken Anstieg der Marktanteile von CdTe-Photovoltaikmodulen aus.

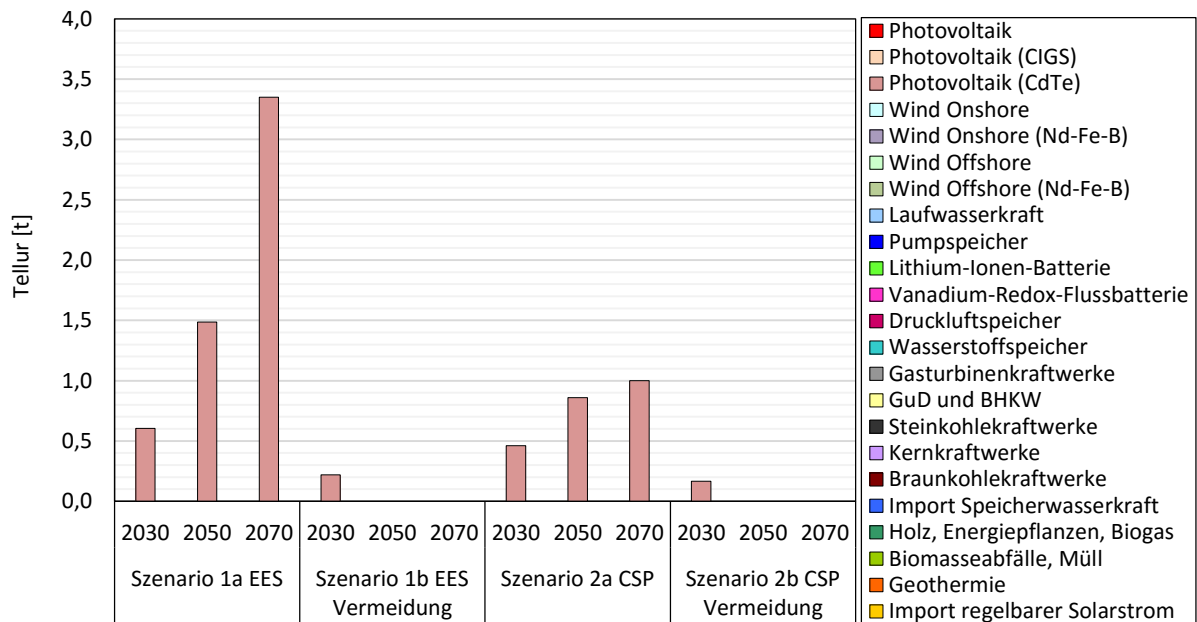


Abbildung 4-14: Gesamte Materialsumme an Tellur für die Szenarien 1 und 2

Für Cadmium fällt ein Bedarf von bis zu 3,7 Tsd. t in Szenario 1a sowie bis zu 1,1 Tsd. t in Szenario 2a an. Mit einer Jahresproduktion von 21,8 Tsd. t und einer weltweiten Reservenmenge von 500 Tsd. t ist die Situation gegenüber Tellur weniger kritisch. Die Gewinnung von Cadmium erfolgt wie Indium ebenfalls als Nebenprodukt der Zinkraffination. Trotz eines Zink-Cadmium Verhältnisses von 200:1 bis 400:1 ist dies nach USGS eine der wenigen wirtschaftlichen Quellen für Cadmium (USGS 2014).

Neodym, Dysprosium

Der Materialbedarf für die seltenen Erden Neodym und Dysprosium wird durch den Einsatz der Neodym-Eisen-Bor Magnete in getriebelosen Generatoren für Windenergieanlagen verursacht. Damit fällt der Bedarf insbesondere für die Offshorewindenergie an, da hier die Wartungskosten der Anlagen im Gegensatz zu den Onshorewindenergieanlagen durch eine geringere Anfälligkeit für die mechanischen Komponenten reduziert werden kann. Da analog zu den genannten anderen Spezialmaterialien Neodym und Dysprosium immer im gleichen Verhältnis benötigt werden, wird an dieser Stelle in **Abbildung 4-15** repräsentativ der Bedarf an Neodym betrachtet, während der Bedarf am Dysprosium angehängt ist (siehe Anhang C, **Abbildung C-6**).

Insgesamt ergibt sich eine benötigte Neodymsumme von 9,4 Tsd. t in Szenario 1a und 3,9 Tsd. t in Szenario 2a jeweils im Jahr 2070. Die größten Steigerungen in der gebundenen Materialsumme fallen zwischen 2030 und 2050 durch den Ausbau der Offshorewindenergie und verstärkten Einsatz der getriebelosen Anlagen an. Für Szenario 1a wird bis zum Jahr 2070 von einem weiteren starken Anstieg der Materialsumme ausgegangen, während für das Szenario 2a zwischen 2050 und 2070 ein verhältnismäßig geringer Anstieg auftritt.

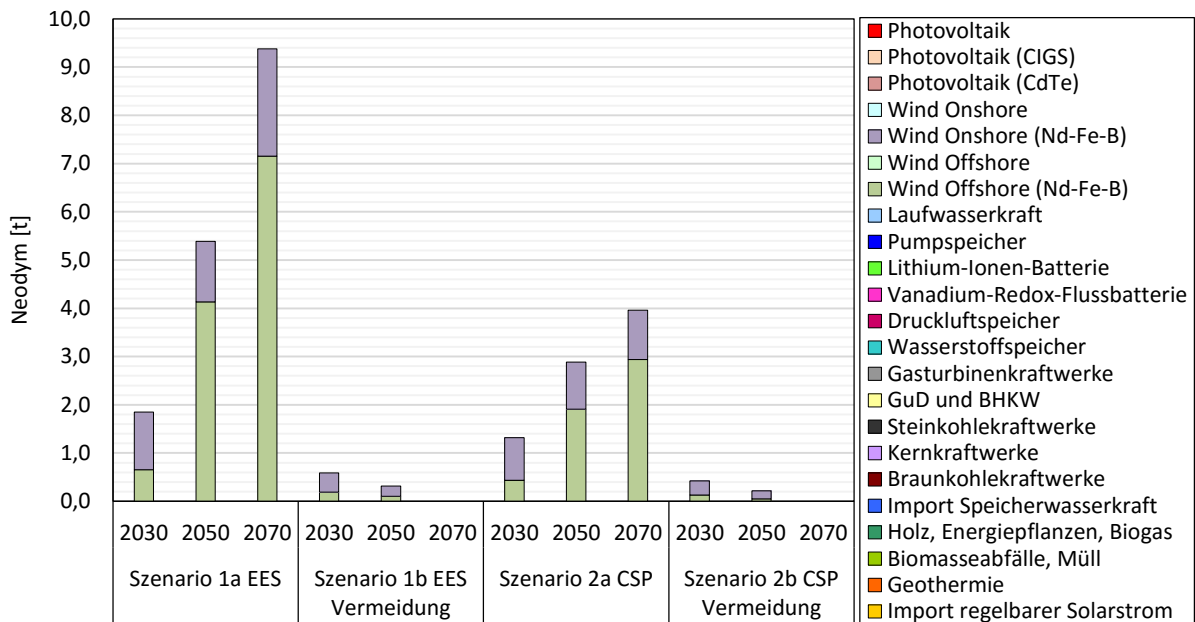


Abbildung 4-15: Gesamte Materialsumme an Neodym für die Szenarien 1 und 2

Für das leichte seltene Erdelement (light rare earth element, LREE) Neodym betrug die Jahresproduktion 2012 21,6 Tsd. t (EU 2014a). 89 % der nachgefragten Menge an Neodym werden dabei für die Produktion von Permanentmagneten verwendet. Durch die Wiedereröffnung der Mine Mountain Pass (USA) und Produktionssteigerungen in der Mine Mount Weld (AUS) verringerte sich im Zeitraum von 2011 – 2013 der Marktanteil der chinesischen LREE Produktion von 95 % auf 87 % (EU 2014a). Nicht betroffen sind hiervon jedoch die schweren seltenen Erdelemente (heavy rare earth elements, HREE). Hier liegt der chinesische Produktionsanteil weiterhin bei 99 %. Dysprosium gehört zu der Gruppe der HREEs und wird mit einem Anteil von 99 % nahezu ausschließlich für die Produktion von Permanentmagneten eingesetzt. Aufgrund der hohen Unsicherheiten lassen sich auch für die Reserven- und Ressourcenmengen nur sehr eingeschränkt Aussagen treffen. USGS (2014) geht weltweit von Reserven in Höhe von 110 Mio. t an seltenen Erden aus, was bei unter der statistischen Verteilung zu schätzungsweise 17,8 Mio. t an Neodymreserven und 990 Tsd. t Dysprosiumreserven führt.

Für eine Reduktion der Versorgungsrisiken werden insbesondere das Recycling der Neodym-Eisen-Bor Magneten angeführt, das bisher nur für die Rückgewinnung der seltenen Erdelemente aus Festplatten angewandt wird (USGS 2011). Als Substitution für Fe-Nd-B Magnete können auch Samarium-Kobalt Magnete zum Einsatz kommen (JRC 2011). Generell wird durch den Einsatz von Elektromotoren für die Elektromobilität, sowie Generatoren für Windenergieanlagen der Bedarf an Permanentmagneten mittel- bis langfristig stark steigen.

4.3 Materialflussanalyse

Ausgehend von den gebundenen Materialsummen lässt sich unter Annahme der technischen Rahmendaten auf die zu erwartenden Materialströme schließen. Dabei werden die Materialien betrachtet für die im Kapitel 4.2 Materialsummenanalyse deutliche Unterschiede aufweisen. Für die Mengenmaterialien werden Aluminium sowie Glas betrachtet, für die Technologiemaaterialien Kupfer und Lithium. Bei den Spezialmaterialien zeigt durch die Szenarienvariation b, dass sich sowohl in Szenario 1 und 2 der Einsatz dieser Materialien vollständig vermeiden lässt, daher werden diese Materialflüsse, da nicht zwingend notwendig, mehr von der Dynamik zwischen Marktanteilen und Technologiepreisen beeinflusst.

4.3.1 Mengenmaterialien

Aluminium

Für Aluminium zeigt sich in Szenario 1b, dargestellt in **Abbildung 4-16**, ein konstanter Anstieg des mittleren jährlichen Materialinputs von 120 Tsd. t/a bis hin zu 350 Tsd. t/a. Der Hauptanteil wird analog zu den gebundenen Materialsummen von den Photovoltaikanlagen verursacht. Die Differenz zwischen Materialinput und –output über den gesamten Zeitraum führt dazu, dass selbst bei hohen Recyclingraten ein konstanter Materialinput notwendig ist.

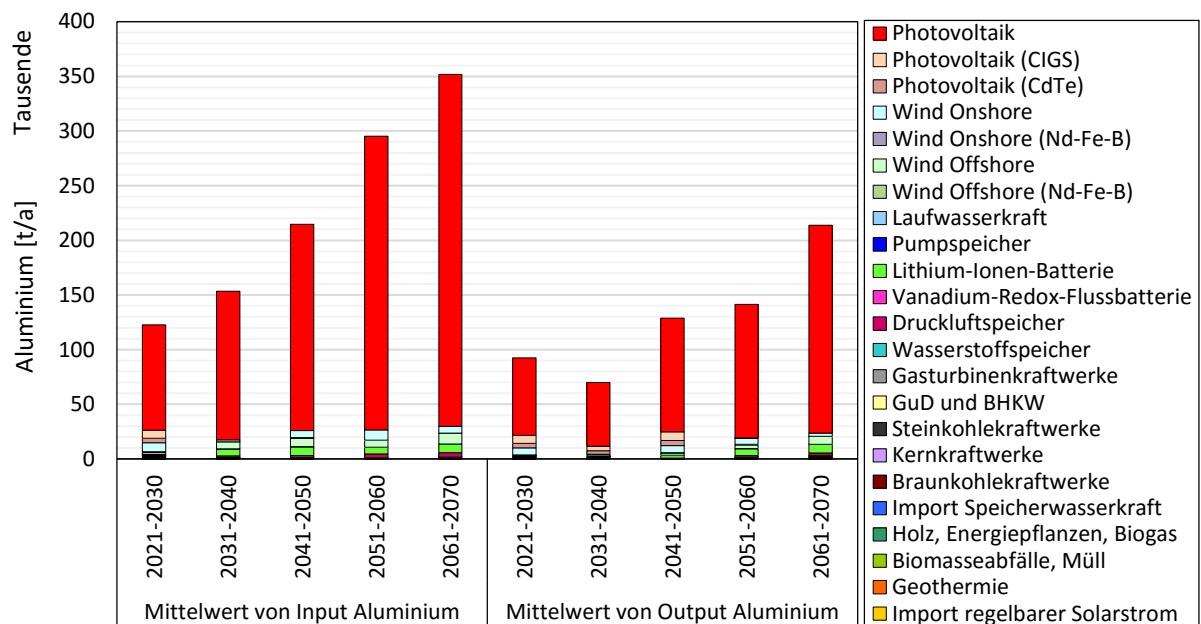


Abbildung 4-16: Materialinput und –output an Aluminium für Szenario 1b

Ein Vergleich mit den Materialflüssen in **Abbildung 4-17** für Szenario 2b zeigt deutlich auf, dass zum einen geringere Materialflüsse notwendig sind und zum anderen die freiwerdenden Materialmengen in einer ähnlichen Größenordnung wie die benötigten Materialmengen liegen.

