

PolRess AP2 – Politikansätze und -instrumente

Kurzanalyse 10:

Ressourceneffizienz und High-Tech- Materialien

Anne Lambert

Martin Hirschnitz-Garbers

Ecologic Institut gemeinnützige GmbH



März 2014

PolRess – Ressourcenpolitik

Ein Projekt im Auftrag des Bundesumweltministeriums und des Umweltbundesamtes

Laufzeit 01/2012 – 05/2015

FKZ: 3711 93 103



Bundesministerium
für Umwelt, Naturschutz
und Reaktorsicherheit



Fachbegleitung UBA

Judit Kanthak

Umweltbundesamt

E-Mail: judit.kanthak@uba.de

Tel.: 0340 – 2103 – 2072

Ansprechpartner Projektteam

Dr. Klaus Jacob

Freie Universität Berlin

E-Mail: klaus.jacob@fu-berlin.de

Tel.: 030 – 838 54492

Projektpartner:



Die veröffentlichten Papiere sind Zwischen- bzw. Arbeitsergebnisse der Forschungsnehmer. Sie spiegeln nicht notwendig Positionen der Auftraggeber oder der Ressorts der Bundesregierung wider. Sie stellen Beiträge zur Weiterentwicklung der Debatte dar.

Zum Format der Kurzanalysen:

In den PolRess-Kurzanalysen werden Politikansätze und -instrumente in kurzer und präziser Form (Umfang ca. 10 Seiten) hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf Ressourceneffizienz und Ressourcenschonung untersucht. Ziel ist es, den Stand der Forschung zusammenzustellen und neue Ideen zur Weiterentwicklung einzubringen. Es werden keine neuen Daten erhoben oder generiert. Detailliertere Analysen werden für einzelne Instrumente in Form von Vertiefungsanalysen durchgeführt (siehe PolRess Website: www.ressourcenpolitik.de).

Zitationsweise: Lambert, A./Hirschnitz-Garbers, M. (2014): Ressourceneffizienz und High-Tech-Materialien. Kurzanalyse 10 im Projekt Ressourcenpolitik: Analyse der ressourcenpolitischen Debatte und Entwicklung von Politikoptionen (PolRess). www.ressourcenpolitik.de

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	IV
Tabellenverzeichnis	IV
Abkürzungsverzeichnis	V
1. Problem:	1
2. Ziel:	6
3. Analyse von Trade-offs beim Einsatz von Rohstoffen in High-Tech-Materialien	8
3.1. Materialien zum Einsatz in der High-Tech-Branche	8
3.1.1. Seltene Erden.....	15
3.1.2. Platingruppenmetalle	15
3.1.3. Stahlveredler	16
3.1.4. Zusammenschau	17
4. Handlungsoptionen zur Verringerung von Trade-offs.....	19
5. Quellenverzeichnis	21
I. Anhang	23

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: <i>Wirtschaftsstrategische Rohstoffe in der Rohstoffimportbilanz Deutschland 2010</i>	5
Box 1: Exkurs zur Illustration: Nanomaterial und -partikel	18

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Rohstoffgruppen, zugehörige Rohstoffe, Einsatzbereich und alternative Gewinnung	2
Tabelle 2: Einsatzgebiet, Ressourceneffizienzrelevanz und soziale/Umweltwirkungen ausgewählter Rohstoffe – Seltene Erden	8
Tabelle 3: Einsatzgebiet, Ressourceneffizienzrelevanz und soziale/Umweltwirkungen ausgewählter Rohstoffe – Platingruppenmetalle	10
Tabelle 4: Einsatzgebiet, Ressourceneffizienzrelevanz und soziale/Umweltwirkungen ausgewählter Rohstoffe – Stahlveredler	12
Tabelle 5: Einsatzgebiet, Ressourceneffizienzrelevanz und soziale/Umweltwirkungen Seltener Erden	23
Tabelle 6: Einsatzgebiet, Ressourceneffizienzrelevanz und soziale/Umweltwirkungen der Platingruppenmetalle	26
Tabelle 7: Einsatzgebiet, Ressourceneffizienzrelevanz und soziale/Umweltwirkungen der Stahlveredler	28