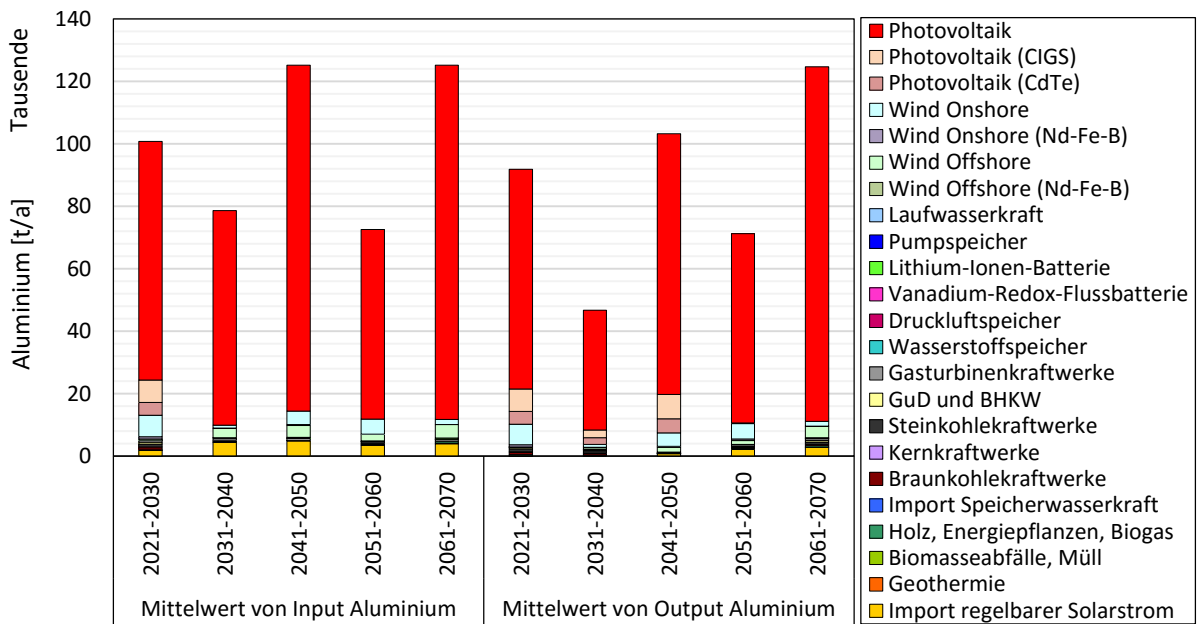


Abbildung 4-17: Materialinput und –output an Aluminium für Szenario 2b

Glas

Analog zu den Materialflüssen für Aluminium zeigt sich in **Abbildung 4-18**, dass der größte Einfluss hinsichtlich der Materialflüsse von Glas auf die installierte Photovoltaikleistung sowie in Szenario 2 zudem auf die Importe von regelbarem Solarstrom zurückzuführen ist. Gegenüber der maximalen Differenz zwischen dem mittleren Materialinput und –output in Szenario 1 von 310 Tsd. t sind in Szenario 2 in **Abbildung 4-19** gleichmäßigere Materialflüsse erkennbar.

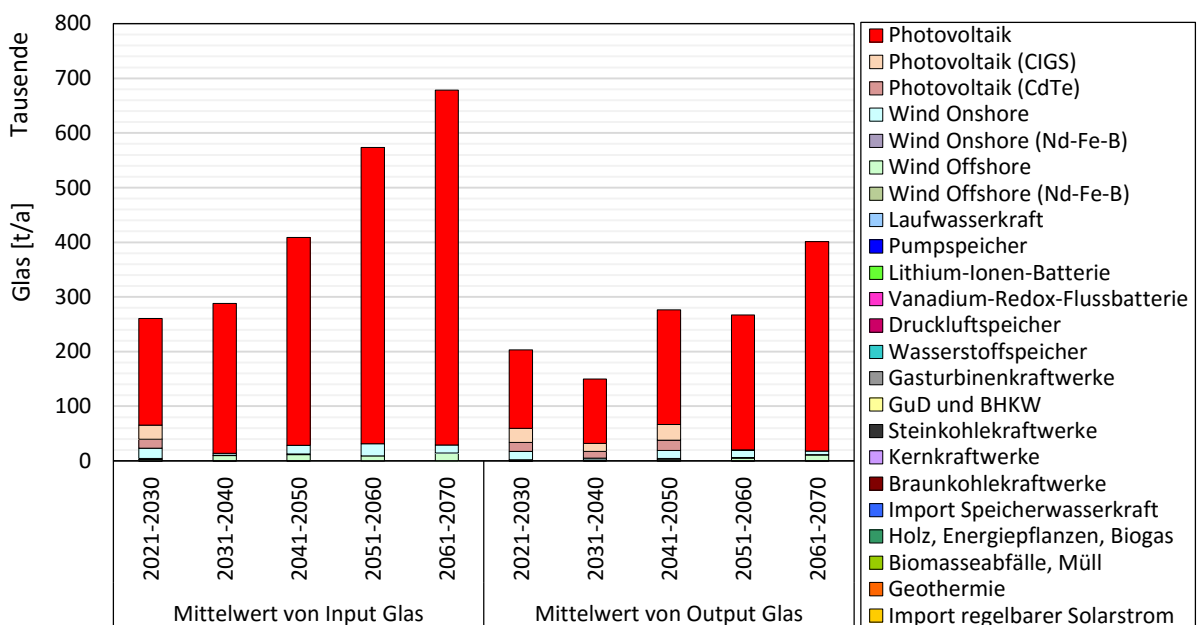


Abbildung 4-18: Materialinput und –output an Glas für Szenario 1b

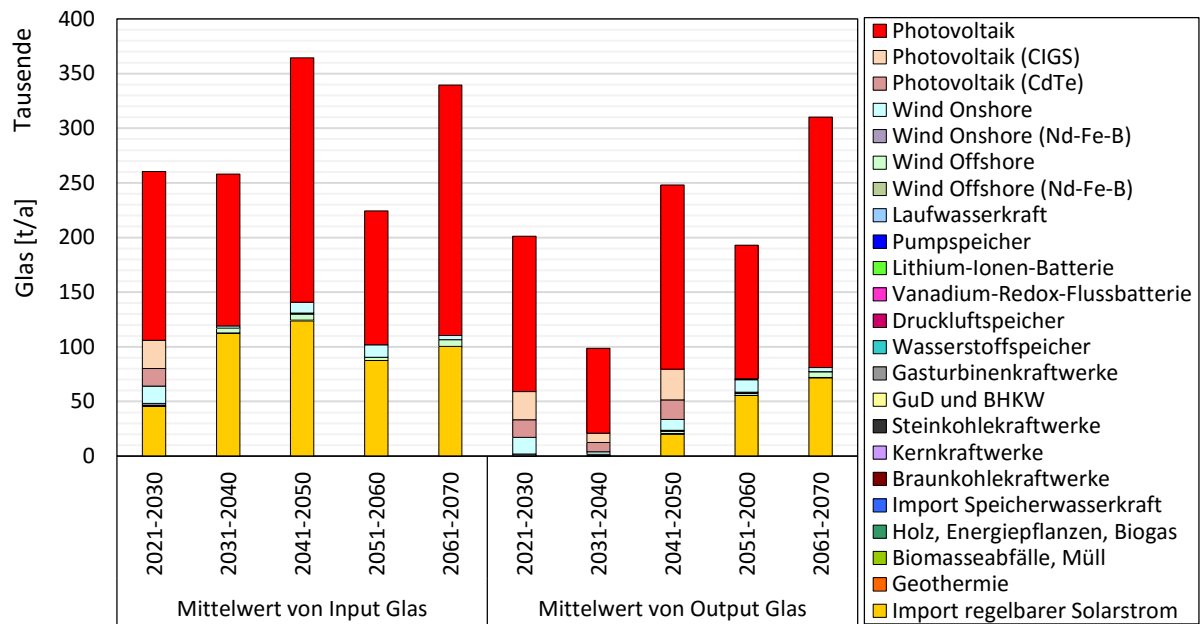


Abbildung 4-19: Materialinput und -output an Glas für Szenario 2b

4.3.2 Technologiematerialien

Kupfer

Für die Materialflüsse von Kupfer ergeben sich in den Szenarienpfaden hin zu hohen Anteilen erneuerbarer Energieträger deutliche Unterschiede. Insbesondere die Wechselrichter der Photovoltaikanlagen führen in **Abbildung 4-20** für Szenario 1 zu mittleren jährlich Differenzen der Materialflüsse in und aus dem System von bis zu 60 Tsd. t.

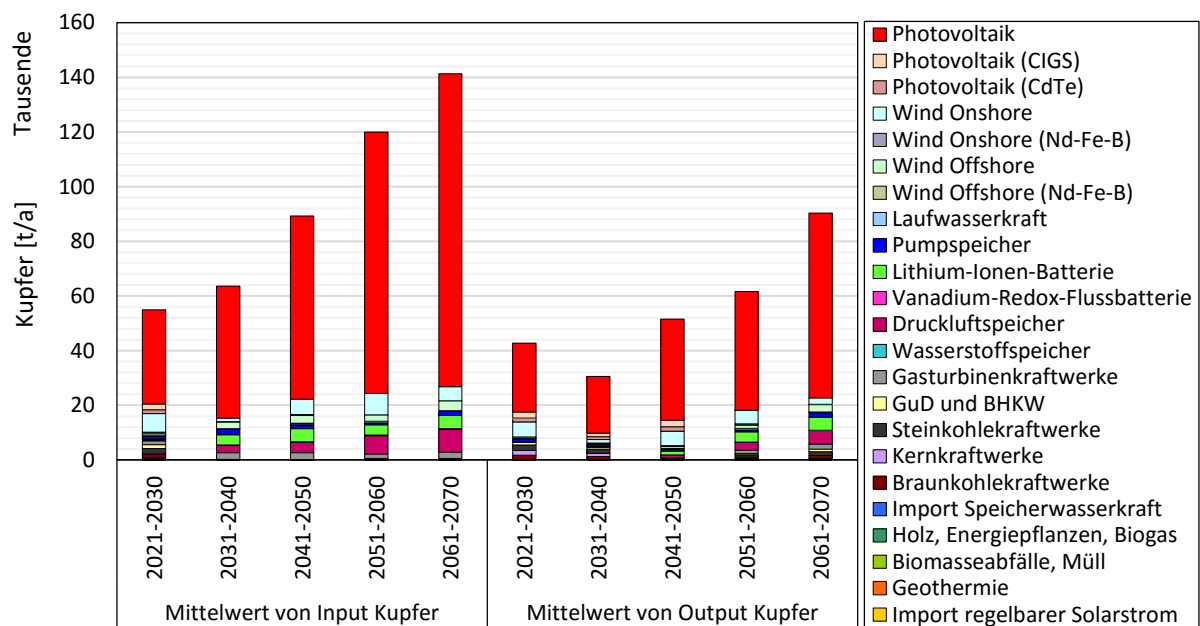


Abbildung 4-20: Materialinput und -output an Kupfer für Szenario 1b

Der Ausbau von solarthermischen Kraftwerken inklusive der Stromübertragung nach Deutschland in Szenario 2, dargestellt in **Abbildung 4-21**, führt demgegenüber zu einem mittleren jährlichen Kupferinput von etwa 20 Tsd. t pro Jahr. Dazu kommt ein mittlerer jährlicher Materialbedarf für Photovoltaik von bis zu 40 Tsd. t pro Jahr.