Abkürzungsverzeichnis

CCS	Carbon Capture and Storage
CFK	kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff
IKT	Informations- und Kommunikationstechnik
OLED	organische lichtemittierende Dioden
PGM	Platingruppenmetalle
PV	Photovoltaik

1. Problem:

Gemäß High-Tech-Strategie¹ und dem Deutschen Ressourceneffizienzprogramm ProgRes² bilden neue und sogenannte Zukunftstechnologien eine wesentliche Komponente, um die Ziele der Ressourcenpolitik zu erreichen und die Ressourceneffizienz zu steigern. Ressourceneffizienz bedeutet eine Steigerung der Wertschöpfung bei sinkendem Ressourceneinsatz durch ressourcenschonende Produktions- und Wirtschaftsweisen. Es wird angenommen, dass sogenannte High-Tech-Materialien oder herkömmliche Werkstoffe großtechnisch in High-Tech-Produkten eingesetzt diese Steigerung der Ressourceneffizienz ermöglichen. Zum einen durch ihre Verwendung in Zukunftstechnologien (z.B. PV, Windkraft, Nano, Leichtbau, etc.) und zum anderen dadurch, dass sie Material, Energie oder Kraftstoff einsparen helfen. Ein prominentes Beispiel hierfür ist der kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff (CFK), der im Fahrzeugbau als Ersatz von Aluminium zur erheblichen Gewichtsreduktion beiträgt.

Dabei darf jedoch nicht ausgeblendet werden, dass für die Herstellung von High-Tech-Materialien des Öfteren Rohstoffe verwendet werden, die in der Gewinnungs- und Nutzungsphase Umwelt- und Gesundheitsschäden verursachen können oder nicht wieder in den Stoffkreislauf zurückgeführt werden. Gerade im Zusammenhang mit der Identifizierung ressourceneffizienter Zukunftstechnologiepfade müssen solche möglichen Trade-offs im Sinne einer offenen Nachhaltigkeitsdebatte untersucht und benannt werden, auch unter Berücksichtigung der Möglichkeit, dass der Einsatz von High-Tech-Materialien in einem Bereich ineffizient, in einem andere jedoch effizienzsteigernd sein kann.

Legt man die Relevanz bestimmter Rohstoffe für den Einsatz in Zukunftstechnologien gemäß der High-Tech-Strategie sowie ihre wirtschaftsstrategische Bedeutung zugrunde, so ergeben sich drei Rohstoffgruppen, die maßgeblich für eine Analyse potenzieller Trade-offs in Frage kommen könnten:

- 1) Seltene Erden
- 2) Platingruppenmetalle
- 3) Stahlveredler/Refraktärmetalle.

Die folgende Tabelle 1 zeigt die Rohstoffe, die den drei Rohstoffgruppen zugeordnet werden können, mitsamt Darstellung ihres Einsatzbereiches, ihrer Herkunft und Angaben zur alternativen Gewinnung.

¹ BMBF (2010). Ideen. Innovation. Wachstum. Hightech-Strategie 2020 für Deutschland. Bonn, Berlin.

² Die Bundesregierung (2012). Deutsches Ressourceneffizienzprogramm (ProgRes). Programm zur nachhaltigen Nutzung und zum Schutz der natürlichen Ressourcen. Beschluss des Bundeskabinetts vom 29.2.2012. Berlin.

Tabelle 1: Rohstoffgruppen, zugehörige Rohstoffe, Einsatzbereich und alternative Gewinnung

Rohstoffgruppe	Zugehörige Elemente	Einsatzbereich	Herkunft	Alternative Gewinnung/ Recycling/Substitution
Seltene Erden	Scandium, Yttrium, Lanthan, Cer, Praeseodym, Neodym, Promethium, Samarium, Europium, Gadolinium, Terbium, Dysprosium, Holmium, Erbium, Thulium, Ytterbium, Lutetium	Magnete, Batterien und Akkus, Metallurgie, Poliermittel, Glas- und Keramikadditive, Leuchtstoffe	VR China, Malaysia (aufbereitete Erze aus Australien)	Steigende Nachfrage, wenig Recycling aber für Batterien und Magneten höheres Potenzial Problem: vorhandene/erzeugte Zusammensetzung und Bedarf evtl. nicht deckungsgleich
Platin- gruppen- metalle	Ruthenium	Platinlegierungen, Katalysatoren in chemisch-technischen Verfahren, Autokatalysator.	Südafrika, Russland	Recycling technisch gut möglich, geringe Recyclingquoten im Konsumgüterbereich z.B. auf Grund von KFZ-Exporten. Essentiell für KFZ-Katalysatoren, Substitution
	Rhodium	Dreiwegekatalysator, Spiegel		
	Palladium	Dreiwegekatalysator, IKT, Schmuck, Diesel-Kat, synthetische Kraftstoffe		

Rohstoff- gruppe	Zugehörige Elemente	Einsatzbereich	Herkunft	Alternative Gewinnung/ Recycling/Substitution
	Osmium	Platinlegierungen		nur innerhalb der Stoffgruppe, z.B. Palladium statt Platin (Lucas, Wilts 2011)
	Iridium	Platinlegierungen, Schmuck, UV-Schutz in Brillengläsern		
	Platin	Katalyse, IKT, Schmuck, EE, Elektrode, Diesel-Kat, synthetische Kraftstoffe, Brennstoffzellen		
Stahl- veredler	Silicium	Stahlveredlung, Solarzellen	Norwegen, China	ggf. essentiell für Gusseisen, Aluminium, Rückgewinnung aus Solarzellen
	Vanadium	Stahlveredlung, Redox-Flow Elektrizitätsspeicher	Österreich, China, Russland,	essentiell in NE-Legierungen (u.a. Ti) kein Recycling
	Chrom	Stahlveredlung	Südafrika, Indien, Kazachstan	essentiell für korrosionsfeste Stähle, Recyclingquote 13 %
	Mangan	Stahlveredlung	Südafrika	essentiell für hochzugfeste Legierungen Recyclingquote 19 %
	Nickel	Stahlveredlung, Akkus	Russland, Recycl.	Recyclingquote 32 %
	Niob	Stahlveredlung, IKT, technische Keramik	Brasilien	Geringes Potenzial für Substitution/Recycling
	Molybdän	Legierung von Stahl, Energiegewinnung, Bausektor, Schwermaschinen und im Transportwesen	Molybdänerze / Nebenprodukt bei Verhüttung von Kupfererzen	Ausbaupotenzial bei Recycling, kaum Substitutionsmöglichkeiten
	Wolfram	Stahlveredlung, Werkzeugtechnik, elektronische Bauteile, Bau	VR China, „anderes Ausland“	Substitutionsmöglichkeit begrenzt, Recycling verbreitet (besonders im industriellen Bereich, Haushaltsbereich ausbaubar)

Rohstoff- gruppe	Zugehörige Elemente	Einsatzbereich	Herkunft	Alternative Gewinnung/ Recycling/Substitution
	Blei	Stahlveredlung, Akkus, Strahlenschutz,	China, Australien, USA	essentiell für Starterbatterie Recyclingquote 55 %; aus Munition, Pigmenten und chemischen Verbindungen nahezu unmöglich

(Quelle, sofern nicht anders angegeben: IZT/Adelphi 2011)

Die vorgenannten Rohstoffgruppen und Rohstoffe machen mengenmäßig nur einen geringen Anteil des Wertes aller Rohstoffimporte nach Deutschland aus – im Jahr 2010 lag der Anteil bei 8,7%. Im Vergleich dazu entfielen auf Energieträger etwa zwei Drittel des Rohstoffwertes und auf Metallrohstoffe (inklusive NE-Basismetalle, Eisen und Stahl) nahezu ein Viertel (siehe Abbildung 1).