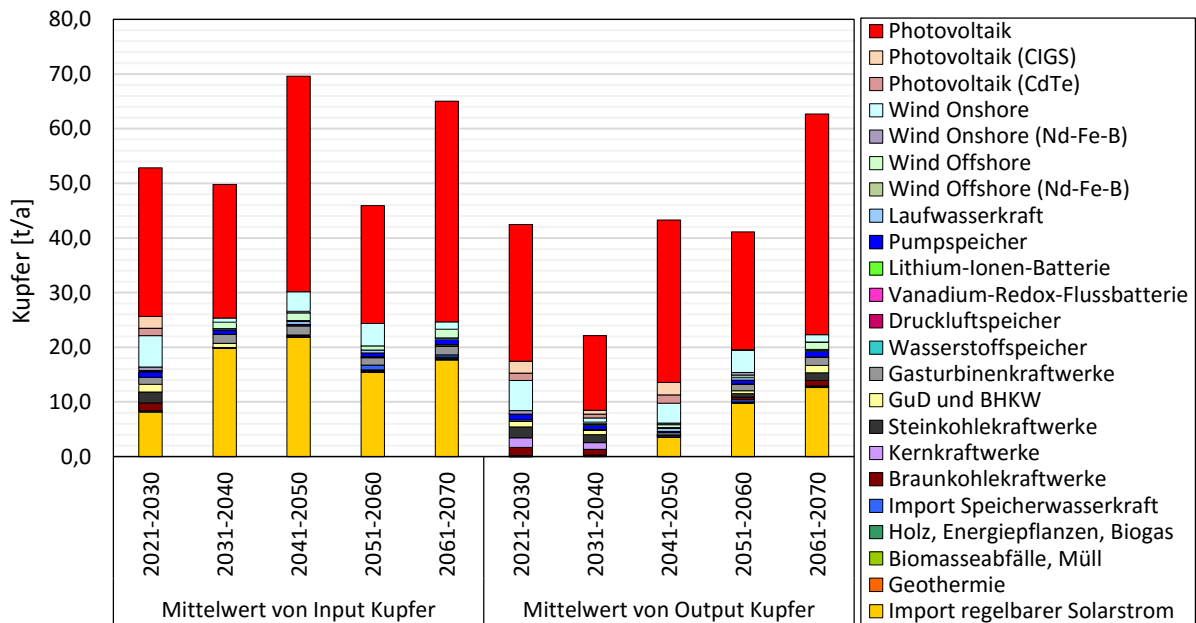


Abbildung 4-21: Materialinput und –output an Kupfer für Szenario 2b

Lithium

Für Lithium und andere Materialien für die elektrischen Energiespeicher ergeben sich durch den hohen Bedarf an installierter Leistung und Kapazität in Szenario 1, der Versorgung durch heimische Energieträger, wesentliche Materialflüsse, dargestellt in **Abbildung 4-22**. Langfristig ergeben sich zwar ähnlich große Werte für den Materialinput und –output, da keine weiteren elektrischen Energiespeicher im System benötigt werden. Demgegenüber stellt der mittelfristige massive Materialinput das System vor Herausforderungen. Zwischen den Jahren 2031 und 2040 beträgt der jährliche Materialinput 8,6 % der Lithiumjahresproduktion von 2013 (USGS 2014) ohne dass dabei Material aus dem System für Recycling zur Verfügung steht.

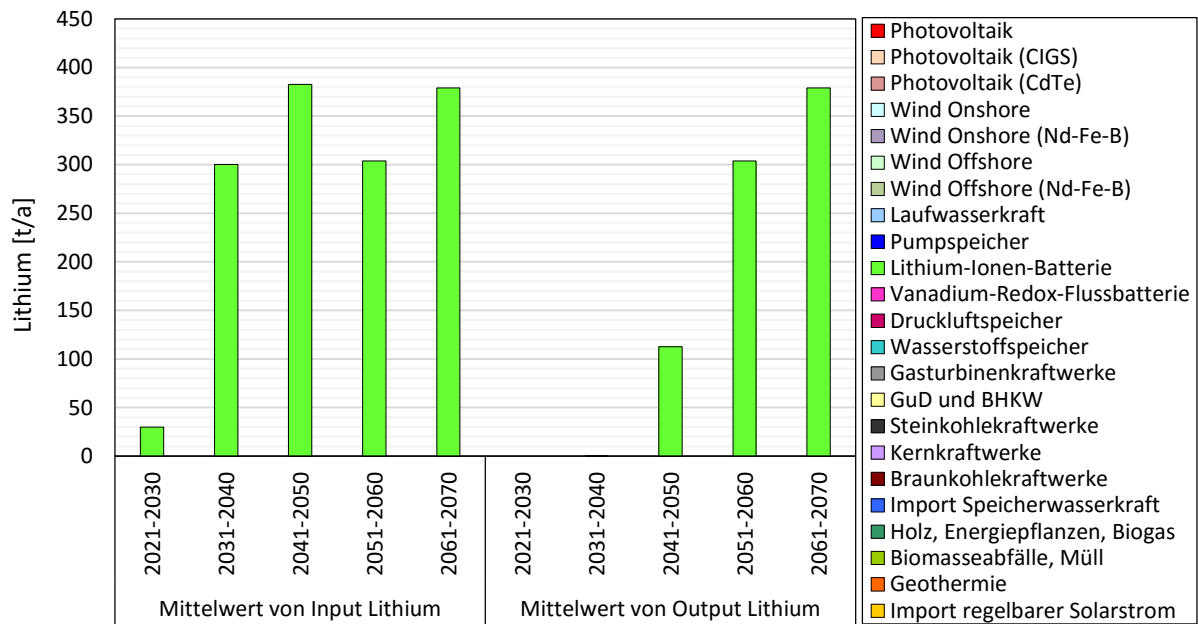


Abbildung 4-22: Materialinput und -output an Lithium für Szenario 1b

Die in **Abbildung 4-23** anfallenden Materialflüsse für Szenario 2 sind mit einem maximalen jährlichen Materialinput von 15,2 t pro Jahr wesentlich geringer. Durch den späteren Bedarf der elektrischen Energiespeicher ergibt sich hier eine zeitliche Verschiebung der Materialflüsse bei derselben Verzögerung zwischen Materialinput und -output durch die angenommene technische Lebenszeit der Anlagen.

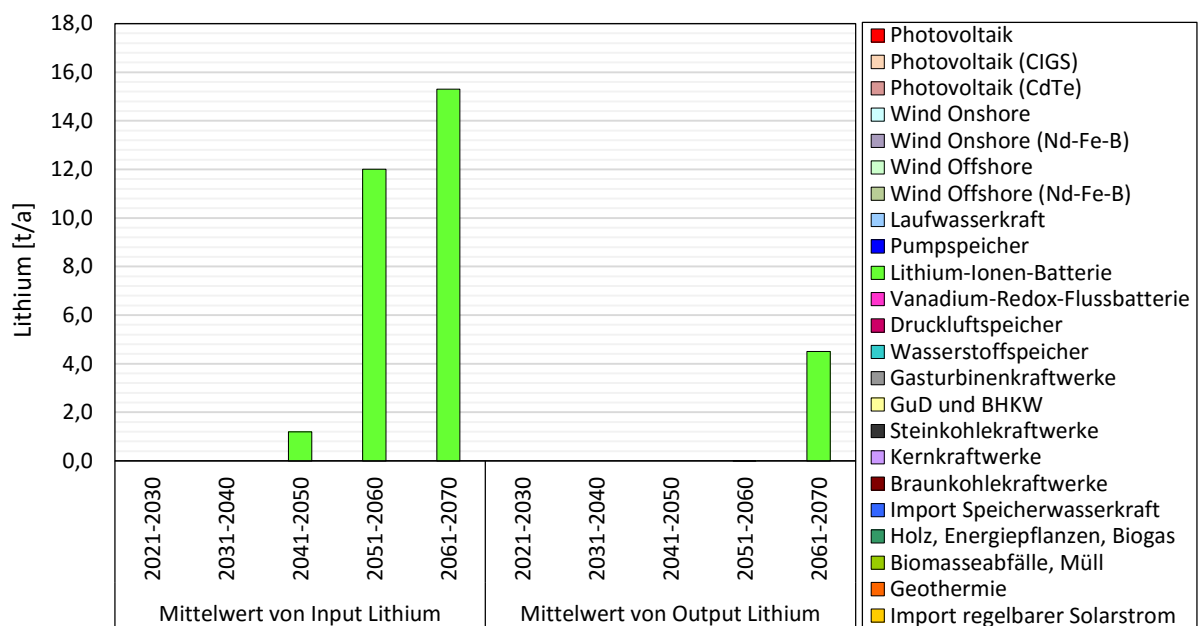


Abbildung 4-23: Materialinput und -output an Lithium für Szenario 2b

Weiterführende szenarienbasierte Ansätze

- **Erweiterung der betrachteten Region:** Für weitere Aussagen hinsichtlich des Materialbedarfs für Energiesysteme empfiehlt sich die Anwendung des Modells auf weitere Szenarienfade. Insbesondere für globale Szenarien lassen sich so mögliche Grenzen für erreichbare Anteile an erneuerbarer Energien hinsichtlich der weltweiten Jahresproduktionen, der Reserven sowie der Ressourcen ermitteln. Dafür muss gegebenenfalls eine Anpassung der Werte des spezifischen Materialbedarfs für einzelne Technologien erfolgen. Damit können beispielsweise günstigere Standorte für Geothermie wie Island oder Italien berücksichtigt werden, welche durch Bohrtiefen von 1000 – 2000 m einen deutlich geringeren Materialbedarf aufweisen. Generell ist auf geographisch größeren Systemebenen eine bessere Differenzierung zwischen einzelnen Technologien und deren Variationen notwendig.
- **Berücksichtigung der innerdeutschen Verteilnetze:** Für eine bessere Vergleichbarkeit des Materialbedarfs zwischen der Nutzung von heimischen fluktuierenden Energieträgern und dem Import von gut regelbarer solarthermischer Energie aus Nordafrika müssen die innerdeutschen Verteilnetze sowie die damit verbundenen Übertragungsverluste berücksichtigt werden. Darüber hinaus spielen die elektrischen Verluste und der Materialbedarf für die Informations- und Kommunikationsinfrastruktur zur Regelung der fluktuierenden Energieträger eine große Rolle. Eine Modellierung dieser Faktoren in Folgestudien ist für die Belastbarkeit der Ergebnisse von großer Bedeutung.

5 Fazit und Ausblick

Anhand der Materialinventare der verschiedenen Technologien lässt sich zeigen, dass hohe Anteile an regenerativer Energien zu einer höheren Materialintensität des Stromerzeugungssystems führen. Dieser Effekt wird durch hohe zu installierenden Leistungen an fluktuierende Energieträgern und benötigten Energiespeichern für die zeitliche Verschiebung von Energie verstärkt. Dabei liegt in Szenario 1 der Fokus auf der Nutzung heimischer Energieträgern mit elektrischen Energiespeichern was zu einem hohen Materialbedarf insbesondere für die Technologiematerialien führt. Demgegenüber liegt der Schwerpunkt von Szenario 2 auf solarthermischen Kraftwerken in Nordafrika und der thermischen Energiespeicherung, was über HGÜ Leitungen die Bereitstellung regelbarer erneuerbarer elektrischer Energie ermöglicht. Daher sind ein Vergleich und eine Bewertung des Materialbedarfs von Stromerzeugungssystemen und darüber hinaus für Energiesysteme aus mehreren Gründen sinnvoll.

- **Abschätzung der benötigten Materialmengen:** Für die langfristige Planung von Materialversorgungsstrategien auf nationaler und internationaler Ebene ist eine Identifizierung benötigter Materialien sowie deren Quantifizierung notwendig. Insbesondere auf globaler Ebene müssen benötigte Materialsommen in Relation zu verfügbaren Reserven und Ressourcen gesetzt werden. Zudem lassen sich aus den zu erwartenden Materialflüssen Handlungsempfehlungen hinsichtlich Strategien zum Ausbau von Recycling ableiten.
- **Vergleich möglicher Ausbaupfaden:** Um die Erzeugung elektrischer Energie möglichst CO₂-neutral und kostengünstig zu gestalten stehen viele Optionen zur Verfügung. Daher werden weitere Kriterien wie Flächennutzung und Materialintensität dieser Systeme weiter in den Fokus rücken. Ein Vergleich der Materialintensität für verschiedene Ausbaupfade und Marktanteile von Technologien bietet somit das Potential zu einem materialeffizienten System zu gelangen ohne dabei in verstärkte Konkurrenz zu den Materialstrategien anderer Länder und Industriesektoren zu treten.
- **Kommunikation zwischen Herstellern und Abnehmern von Rohstoffen:** Um zukünftig massive Preisschwankungen auf den Rohstoffmärkten zu begrenzen müssen verstärkt verfügbare Minenkapazitäten und die Produktionsmengen sowie die damit verbundenen Nebenproduktionen von Metallen beobachtet werden. Auf der anderen Seite gilt es jedoch auch die von der Industrie benötigten Materialmengen, unter anderem auch für das Stromerzeugungssystem, zu quantifizieren um beiden Seiten mittel- und langfristig Planungssicherheit zu geben.