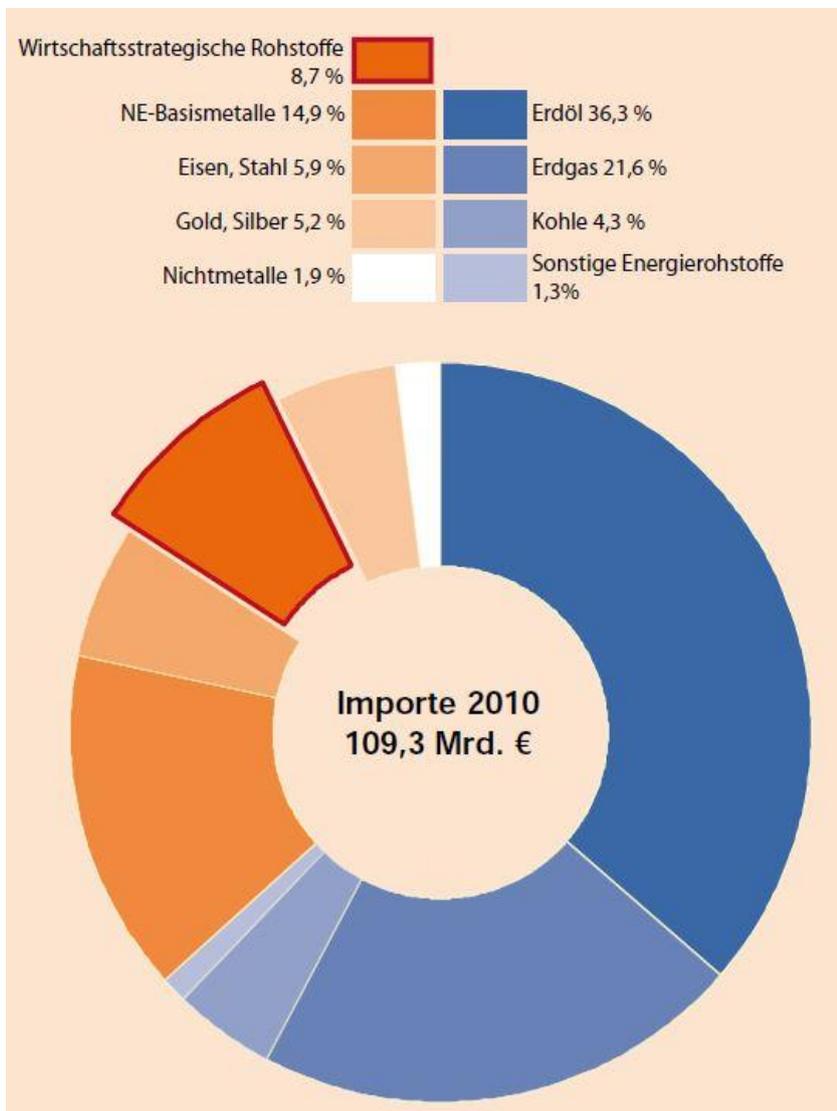


Abbildung 1: Wirtschaftsstrategische Rohstoffe in der Rohstoffimportbilanz Deutschland 2010

Quelle: BMBF-FONA 2012, S. 6

Unter wirtschaftsstrategische Rohstoffe fallen hiernach insbesondere Stahlveredler und andere High-Tech-Rohstoffe wie Seltene Erden oder Platingruppenmetalle. Diese Rohstoffe werden für die Herstellung von Spitzenprodukten und für Zukunftstechnologien benötigt (siehe Tabelle 1). Vielen der vorgenannten Rohstoffen wird gemäß IZT und adelphi (2011) eine hohe Kritikalität im Sinne von Importabhängigkeit und

ökonomischer Relevanz– und damit hohem Versorgungsrisiko bzw. hoher Verwundbarkeit der Wirtschaft – attestiert, z.B. Seltenen Erden, Palladium, Niob und Wolfram.

Bei vielen Rohstoffen für die High-Tech-Branche besteht eine Abhängigkeit von ausländischen Vorkommen und deren Abbau, so ist Deutschland bei Seltenen Erden fast ausschließlich auf Importe aus China angewiesen. Nur partiell konnten sich bisher effiziente Recyclingtechniken durchsetzen, eine hohe Abhängigkeit von primären Rohstoffen besteht weiterhin. Probleme für das Recycling der vorgenannten Rohstoffe entstehen durch niedrige Rücklaufquoten entsprechender Produkte und Materialien in Kombination mit der oftmals sehr geringen Menge der in den Produkten und Materialien enthaltenen Rohstoffe sowie durch dissipative Materialverluste in der Nutzungsphase.³ Schließlich soll anhand der Analyse der Trade-offs ein kurzer Ausblick zu möglichen Handlungsoptionen zur Minimierung der Trade-offs gegeben werden. Dieser Ausblick soll auf potenziell relevante politische Instrumente hinweisen sowie notwendige Rahmenbedingungen thematisieren.

2. Ziel:

Ziel der vorliegenden Kurzanalyse ist es, aus den im vorangehenden Kapitel benannten Rohstoffgruppen relevante Rohstoffe auszuwählen und in Bezug auf mögliche Trade-offs zu untersuchen, die sich bei ihrem Einsatz zwischen Ressourceneffizienzpotenzial auf der einen Seite und potenziellen Umwelt- und Gesundheitsschäden sowie Materialverluste auf der anderen Seite ergeben.

Um das vorgenannte Ziel zu erreichen, wurde eine umfangreiche Literaturrecherche in deutsch- und englischsprachiger Literatur entlang der relevanten Rohstoffe durchgeführt. Dazu wurden google scholar sowie die Websites relevanter Institutionen wie UBA, BMU, Europäische Kommission, Europäische Umweltagentur durchsucht. Als Stichworte kamen die folgenden Begriffe zum Einsatz: *Rohstoff / raw material, Ressource / resource, Effizienz / efficiency, High-Tech, Potenzial, Umwelt-/Gesundheitsauswirkungen / health / environmental impact*.

Die relevanten Quellen sind im Text sowie im Quellenverzeichnis aufgeführt.

Ergänzend wurden offene, leitfadenbasierte Interviews mit relevanten ExpertInnen durchgeführt. Diese wurden anhand der Stichwortsuche sowie aus der selektierten Literatur ((Co-)AutorInnen) identifiziert. Befragt wurden

1. Ulrike Meinel, NABU, Referentin für Ressourcenpolitik
2. Dr. Rolf Buschmann, BUND, Technischer Umweltschutz
3. Dr. Frank Marscheider-Wiedemann, Fraunhofer ISI, Competence Center Nachhaltigkeit und Infrastruktursysteme

Die Antworten wurden während der Interviews protokolliert.

³ z.B. Platin im Straßenstaub aus den Katalysatoren

Aus der Literatur und aus den bereits durchgeführten Interviews gehen nur für einige der in Kapitel 1 benannten Rohstoffe Angaben zu Ressourceneffizienzpotenzialen hervor – wo diese verfügbar waren, wurden sie im Rahmen dieser Studie berücksichtigt.