Die Studie der zwei Ausbauszenarien für das deutsche Stromerzeugungssystem Szenario 1 und 2 in Kombination mit den Szenariovariationen a und b zeigen deutlich auf welche Vorteile im Hinblick auf die Materialien durch die Nutzung von Importen regelbaren Solarstroms entstehen können. Dazu zählen insbesondere folgende Aspekte:

- **Reduktion der gebundenen Materialsomme für Technologie- und Spezialmaterialien:** Für die Mengenmaterialien zeigen sich nur sehr geringe Unterschiede in den betrachteten Szenarien, jedoch sind für Technologie- und Spezialmaterialien deutliche Unterschiede zu beobachten. Für viele Materialien lassen sich die gebundenen Materialsommen um mehr als die Hälfte reduzieren.
- **Gleichmäßigere Materialflüsse über die Systemgrenzen:** Der Szenarienpfad hin zu hohen Anteilen erneuerbarer Energien durch die Importe von Strom aus solarthermischen Anlagen führt zu einem deutlich geringeren und gleichmäßigerem Materialfluss in das Stromerzeugungssystem. Demgegenüber sind bei dem betrachteten Stromerzeugungssystem auf Basis heimischer Energiequellen durch den benötigten massiven Ausbau von Photovoltaik, Windenergie und elektrischer Energiespeicher exponentielle Anstiege zu beobachten.
- **Potentiale für Recyclingstrategien und Verringerung des Primärrohstoffbedarfs:** Die gleichmäßigeren Materialflüsse über die Systemgrenzen in Szenario 2 führen zu einer besseren Planungssicherheit für die Steigerung von Recyclingraten. Eine schrittweise Erhöhung der Recyclingkapazitäten insbesondere für Technologiematerialien kann dadurch den Bedarf an Primärrohstoffen für das Stromerzeugungssystem nachhaltig senken und somit Umweltauswirkungen durch die Entnahme von Rohstoffen aus der Ökosphäre reduzieren.

Für weiterführende Betrachtungen des Materialbedarfs für Szenarienpfade steht vor allem eine Verbesserung und Verifizierung der Datenbasis im Vordergrund. Dazu gehören ebenfalls regelmäßige Aktualisierungen hinterlegter Technologien und Erweiterungen um neue Technologien und Technologievariationen auf Basis von Literaturwerten.

Die am Ende der Kapitel 2 bis 4 diskutierten Ansätze können zudem dazu beitragen, die Szenarien anhand weiterer Aspekte zu untersuchen. Insbesondere eine Abschätzung der mit dem Rohstoffabbau und Recycling verbundenen Emissionen und Energiebedarf erscheint neben der Betrachtung des vollständigen Lebenszyklus als wichtiger weiterer Schritt.

Hinsichtlich weiterer Szenarien deren Materialbedarf durch Anwendung des Materialmodells untersucht werden können, ist vor allem ein globales Szenario empfehlenswert um frühzeitig die Effekte von nationalen Ausbaustrategien und daraus resultierende Engpässe für andere Länder abschätzen zu können.

Literaturverzeichnis

ISO 14040: Umweltmanagement - Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen.

Angerer, Gerhard; Marscheider-Weidemann, Frank; Lüllmann, Arne; Erdmann, Lorenz; Scharp, Michael; Handke, Volker; Marwede, Max (2009): Rohstoffe für Zukunftstechnologien. Einfluss des branchenspezifischen Rohstoffbedarfs in rohstoffintensiven Zukunftstechnologien auf die zukünftige Rohstoffnachfrage. Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung; Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung.

Anigstein, R.; Chmelynski, H. J.; Loomis, D. A.; Marschke, S. F.; Mauro, J. J.; Olsher, R. H. et al. (2004): Radiological Assessments for Clearance of Materials from Nuclear Facilities. Appendices A through E. U.S. Nuclear Regulatory Commission.

Bertani, Ruggero (2014): Geothermal Power Generation in the World - 2010–2015 Update Report. Proceedings World Geothermal Congress 2015.

BGR (2013): Deutschland - Rohstoffsituation 2012. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe.

Bryan, R. H.; Dudley, I. T. (1974): Estimated quantities of materials contained in a 1000-MWe PWR power plant. Oak Ridge National Laboratory.

BSW (2014): PV-Freiflächenanlagen. Bundesverband Solarwirtschaft. Online verfügbar unter <http://www.solarwirtschaft.de/pv-freiflaechenanlagen.html>, zuletzt geprüft am 20.11.2014.

de Wild-Scholten, Mariska J.; Alsema, Erik A. (2005): Environmental life cycle inventory of crystalline silicon photovoltaic module production.

DOE (2010): Critical Materials Strategy 2010. Hg. v. U.S. Department of Energy.

DOE (2011): Critical Materials Strategy 2011. Hg. v. U.S. Department of Energy.

Dones, Roberto; Bauer, Christian; Bollinger, Rita; Burger, Bastian; Heck, Thomas; Röder, Alexander et al. (2007): Life Cycle Inventories of Energy Systems: Results for Current Systems in Switzerland and other UCTE Countries. Paul Scherrer Institut; ESU-services.

Elsam Engineering (2004): Life Cycle Assessment of offshore and onshore sited wind farms.

EU (2010): Critical Raw Materials for the EU 2010. Hg. v. European Commission.

EU (2014a): Critical Raw Material Profiles. Unter Mitarbeit von Claudia Wulz. Hg. v. European Commission. ENTR.

EU (2014b): Critical Raw Materials for the EU 2014. Hg. v. European Commission.

- EU (2014c): Non-Critical Raw Material Profiles. Unter Mitarbeit von Adrian Chapman. Hg. v. European Commission.
- Flury, Karin; Frischknecht, Rolf (2012): Life Cycle Inventories of Hydroelectric Power Generation. Öko-Institute e.V.
- Frick, Stephanie; Kaltschmitt, Martin; Schröder, Gerd (2010): Life cycle assessment of geothermal binary power plants using enhanced low-temperature reservoirs. In: *Energy* 35 (5), S. 2281–2294. DOI: 10.1016/j.energy.2010.02.016.
- Fritsche, Uwe R. (2001): GEMIS. Globales Emissions-Modell Integrierter Systeme. Version 4.9: Internationales Institut für Nachhaltigkeitsanalysen und -strategien.
- Gaines, Linda; Sullivan, John; Burnham, Andrew; Bellharouak, Ilias (2011): Life-Cycle Analysis for Lithium-Ion Battery Production and Recycling. Argonne National Laboratory.
- Gerst, Michael D.; Graedel, T. E. (2008): In-Use Stocks of Metals: Status and Implications. In: *Environ. Sci. Technol.* 42 (19), S. 7038–7045. DOI: 10.1021/es800420p.
- Graedel, T. E.; Barr, Rachel; Chandler, Chelsea; Chase, Thomas; Choi, Joanne; Christoffersen, Lee et al. (2012): Methodology of metal criticality determination. In: *Environmental science & technology* 46 (2), S. 1063–1070. DOI: 10.1021/es203534z.
- Graedel, T. E.; Gunn, Gus; Espinoza, Luis Tercero (2014): Metal resources, use and Criticality.
- Guezuraga, Begoña; Zauner, Rudolf; Pölz, Werner (2012): Life cycle assessment of two different 2 MW class wind turbines. In: *Renewable Energy* 37 (1), S. 37–44. DOI: 10.1016/j.renene.2011.05.008.
- Handley, C.; Brandon, N. P.; van der Vorst, R. (2002): Impact of the European Union vehicle waste directive on end-of-life options for polymer electrolyte fuel cells. In: *Journal of Power Sources* 106 (1-2), S. 344–352. DOI: 10.1016/S0378-7753(01)01019-9.
- Heath, Garvin A.; Burkhardt, John J.; Turchi, Craig S. (2013): Life Cycle Environmental Impacts resulting from the Manufacture of the Heliostat Field for a Reference Power Tower Design in the United States: Preprint. National Renewable Energy Laboratory.
- Heath, Garvin A.; Turchi, Craig S. (2009): Life Cycle Assessment of a Parabolic Trough Concentrating Solar Power Plant and Impacts of Key Design Alternatives: Preprint. National Renewable Energy Laboratory.
- Hertwich, Edgar G.; Gibon, Thomas; Bouman, Evert A.; Arvesen, Anders; Suh, Sangwon; Heath, Garvin A. et al. (2014): Integrated life-cycle assessment of electricity-supply scenarios confirms global environmental benefit of low-carbon technologies. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. DOI: 10.1073/pnas.1312753111.

- Hess, Denis (2013): Fernübertragung regelbarer Solarenergie von Nordafrika nach Mitteleuropa. Diplomarbeit. Universität Stuttgart, Stuttgart. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt.
- IEEE (2010): IEEE guide for the selection, testing, application, and installation of cables having radial-moisture barriers and/or longitudinal water blocking. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers.
- ISE (2014): Photovoltaics Report. Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme. Freiburg, 24.10.2014.
- Jorge, Raquel Santos; Hawkins, Troy R.; Hertwich, Edgar G. (2012a): Life cycle assessment of electricity transmission and distribution—part 1: power lines and cables. In: *Int J Life Cycle Assess* 17 (1), S. 9–15. DOI: 10.1007/s11367-011-0335-1.
- Jorge, Raquel Santos; Hawkins, Troy R.; Hertwich, Edgar G. (2012b): Life cycle assessment of electricity transmission and distribution—part 2: transformers and substation equipment. In: *Int J Life Cycle Assess* 17 (2), S. 184–191. DOI: 10.1007/s11367-011-0336-0.
- JRC (2011): Critical Metals in Strategic Energy Technologies. Assessing Rare Metals as Supply-Chain Bottlenecks in Low-Carbon Energy Technologies. Unter Mitarbeit von R. L. Moss, E. Tzimas, H. Kara, P. Willis und J. Kooroshy. JRC – Institute for Energy and Transport; Oakdene Hollins Ltd; The Hague Centre for Strategic Studies.
- Jungbluth, Niels; Stucki, Matthias; Flury, Karin; Frischknecht, Rolf; Büsser, Sybille (2012): Life Cycle Inventories of Photovoltaics. ESU-services.
- Lifton, Jack (2011): Keynote: What Makes a Material Critical for Sustainable Energy. Critical Materials in Sustainable Energy Applications. Tech Metals Research. Resnick Sustainability Institute, 14.04.2011. Online verfügbar unter <http://resnick.caltech.edu/e-presentations-cm.php>, zuletzt geprüft am 03.12.2014.
- Lutz, Ferdinand (2010): Die Verfügbarkeit knapper, strategisch wichtiger Metalle. Risiken und Herausforderungen. Hg. v. Denkwerk Zukunft. Bonn.
- Mann, Margaret K.; Spath, Pamela L. (1997): Life Cycle Assessment of a Biomass Gasification Combined-Cycle System. National Renewable Energy Laboratory.
- Mason, J. E.; Fthenakis, V. M.; Hansen, T.; Kim, H. C. (2006): Energy payback and life-cycle CO₂ emissions of the BOS in an optimized 3·5 MW PV installation. In: *Prog. Photovolt: Res. Appl.* 14 (2), S. 179–190. DOI: 10.1002/pip.652.
- May, Nadine (2005): Ökobilanz eines Solarstromtransfers von Nordafrika nach Europa. Diplomarbeit. Technische Universität Braunschweig, Braunschweig. Fakultät für Physik und Geowissenschaften.

- Meier, Paul J. (2002): Life-Cycle Assessment of Electricity Generation Systems and Applications for Climate Change Policy Analysis. Dissertation. University of Wisconsin, Wisconsin. Fusion Technology Institute.
- Nes, Rasmus Nikolai (2012): Life cycle assessment of an offshore electricity grid interconnecting Northern Europe. Master Thesis. Norwegian University of Science and Technology, Trondheim.
- OECD (2008): Measuring Material Flows and Resource Productivity.
- Pacca, Sergio; Horvath, Arpad (2002): Greenhouse Gas Emissions from Building and Operating Electric Power Plants in the Upper Colorado River Basin. In: *Environ. Sci. Technol.* 36 (14), S. 3194–3200. DOI: 10.1021/es0155884.
- Reichl, C.; Schatz, M.; Zsak, G. (2014): World Mining Data. Hg. v. International Organizing Committee for the World Mining Congresses. Wien.
- Rule, Bridget M.; Worth, Zeb J.; Boyle, Carol A. (2009): Comparison of Life Cycle Carbon Dioxide Emissions and Embodied Energy in Four Renewable Electricity Generation Technologies in New Zealand. In: *Environ. Sci. Technol.* 43 (16), S. 6406–6413. DOI: 10.1021/es900125e.
- Rydh, Carl Johan (1999): Environmental assessment of vanadium redox and lead-acid batteries for stationary energy storage. In: *Journal of Power Sources* 80 (1-2), S. 21–29. DOI: 10.1016/s0378-7753(98)00249-3.
- Schleisner, L. (2000): Life cycle assessment of a wind farm and related externalities. In: *Renewable Energy* 20 (3), S. 279–288. DOI: 10.1016/S0960-1481(99)00123-8.
- Scholz, Yvonne (2012): Renewable energy based electricity supply at low costs. Development of the REMix model and application for Europe. Dissertation. Universität Stuttgart, Stuttgart. Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik.
- Schwaiger, K. (1996): Ganzheitliche energetische Bilanzierung der Energiebereitstellung (GaBiE). Forschungsstelle für Energiewirtschaft. München.
- Spath, Pamela L.; Mann, Margaret K.; Kerr, Dawn R. (1999): Life Cycle Assessment of Coal-fired Power Production. National Renewable Energy Laboratory.
- SRU (2011): Wege zur 100 % erneuerbaren Stromversorgung. Hg. v. Sachverständigenrat für Umweltfragen.
- Streicher, Kai Nino (2014): Sustainable energy system pathways. Development and assessment of an indicatorbased model approach to enhance sustainability of future energy technology pathways in Germany (SEnSys). Linköpings Universitet, Linköping.
- Strubel, Volker (2008): Hydrogen Storage Systems for Automotive Application. MAGNA STEYR Fahrzeugtechnik.

- Sullivan, J. L.; Clark, C. E.; Han, J.; Wang, M. (2010): Life-Cycle Analysis Results of Geothermal Systems in Comparison to Other Power Systems. Argonne National Laboratory.
- Trieb, Franz; Hess, Denis (2013): ELCALC-DE. Version 1.0: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt.
- USGS (2011): Rare Earth Elements. End Use and Recyclability. United States Geological Survey - National Minerals Information Center.
- USGS (2014): Mineral Commodity Summaries 2014. United States Geological Survey - National Minerals Information Center.
- Viebahn, Peter (2014): Kritische mineralische Ressourcen und Stoffströme bei der Transformation des deutschen Energieversorgungssystems. Wuppertal Institut.
- Viebahn, Peter; Kronshage, Stefan; Trieb, Franz; Lechon, Yolanda (2008): Final report on technical data, costs, and life cycle inventories of solar thermal power plants. NEEDS Deliverable n° 12.2 - RS Ia. DLR, CIEMAT.
- Wagner, Norbert (2014): Lithium-Ionen Batterien und deren zukünftige Technologieausführungen sowie Anwendungsfelder. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Stuttgart, 02.10.2014. Persönliches Gespräch.
- Watanabe, Yasushi (2011): Talk 2: Japanese Approach Toward Critical Materials. Critical Materials in Sustainable Energy Applications. Japanese Institute for Geo-resources and Environment. Resnick Sustainability Institute, 14.04.2011. Online verfügbar unter <http://resnick.caltech.edu/e-presentations-cm.php>, zuletzt geprüft am 03.12.2014.
- White, Scott W.; Kulcinski, Gerald L. (1998): "Birth to Death" Analysis of the Energy Payback Ratio and CO₂ Gas Emission Rates from Coal, Fission, Wind, and DT Fusion Electrical Power Plants. Fusion Technology Institute University of Wisconsin.
- Zimmermann, Till (2013): Dynamic material flow analysis of critical metals embodied in thin-film photovoltaic cells. artec Forschungszentrum Nachhaltigkeit.
- Zimmermann, Till; Rehberger, Max; Göling-Reisemann, Stefan (2013): Material Flows Resulting from Large Scale Deployment of Wind Energy in Germany. In: *Resources* 2 (3), S. 303–334. DOI: 10.3390/resources2030303.
- Zunft, Stefan (2014): Abschätzung zum Speicherinventar für adiabate Druckluftspeicher, 2014. E-Mail Korrespondenz.

A Fortsetzung Materialbedarf für Windenergie

Tabelle A-1: Spezifischer Materialbedarf für Windenergieanlagen mit Permanentmagnet

Quelle Bezeichnung	Zimmerman 2013 Direct Drive Permanentmagnetgenerator						
	Onshore	Onshore	Onshore	Offshore	Offshore	Offshore	Offshore
Leistung [MW]	1,5	2,5	3,0	5,0	7,0	12,0	24,00
Beton [t/MW]	536,67	487,24	643,50	105,60	105,60		
Stahl [t/MW]	150,66	120,19	126,81	284,20	293,16	110,90	416,42
Eisen [t/MW]	0,420	0,392	0,397	0,392	0,400	0,397	0,397
Aluminium [t/MW]	3,07	2,45	2,59	5,80	5,98	2,26	8,50
Glas [t/MW]	11,42	7,47	7,07	8,07	10,25	4,72	6,17
Kunststoffe [t/MW]	19,45	12,73	12,03	13,73	17,46	8,03	10,50
Kupfer [t/MW]	2,73	2,52	2,50	2,44	2,51	1,57	1,57
Neodym [t/MW]	0,168	0,157	0,159	0,157	0,160	0,159	0,159
Dysprosium [t/MW]	0,012	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011
Gesamt [t/MW]	724,60	633,16	795,07	420,40	435,54	128,05	443,72

Tabelle A-2: Spezifischer Materialbedarf für Windenergieanlagen mit getriebelosem Synchrongenerator

Quelle Bezeichnung	Zimmerman 2013 Direct Drive Synchrongenerator						
	Onshore	Onshore	Onshore	Offshore	Offshore	Offshore	Offshore
Leistung [MW]	1,50	2,30	3,00	5,00	7,00	12,00	24,00
Beton [t/MW]	828,33	817,39	993,20	105,60	105,60		
Stahl [t/MW]	139,55	122,12	146,44	286,55	295,12	109,35	415,36
Aluminium [t/MW]	2,85	2,49	2,99	5,85	6,02	2,23	8,48
Glas [t/MW]	8,53	7,19	9,27	4,37	5,92	4,29	5,55
Kunststoffe [t/MW]	14,53	12,24	15,79	7,43	10,08	7,30	9,45
Kupfer [t/MW]	4,80	4,61	5,07	5,56	5,64	4,92	4,90
Gesamt [t/MW]	998,60	966,04	1172,77	415,36	428,39	128,08	443,73

Tabelle A-3: Spezifischer Materialbedarf für Windenergieanlagen mit Asynchronmaschine

Quelle Bezeichnung	Zimmerman 2013 Doppelt gespeiste Asynchronmaschine						
	Onshore	Onshore	Onshore	Offshore	Offshore	Offshore	Offshore
Leistung [MW]	1,65	2,30	3,00	5,00	7,00	12,00	24,00
Beton [t/MW]	487,88	529,61	643,50	105,60	105,60		
Stahl [t/MW]	139,81	140,10	136,78	285,96	309,68	117,68	424,59
Aluminium [t/MW]	2,85	2,86	2,79	5,84	6,32	2,40	8,67
Glas [t/MW]	10,20	6,72	6,45	5,70	7,56	3,48	11,84
Kunststoffe [t/MW]	17,37	11,45	10,98	9,70	12,87	5,93	20,16
Kupfer [t/MW]	2,24	2,48	2,33	2,52	3,06	0,89	1,07
Gesamt [t/MW]	660,36	693,22	802,83	415,32	445,09	130,39	466,32

B Materialmatrix

Alle Werte in [t/MW], beziehungsweise [t/MWh] für Speicherkapazitäten

Technologie	Beton, Zement	Stahl, Eisen	Aluminium	Glas	Kunststoff	Kupfer	Blei	Graphit	NaNO ₃ KNO ₃
Photovoltaik	6,04	17,1	34,89	70,43	18,39	12,41	0	0	0
Photovoltaik (CIGS)	9,66	25,25	41,74	150	15,87	12,48	0	0	0
Photovoltaik (CdTe)	8,25	22,09	35,77	141	11,64	11,96	0	0	0
Wind Onshore	643,5	136,78	2,79	6,45	10,98	2,33	0	0	0
Wind Onshore (Nd-Fe-B)	643,5	127,21	2,59	7,07	12,03	2,5	0	0	0
Wind Offshore	0	117,68	2,4	3,48	5,93	0,89	14,72	0	0
Wind Offshore (Nd-Fe-B)	0	111,3	2,26	4,72	8,03	1,57	14,72	0	0
Laufwasserkraft	6585,6	203,92	0	0	0	3,39	0	0	0
Biomasseabfälle, Müll	159	51,9	1,3	0	0	0,6	0	0	0
Holz, Energiepflanzen, Biogas	159	51,9	1,3	0	0	0,6	0	0	0
Geothermie	468	297	0	0	0	1,3	0	0	0
Import Speicherwasserkraft	11026,3	80,32	0	0	0	3,12	0	0	0
Import regelbarer Solarstrom	932,7	425,87	5,02	127,73	15,33	22,52	18,81	0	1910,93
Gasturbinenkraftwerke	81,4	58,5	0,26	0	0	0,6	0	0	0
Steinkohlekraftwerke	250	80	0,6	0	1	1,3	0	0	0
GuD und BHKW	81,4	58,5	0,26	0	0	0,6	0	0	0
Kernkraftwerke	424,1	63,05	0,21	0	0	1,52	0	0	0
Braunkohlekraftwerke	250	100	0,6	0	1	1,3	0	0	0
Pumpspeicher	11026,3	80,32	0	0	0	3,12	0	0	0
Pumpspeicher [MWh]	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Wasserstoffspeicher	0	0,03	0,06	0	0,23	0	0	0,6	0
Wasserstoffspeicher [MWh]	0	0,12	0	0	0,18	0	0	0,9	0
Druckluftspeicher	468	297	2,5	0	0	5	0	0	0
Druckluftspeicher [MWh]	5	32	0,25	0	0	0,5	0	0	0
Lithium-Ionen-Batterie	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Lithium-Ionen-Batterie [MWh]	0	2,12	3,09	0	0,63	1,88	0	2,37	0
Vanadium-Redox-Flussbatterie	0	5,03	0	0	0,66	0,37	0	0,12	0
Vanadium-Redox-Flussbatterie [MWh]	0	0	0	0	1,33	0	0	0	0

Technologie	Silizium	Silber	Gallium	Indium	Selen	Cadmium	Tellur
Photovoltaik	7,79	0,042	0	0	0	0	0
Photovoltaik (CIGS)	0	0	0,0139	0,0173	0,0222	0	0
Photovoltaik (CdTe)	0,03	0	0	0	0	0,12	0,11
Wind Onshore	0	0	0	0	0	0	0
Wind Onshore (Nd-Fe-B)	0	0	0	0	0	0	0
Wind Offshore	0	0	0	0	0	0	0
Wind Offshore (Nd-Fe-B)	0	0	0	0	0	0	0
Laufwasserkraft	0	0	0	0	0	0	0
Biomasseabfälle, Müll	0	0	0	0	0	0	0
Holz, Energiepflanzen, Biogas	0	0	0	0	0	0	0
Geothermie	0	0	0	0	0	0	0
Import Speicherwasserkraft	0	0	0	0	0	0	0
Import regelbarer Solarstrom	0	0,01	0	0	0	0	0
Gasturbinenkraftwerke	0	0	0	0	0	0	0
Steinkohlekraftwerke	0	0	0	0	0	0	0
GuD und BHKW	0	0	0	0	0	0	0
Kernkraftwerke	0	0	0	0	0	0	0
Braunkohlekraftwerke	0	0	0	0	0	0	0
Pumpspeicher	0	0	0	0	0	0	0
Pumpspeicher [MWh]	0	0	0	0	0	0	0
Wasserstoffspeicher	0	0	0	0	0	0	0
Wasserstoffspeicher [MWh]	0	0	0	0	0	0	0
Druckluftspeicher	0	0	0	0	0	0	0
Druckluftspeicher [MWh]	0	0	0	0	0	0	0
Lithium-Ionen-Batterie	0	0	0	0	0	0	0
Lithium-Ionen-Batterie [MWh]	0	0	0	0	0	0	0
Vanadium-Redox-Flussbatterie	0	0	0	0	0	0	0
Vanadium-Redox-Flussbatterie [MWh]	0	0	0	0	0	0	0

Technologie	Neodym	Dysprosium	Vanadium	Platin	Lithium	Keramik
Photovoltaik	0	0	0	0	0	0
Photovoltaik (CIGS)	0	0	0	0	0	0
Photovoltaik (CdTe)	0	0	0	0	0	0
Wind Onshore	0	0	0	0	0	0
Wind Onshore (Nd-Fe-B)	0,159	0,0113	0	0	0	0
Wind Offshore	0	0	0	0	0	0
Wind Offshore (Nd-Fe-B)	0,159	0,0113	0	0	0	0
Laufwasserkraft	0	0	0	0	0	0
Biomasseabfälle, Müll	0	0	0	0	0	0
Holz, Energiepflanzen, Biogas	0	0	0	0	0	0
Geothermie	0	0	0	0	0	0
Import Speicherwasserkraft	0	0	0	0	0	0
Import regelbarer Solarstrom	0	0	0	0	0	0,47
Gasturbinenkraftwerke	0	0	0	0	0	0
Steinkohlekraftwerke	0	0	0	0	0	0
GuD und BHKW	0	0	0	0	0	0
Kernkraftwerke	0	0	0	0	0	0
Braunkohlekraftwerke	0	0	0	0	0	0
Pumpspeicher	0	0	0	0	0	0
Pumpspeicher [MWh]	0	0	0	0	0	0
Wasserstoffspeicher	0	0	0	0,00143	0	0
Wasserstoffspeicher [MWh]	0	0	0	0	0	0
Druckluftspeicher	0	0	0	0	0	0
Druckluftspeicher [MWh]	0	0	0	0	0	10
Lithium-Ionen-Batterie	0	0	0	0	0	0
Lithium-Ionen-Batterie [MWh]	0	0	0	0	0,15	0
Vanadium-Redox-Flussbatterie	0	0	0	0	0	0
Vanadium-Redox-Flussbatterie [MWh]	0	0	2,94	0	0	0

C Diagramme Materialsummenanalyse

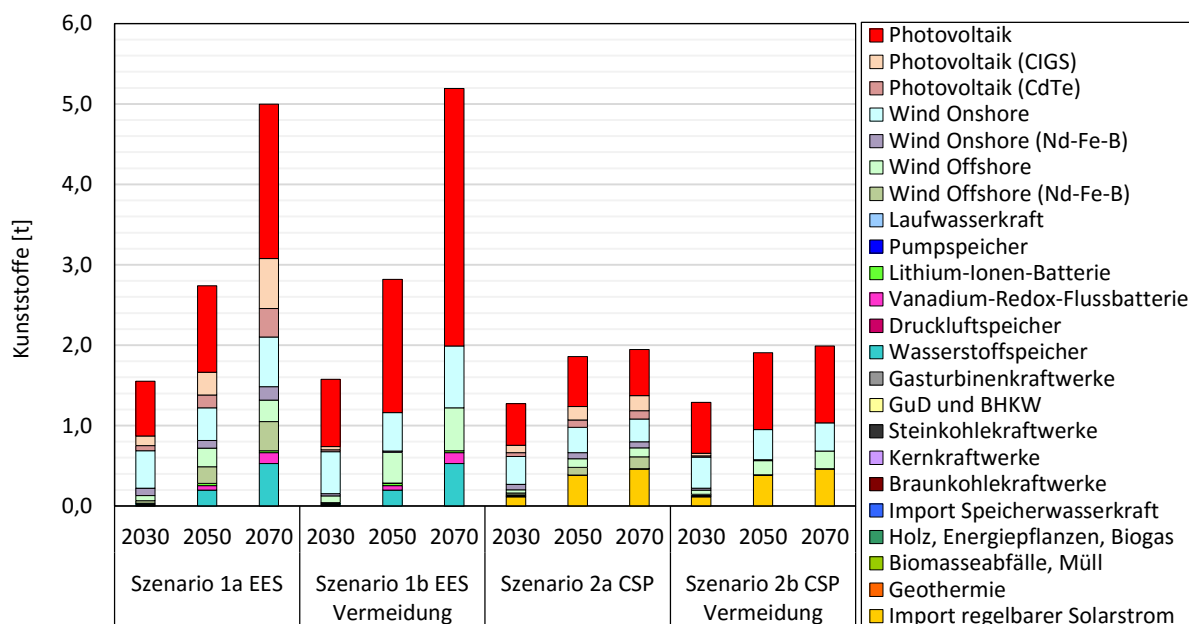


Abbildung C-1: Gesamte Materialsumme an Kunststoffen für die Szenarien 1 und 2

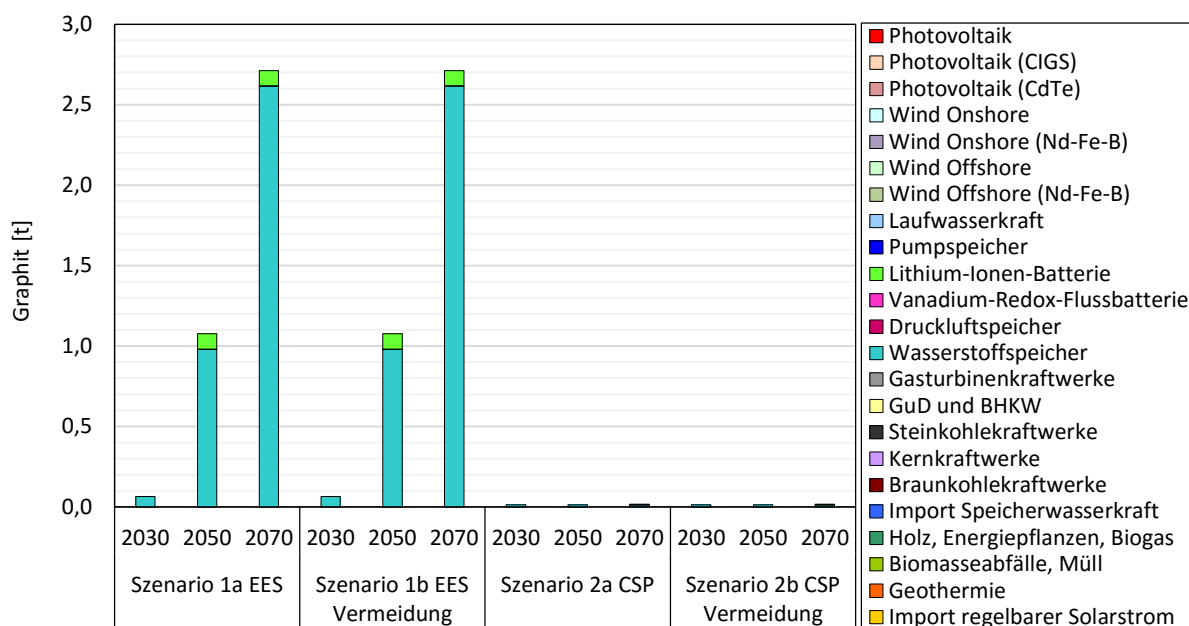


Abbildung C-2: Gesamte Materialsumme an Graphit für die Szenarien 1 und 2

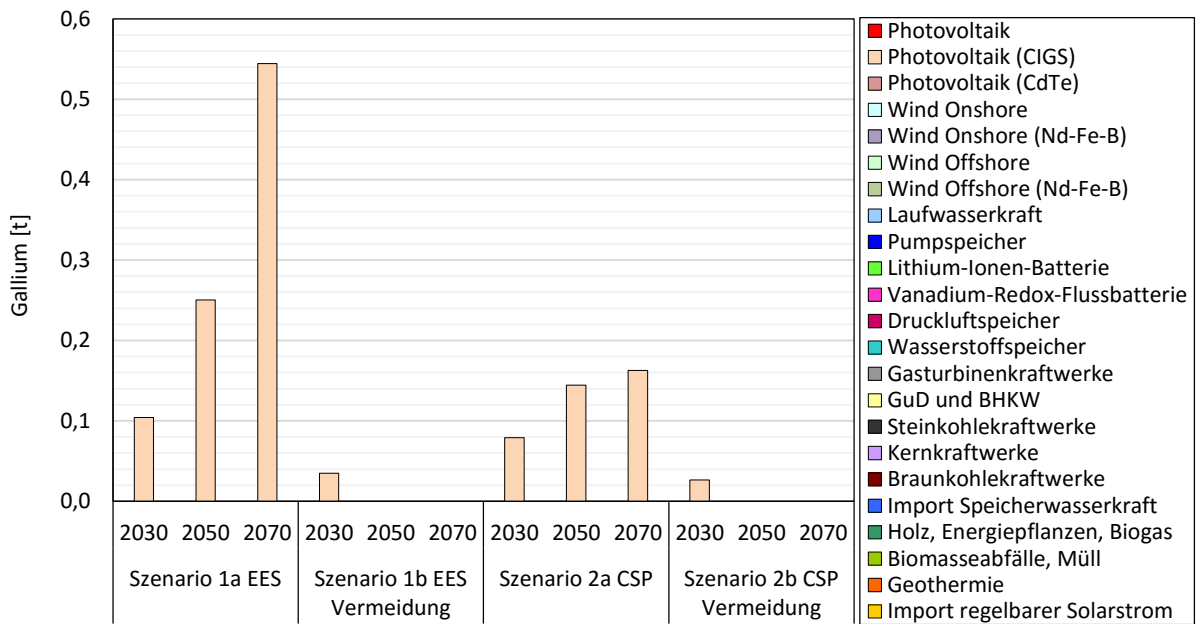


Abbildung C-3: Gesamte Materialsumme an Gallium für die Szenarien 1 und 2

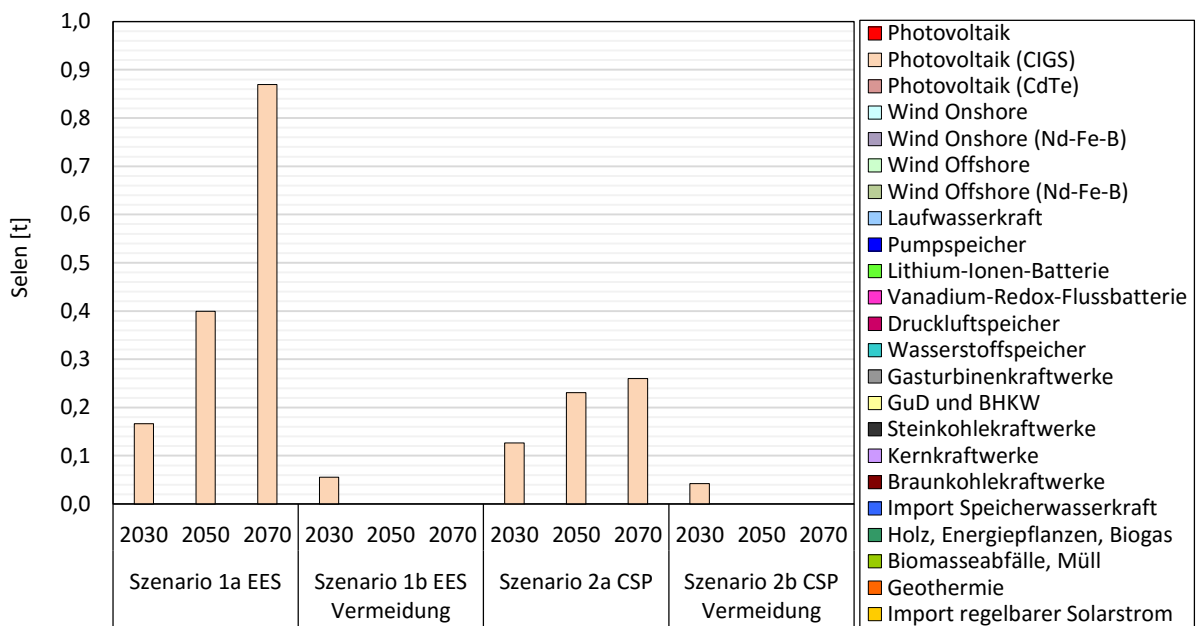


Abbildung C-4: Gesamte Materialsumme an Selen für die Szenarien 1 und 2

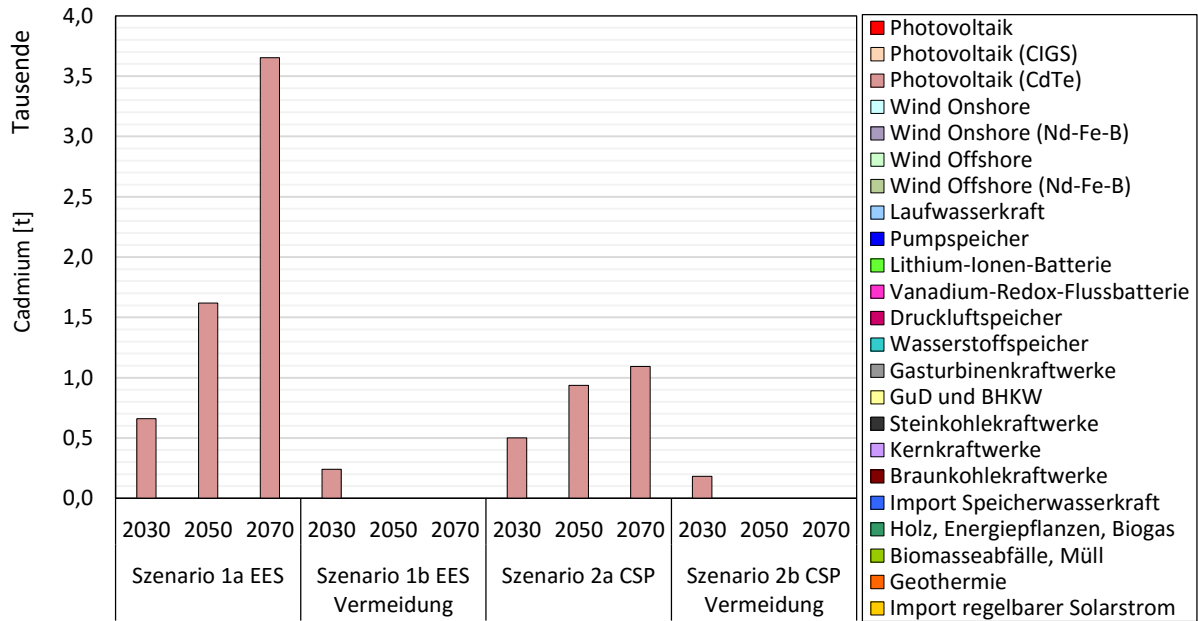


Abbildung C-5: Gesamte Materialsumme an Cadmium für die Szenarien 1 und 2

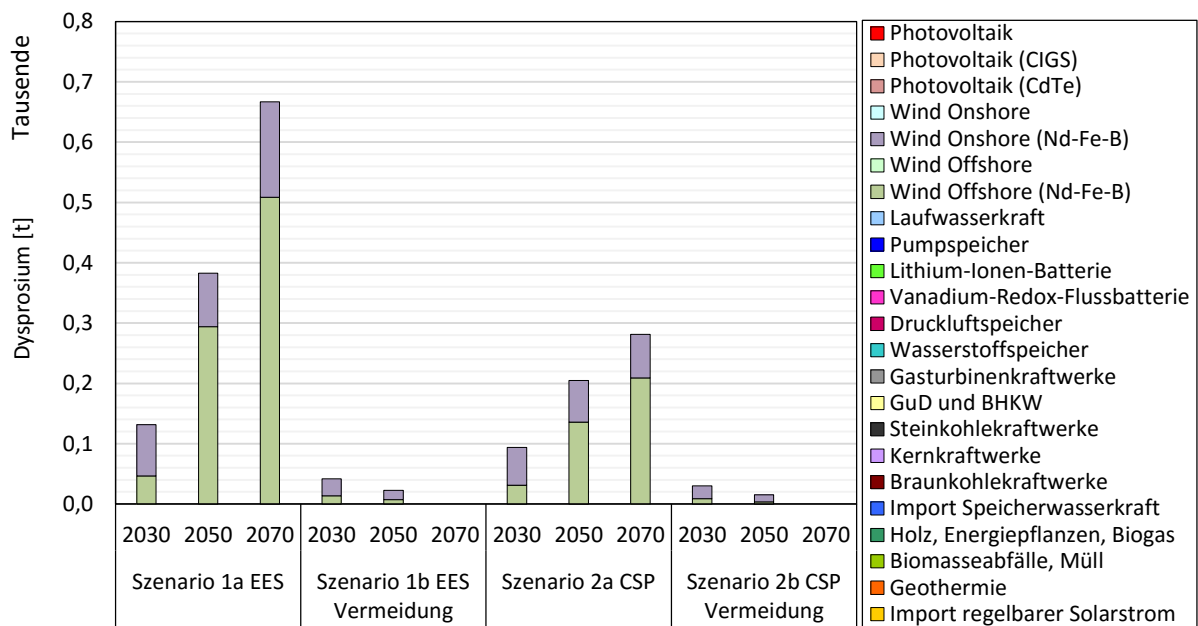


Abbildung C-6: Gesamte Materialsumme an Dysprosium für die Szenarien 1 und 2

D Tabellen Materialsummen und -flussanalyse

Eisen und Stahl

Tabelle D-1: Anteile von gebundenem Stahl und Eisen an weltweiten Reserven und Ressourcen

81 Mrd. t Eisen und Stahl Reserven (USGS 2014)			
Jahr	2030	2050	2070
Szenario 1a	0,02 %	0,04 %	0,05 %
Szenario 1b	0,02 %	0,04 %	0,05 %
Szenario 2a	0,02 %	0,04 %	0,04 %
Szenario 2b	0,02 %	0,04 %	0,04 %
230 Mrd. t Eisen und Stahl Ressourcen (USGS 2014)			
Jahr	2030	2050	2070
Szenario 1a	0,01 %	0,01 %	0,02 %
Szenario 1b	0,01 %	0,01 %	0,02 %
Szenario 2a	0,01 %	0,01 %	0,01 %
Szenario 2b	0,01 %	0,01 %	0,01 %

Tabelle D-2: Anteil der mittleren jährlichen Materialflüsse an der Jahresproduktion von Eisen und Stahl

Input					
2,75 Mrd. t Eisen und Stahl Jahresproduktion (USGS 2014)					
Dekade	2021-2030	2031-2040	2041-2050	2051-2060	2061-2070
Szenario 1a	0,04 %	0,04 %	0,05 %	0,06 %	0,07 %
Szenario 1b	0,04 %	0,04 %	0,05 %	0,06 %	0,07 %
Szenario 2a	0,04 %	0,03 %	0,04 %	0,04 %	0,04 %
Szenario 2b	0,04 %	0,03 %	0,04 %	0,03 %	0,03 %
Output					
2,75 Mrd. t Eisen und Stahl Jahresproduktion (USGS 2014)					
Dekade	2021-2030	2031-2040	2041-2050	2051-2060	2061-2070
Szenario 1a	0,03 %	0,02 %	0,02 %	0,04 %	0,05 %
Szenario 1b	0,03 %	0,02 %	0,02 %	0,04 %	0,05 %
Szenario 2a	0,03 %	0,02 %	0,02 %	0,03 %	0,04 %
Szenario 2b	0,03 %	0,02 %	0,02 %	0,03 %	0,04 %

Aluminium**Tabelle D-3:** Anteil der mittleren jährlichen Materialflüsse an der Jahresproduktion

Input		47,3 Mio. t Aluminium Jahresproduktion				
Dekade	2021-2030	2031-2040	2041-2050	2051-2060	2061-2070	
Szenario 1a	0,26 %	0,33 %	0,48 %	0,65 %	0,78 %	
Szenario 1b	0,26 %	0,32 %	0,45 %	0,62 %	0,74 %	
Szenario 2a	0,23 %	0,17 %	0,30 %	0,17 %	0,31 %	
Szenario 2b	0,21 %	0,17 %	0,26 %	0,15 %	0,26 %	
Output		47,3 Mio. t Aluminium Jahresproduktion				
Dekade	2021-2030	2031-2040	2041-2050	2051-2060	2061-2070	
Szenario 1a	0,20 %	0,15 %	0,27 %	0,31 %	0,48 %	
Szenario 1b	0,20 %	0,15 %	0,27 %	0,30 %	0,45 %	
Szenario 2a	0,19 %	0,10 %	0,24 %	0,16 %	0,30 %	
Szenario 2b	0,19 %	0,10 %	0,22 %	0,15 %	0,26 %	

Kupfer**Tabelle D-4:** Anteile von gebundenem Kupfer an weltweiten Reserven und Ressourcen

		690 Mio. t Kupfer Reserven (USGS 2014)		
Jahr		2030	2050	2070
Szenario 1a		0,13 %	0,23 %	0,40 %
Szenario 1b		0,13 %	0,23 %	0,40 %
Szenario 2a		0,13 %	0,21 %	0,23 %
Szenario 2b		0,13 %	0,21 %	0,23 %
		1,8 Mrd. t Kupfer Ressourcen (USGS 2014)		
Jahr		2030	2050	2070
Szenario 1a		0,05 %	0,09 %	0,16 %
Szenario 1b		0,05 %	0,09 %	0,15 %
Szenario 2a		0,05 %	0,08 %	0,09 %
Szenario 2b		0,05 %	0,08 %	0,09 %

Tabelle D-5: Anteil der mittleren jährlichen Materialflüsse an der Jahresproduktion von Kupfer

Input		17,9 Mio. t Kupfer Jahresproduktion				
Dekade	2021-2030	2031-2040	2041-2050	2051-2060	2061-2070	
Szenario 1a	0,30 %	0,36 %	0,51 %	0,67 %	0,80 %	
Szenario 1b	0,31 %	0,36 %	0,50 %	0,67 %	0,79 %	
Szenario 2a	0,31 %	0,28 %	0,42 %	0,27 %	0,40 %	
Szenario 2b	0,30 %	0,28 %	0,39 %	0,26 %	0,36 %	

Output		17,9 Mio. t Kupfer Jahresproduktion				
Dekade	2021-2030	2031-2040	2041-2050	2051-2060	2061-2070	
Szenario 1a	0,24 %	0,17 %	0,28 %	0,34 %	0,51 %	
Szenario 1b	0,24 %	0,17 %	0,29 %	0,34 %	0,50 %	
Szenario 2a	0,24 %	0,12 %	0,25 %	0,23 %	0,37 %	
Szenario 2b	0,24 %	0,12 %	0,24 %	0,23 %	0,35 %	

Blei**Tabelle D-6:** Anteile von gebundenem Blei an weltweiten Reserven und Ressourcen

89 Mio. t Blei Reserven (USGS 2014)			
Jahr	2030	2050	2070
Szenario 1a	0,25 %	1,08 %	1,49 %
Szenario 1b	0,25 %	1,08 %	1,49 %
Szenario 2a	0,32 %	1,02 %	1,25 %
Szenario 2b	0,32 %	1,02 %	1,25 %

2 Mrd. t Blei Ressourcen (USGS 2014)			
Jahr	2030	2050	2070
Szenario 1a	0,01 %	0,05 %	0,07 %
Szenario 1b	0,01 %	0,05 %	0,07 %
Szenario 2a	0,01 %	0,05 %	0,06 %
Szenario 2b	0,01 %	0,05 %	0,06 %

Tabelle D-7: Anteil der mittleren jährlichen Materialflüsse an der Jahresproduktion von Blei

Input		5,4 Mio. t Blei Jahresproduktion (USGS 2014)				
Dekade	2021-2030	2031-2040	2041-2050	2051-2060	2061-2070	
Szenario 1a	0,20 %	0,76 %	0,89 %	0,72 %	1,14 %	
Szenario 1b	0,21 %	0,77 %	0,91 %	0,73 %	1,14 %	
Szenario 2a	0,19 %	0,66 %	0,80 %	0,48 %	0,78 %	
Szenario 2b	0,18 %	0,66 %	0,80 %	0,48 %	0,77 %	
Output		5,4 Mio. t Blei Jahresproduktion (USGS 2014)				
Dekade	2021-2030	2031-2040	2041-2050	2051-2060	2061-2070	
Szenario 1a	0,01 %	0,08 %	0,25 %	0,38 %	0,84 %	
Szenario 1b	0,01 %	0,08 %	0,25 %	0,39 %	0,84 %	
Szenario 2a	0,01 %	0,08 %	0,26 %	0,30 %	0,62 %	
Szenario 2b	0,01 %	0,08 %	0,25 %	0,29 %	0,62 %	

Silizium**Tabelle D-8:** Anteil der mittleren jährlichen Materialflüsse an der Jahresproduktion von Silizium

Input		1,9 Mio. t Silizium Jahresproduktion (USGS 2014)				
Dekade	2021-2030	2031-2040	2041-2050	2051-2060	2061-2070	
Szenario 1a	0,88 %	1,02 %	1,47 %	1,84 %	2,35 %	
Szenario 1b	1,14 %	1,60 %	2,22 %	3,16 %	3,78 %	
Szenario 2a	0,84 %	0,49 %	1,02 %	0,43 %	1,04 %	
Szenario 2b	0,90 %	0,81 %	1,30 %	0,71 %	1,33 %	
Output		1,9 Mio. t Silizium Jahresproduktion (USGS 2014)				
Dekade	2021-2030	2031-2040	2041-2050	2051-2060	2061-2070	
Szenario 1a	0,83 %	0,58 %	0,98 %	0,90 %	1,50 %	
Szenario 1b	0,83 %	0,69 %	1,22 %	1,44 %	2,23 %	
Szenario 2a	0,82 %	0,37 %	0,92 %	0,42 %	1,04 %	
Szenario 2b	0,83 %	0,45 %	0,98 %	0,71 %	1,33 %	

Silber**Tabelle D-9:** Anteile von gebundenem Silber an weltweiten Reserven

520 Tsd. t Silber Reserven (USGS 2014)			
Jahr	2030	2050	2070
Szenario 1a	5,98 %	9,45 %	16,86 %
Szenario 1b	7,35 %	14,54 %	28,11 %
Szenario 2a	4,83 %	6,42 %	6,19 %
Szenario 2b	5,87 %	9,36 %	9,55 %

Tabelle D-10: Anteil der mittleren jährlichen Materialflüsse an der Jahresproduktion von Silber

Input					
26 Tsd. t Silber Jahresproduktion (USGS 2014)					
Dekade	2021-2030	2031-2040	2041-2050	2051-2060	2061-2070
Szenario 1a	0,35 %	0,40 %	0,58 %	0,72 %	0,93 %
Szenario 1b	0,45 %	0,63 %	0,87 %	1,24 %	1,49 %
Szenario 2a	0,34 %	0,23 %	0,44 %	0,19 %	0,44 %
Szenario 2b	0,37 %	0,35 %	0,55 %	0,31 %	0,56 %

Output					
26 Tsd. t Silber Jahresproduktion (USGS 2014)					
Dekade	2021-2030	2031-2040	2041-2050	2051-2060	2061-2070
Szenario 1a	0,33 %	0,23 %	0,38 %	0,35 %	0,59 %
Szenario 1b	0,33 %	0,27 %	0,48 %	0,57 %	0,88 %
Szenario 2a	0,32 %	0,15 %	0,37 %	0,18 %	0,43 %
Szenario 2b	0,33 %	0,18 %	0,39 %	0,30 %	0,55 %

Lithium**Tabelle D-11:** Anteile von gebundenem Lithium an weltweiten Reserven und Ressourcen

13 Mio. t Lithium Reserven (USGS 2014)			
Jahr	2030	2050	2070
Szenario 1a	0,00 %	0,05 %	0,05 %
Szenario 1b	0,00 %	0,05 %	0,05 %
Szenario 2a	0,00 %	0,00 %	0,00 %
Szenario 2b	0,00 %	0,00 %	0,00 %

39,5 Mio. t Lithium Ressourcen (USGS 2014)			
Jahr	2030	2050	2070
Szenario 1a	0,00 %	0,02 %	0,02 %
Szenario 1b	0,00 %	0,02 %	0,02 %
Szenario 2a	0,00 %	0,00 %	0,00 %
Szenario 2b	0,00 %	0,00 %	0,00 %

Tabelle D-12: Anteil der mittleren jährlichen Materialflüsse an der Jahresproduktion von Lithium

Input					
35 Tsd. t Lithium Jahresproduktion (USGS 2014)					
Dekade	2021-2030	2031-2040	2041-2050	2051-2060	2061-2070
Szenario 1a	0,09 %	0,86 %	1,09 %	0,87 %	1,08 %
Szenario 1b	0,09 %	0,86 %	1,09 %	0,87 %	1,08 %
Szenario 2a	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,03 %	0,04 %
Szenario 2b	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,03 %	0,04 %
Output					
35 Tsd. t Lithium Jahresproduktion (USGS 2014)					
Dekade	2021-2030	2031-2040	2041-2050	2051-2060	2061-2070
Szenario 1a	0,00 %	0,00 %	0,32 %	0,87 %	1,08 %
Szenario 1b	0,00 %	0,00 %	0,32 %	0,87 %	1,08 %
Szenario 2a	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,01 %
Szenario 2b	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,01 %

Vanadium

Tabelle D-13: Anteile von gebundenem Vanadium an weltweiten Reserven

14 Mio. t Vanadium Reserven (USGS 2014)			
Jahr	2030	2050	2070
Szenario 1a	0,00 %	0,84 %	2,02 %
Szenario 1b	0,00 %	0,84 %	2,02 %
Szenario 2a	0,00 %	0,00 %	0,02 %
Szenario 2b	0,00 %	0,00 %	0,02 %

Tabelle D-14: Anteil der mittleren jährlichen Materialflüsse an der Jahresproduktion von Vanadium

Input					
76 Tsd. t Vanadium Jahresproduktion (USGS 2014)					
Dekade	2021-2030	2031-2040	2041-2050	2051-2060	2061-2070
Szenario 1a	0,77 %	7,74 %	10,95 %	18,67 %	23,58 %
Szenario 1b	0,77 %	7,74 %	10,95 %	18,67 %	23,58 %
Szenario 2a	0,00 %	0,00 %	0,02 %	0,15 %	0,20 %
Szenario 2b	0,00 %	0,00 %	0,02 %	0,15 %	0,20 %
Output					
76 Tsd. t Vanadium Jahresproduktion (USGS 2014)					
Dekade	2021-2030	2031-2040	2041-2050	2051-2060	2061-2070
Szenario 1a	0,00 %	0,00 %	2,90 %	7,83 %	13,83 %
Szenario 1b	0,00 %	0,00 %	2,90 %	7,83 %	13,83 %
Szenario 2a	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,06 %
Szenario 2b	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,06 %

Gallium**Tabelle D-15:** Anteil der mittleren jährlichen Materialflüsse an der Jahresproduktion von Gallium

Input		470 t Gallium Jahresproduktion (USGS 2014)				
Dekade	2021-2030	2031-2040	2041-2050	2051-2060	2061-2070	
Szenario 1a	1,48 %	2,31 %	3,21 %	5,27 %	5,98 %	
Szenario 1b	0,51 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	
Szenario 2a	1,09 %	1,25 %	1,78 %	1,35 %	1,95 %	
Szenario 2b	0,51 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	
Output		470 t Gallium Jahresproduktion (USGS 2014)				
Dekade	2021-2030	2031-2040	2041-2050	2051-2060	2061-2070	
Szenario 1a	0,53 %	0,76 %	1,50 %	2,14 %	3,16 %	
Szenario 1b	0,51 %	0,29 %	0,57 %	0,01 %	0,00 %	
Szenario 2a	0,52 %	0,56 %	1,13 %	1,16 %	1,78 %	
Szenario 2b	0,51 %	0,17 %	0,55 %	0,01 %	0,00 %	

Indium**Tabelle D-16:** Anteile von gebundenem Indium an weltweiten Reserven

65 Tsd. t Indium Reserven (EU 2014a)				
Jahr	2030	2050	2070	
Szenario 1a	0,20 %	0,48 %	1,04 %	
Szenario 1b	0,07 %	0,00 %	0,00 %	
Szenario 2a	0,15 %	0,28 %	0,31 %	
Szenario 2b	0,05 %	0,00 %	0,00 %	

Tabelle D-17: Anteil der mittleren jährlichen Materialflüsse an der Jahresproduktion von Indium

Input		770 t jährliche Indium Raffinerieproduktion (USGS 2014)				
Dekade	2021-2030	2031-2040	2041-2050	2051-2060	2061-2070	
Szenario 1a	1,12 %	1,76 %	2,44 %	4,00 %	4,54 %	
Szenario 1b	0,39 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	
Szenario 2a	0,83 %	0,95 %	1,35 %	1,03 %	1,48 %	
Szenario 2b	0,39 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	
Output		770 t jährliche Indium Raffinerieproduktion (USGS 2014)				
Dekade	2021-2030	2031-2040	2041-2050	2051-2060	2061-2070	
Szenario 1a	0,40 %	0,58 %	1,14 %	1,63 %	2,40 %	
Szenario 1b	0,39 %	0,22 %	0,43 %	0,01 %	0,00 %	
Szenario 2a	0,39 %	0,42 %	0,86 %	0,88 %	1,35 %	
Szenario 2b	0,39 %	0,13 %	0,42 %	0,01 %	0,00 %	

Cadmium**Tabelle D-18:** Anteile von gebundenem Cadmium an weltweiten Reserven

500 Tsd. t Cadmium Reserven (USGS 2014)				
Jahr	2030	2050	2070	
Szenario 1a	0,13 %	0,32 %	0,73 %	
Szenario 1b	0,05 %	0,00 %	0,00 %	
Szenario 2a	0,10 %	0,19 %	0,22 %	
Szenario 2b	0,04 %	0,00 %	0,00 %	

Tabelle D-19: Anteil der mittleren jährlichen Materialflüsse an der Jahresproduktion von Cadmium

Input 21,8 Tsd. t jährliche Cadmium Raffinerieproduktion (USGS 2014)					
Dekade	2021-2030	2031-2040	2041-2050	2051-2060	2061-2070
Szenario 1a	0,20 %	0,32 %	0,45 %	0,77 %	0,86 %
Szenario 1b	0,06 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %
Szenario 2a	0,15 %	0,18 %	0,25 %	0,20 %	0,28 %
Szenario 2b	0,06 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %

Output 21,8 Tsd. t jährliche Cadmium Raffinerieproduktion (USGS 2014)					
Dekade	2021-2030	2031-2040	2041-2050	2051-2060	2061-2070
Szenario 1a	0,07 %	0,10 %	0,21 %	0,30 %	0,44 %
Szenario 1b	0,06 %	0,05 %	0,07 %	0,00 %	0,00 %
Szenario 2a	0,06 %	0,08 %	0,15 %	0,16 %	0,25 %
Szenario 2b	0,06 %	0,03 %	0,07 %	0,00 %	0,00 %

Tellur**Tabelle D-20:** Anteile von gebundenem Tellur an weltweiten Reserven

24 Tsd. t Reserven (USGS 2014)			
Jahr	2030	2050	2070
Szenario 1a	2,52 %	6,19 %	13,96 %
Szenario 1b	0,92 %	0,00 %	0,00 %
Szenario 2a	1,92 %	3,58 %	4,17 %
Szenario 2b	0,70 %	0,00 %	0,00 %

Tabelle D-21: Anteil der mittleren jährlichen Materialflüsse an der Jahresproduktion von Tellur

Input					
450 t jährliche Tellur Raffinerieproduktion (EU 2014a)					
Dekade	2021-2030	2031-2040	2041-2050	2051-2060	2061-2070
Szenario 1a	9,05 %	14,35 %	20,00 %	34,05 %	38,29 %
Szenario 1b	2,84 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %
Szenario 2a	6,66 %	7,80 %	10,98 %	8,83 %	12,42 %
Szenario 2b	2,82 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %
Output					
450 t jährliche Tellur Raffinerieproduktion (EU 2014a)					
Dekade	2021-2030	2031-2040	2041-2050	2051-2060	2061-2070
Szenario 1a	2,91 %	4,57 %	9,13 %	13,33 %	19,64 %
Szenario 1b	2,84 %	2,22 %	3,22 %	0,07 %	0,00 %
Szenario 2a	2,87 %	3,38 %	6,84 %	7,24 %	10,99 %
Szenario 2b	2,82 %	1,48 %	3,11 %	0,05 %	0,00 %

Neodym

Tabelle D-22: Anteile von gebundenem Neodym an weltweiten Reserven

22,7 Mio. t Neodym Reserven (USGS 2014)			
Jahr	2030	2050	2070
Szenario 1a	0,01 %	0,02 %	0,04 %
Szenario 1b	0,00 %	0,00 %	0,00 %
Szenario 2a	0,01 %	0,01 %	0,02 %
Szenario 2b	0,00 %	0,00 %	0,00 %

Tabelle D-23: Anteil der mittleren jährlichen Materialflüsse an der Jahresproduktion von Neodym

Input					
21,7 Tsd. t jährliche Neodym Minenproduktion (EU 2014a)					
Dekade	2021-2030	2031-2040	2041-2050	2051-2060	2061-2070
Szenario 1a	0,57 %	0,91 %	1,26 %	1,60 %	1,85 %
Szenario 1b	0,20 %	0,05 %	0,19 %	0,00 %	0,00 %
Szenario 2a	0,37 %	0,44 %	0,66 %	0,64 %	0,73 %
Szenario 2b	0,20 %	0,04 %	0,17 %	0,00 %	0,00 %
Output					
21,7 Tsd. t jährliche Neodym Minenproduktion (EU 2014a)					
Dekade	2021-2030	2031-2040	2041-2050	2051-2060	2061-2070
Szenario 1a	0,19 %	0,10 %	0,43 %	0,68 %	1,02 %
Szenario 1b	0,20 %	0,05 %	0,19 %	0,14 %	0,10 %
Szenario 2a	0,19 %	0,08 %	0,31 %	0,39 %	0,51 %
Szenario 2b	0,20 %	0,04 %	0,17 %	0,14 %	0,08 %

Dysprosium**Tabelle D-24:** Anteile von gebundenem Dysprosium an weltweiten Reserven

1,3 Mio. t Dysprosium Reserven (USGS 2014)				
Jahr	2030	2050	2070	
Szenario 1a	0,01 %	0,03 %	0,05 %	
Szenario 1b	0,00 %	0,00 %	0,00 %	
Szenario 2a	0,01 %	0,02 %	0,02 %	
Szenario 2b	0,00 %	0,00 %	0,00 %	

Tabelle D-25: Anteil der mittleren jährlichen Materialflüsse an der Jahresproduktion von Dysprosium

Input					
1,4 Tsd. t jährliche Dysprosium Minenproduktion (EU 2014a)					
Dekade	2021-2030	2031-2040	2041-2050	2051-2060	2061-2070
Szenario 1a	0,63 %	1,01 %	1,39 %	1,76 %	2,03 %
Szenario 1b	0,22 %	0,06 %	0,21 %	0,00 %	0,00 %
Szenario 2a	0,41 %	0,48 %	0,72 %	0,70 %	0,81 %
Szenario 2b	0,22 %	0,05 %	0,18 %	0,00 %	0,00 %

Output					
1,4 Tsd. t jährliche Dysprosium Minenproduktion (EU 2014a)					
Dekade	2021-2030	2031-2040	2041-2050	2051-2060	2061-2070
Szenario 1a	0,21 %	0,11 %	0,48 %	0,75 %	1,12 %
Szenario 1b	0,22 %	0,06 %	0,21 %	0,16 %	0,11 %
Szenario 2a	0,21 %	0,08 %	0,34 %	0,43 %	0,56 %
Szenario 2b	0,22 %	0,05 %	0,18 %	0,16 %	0,09 %

Erklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe, alle Ausführungen, die anderen Schriften wörtlich oder sinngemäß entnommen wurden, kenntlich gemacht sind, die Arbeit in gleicher oder ähnlicher Fassung noch nicht Bestandteil einer Studien- oder Prüfungsleistung war, dass die Arbeit weder vollständig noch in Teilen bereits veröffentlicht wurde und das elektronische Exemplar mit den anderen (ausgedruckten) Exemplaren übereinstimmt.

Göteborg, den 16. Mai 2015