3. Analyse von Trade-offs beim Einsatz von Rohstoffen in High-Tech-Materialien

3.1. Materialien zum Einsatz in der High-Tech-Branche

Tabelle 2: Einsatzgebiet, Ressourceneffizienzrelevanz und soziale/Umweltwirkungen ausgewählter Rohstoffe – Seltene Erden

Rohstoff	Einsatzgebiet ⁴	Soziale und/oder Umweltwirkung	Relevanz für Ressourceneffizienz
<u>Y – Yttrium</u>	Leuchtstoffe und Lampen, Radarröhren, Supraleiter, Lambda-Sonden, ODS-Legierungen, Zündkerzen., Reaktor-Rohre, Permanentmagnete mit hoher Leistung, Heizdrähte in Ionenquellen-Massenspektrometern, Kornfeinung, Laserkristalle, Elektrolyte in Brennstoffzellen	Aufgrund der chemischen Ähnlichkeit ist bei allen Lanthanoiden und deren Verbindungen die Wirkung auf den Menschen ähnlich (Ausnahme: Das radioaktive Promethium, das aber vor allem künstlich gewonnen wird und in der Natur nur durch Spontanspaltung des Urans entsteht).	Einsatz in Zukunftstechnologien, z.B. Magnete in Elektromotoren oder Windkraftanlagen; Brennstoffzellen
<u>La - Lanthan</u>	Zündsteine, Metallurgie-Legierungen, Katalysatoren zum Cracken von Petroleum, hochwertige Kathoden, Wachstumssteigerung von Pflanzen. Zusammen mit Kobalt: Magneten, Kaltleiter, Kathode von Brennstoffzellen, Wasserstoff-Speicher in Nickel-Metallhydrid-Akkumulatoren, Stadionbeleuchtung. Medizin: als Bestandteil gut sterilisierbarer Instrumente (geringe Allergie-Neigung), Herstellung von Gläsern, Kondensatormasse, Glaspoliermittel, Glühkathoden in Elektronenröhren, Medikamente zur Senkung des	Auswirkungen der Nutzung von Seltenen Erden auf Umwelt und Gesundheit ergeben sich insbesondere in der Phase der Rohstoffgewinnung. Hier sind es vor allem der hohe Trennungsaufwand (Energie- und Chemikalieneinsatz) und das vergesellschaftete Vorkommen vieler Seltener Erden mit radioaktivem Thorium und/oder Uran. Daher erfordert die Gewinnung und Aufbereitung Seltener Erden für die	Einsatz in Zukunftstechnologien, z.B. Brennstoffzellen, Magnete für Elektromotoren, Energiespeicherung

⁴ Quelle: www.selteneerden.de.

Rohstoff	Einsatzgebiet ⁴	Soziale und/oder Umweltwirkung	Relevanz für Ressourceneffizienz
	Phosphatspiegels bei Dialysepatienten.	Weiterverwendung den Einsatz umwelt- und gesundheitsgefährdender Substanzen.	
<u>Pr - Praeseodym</u>	Extrem starke Magnete, Antriebe (Hybrid- und Elektromotoren), Färben von Emaille, Glas und Porzellan (blau), Sonnenschutzgläser, Abschirmmittel für Kernreaktoren, Energiesparlampen, Laser, CDs	Gravierende Umweltprobleme entstehen beispielsweise durch Eintrag der vorgenannten Substanzen in Böden und Gewässer; durch Exposition am Arbeitsplatz und Kontamination von Nahrung können ernsthafte Gesundheitsprobleme verursacht werden (IZT und adelphi 2011).	Einsatz in Zukunftstechnologien wie Hybrid- und Elektromotoren, Technologien zur Nutzung erneuerbarer Energien; Energiesparlampen
<u>Nd - Neodym</u>	extrem starke Magnete (z.B. Neodym-Eisen-Bor-Magnete), starke Magnetfelder für Turbinen oder hocheffektive Elektromotoren, Mikrofone oder Lautsprecher in Smartphones, Antriebe (Hybrid- und Elektromotoren), Färben von Emaille, Glas und Porzellan (blau), Sonnenschutzgläser, Laser	Das feinverteilte Metall, die Oxide und die Hydroxide reizen Augen und Schleimhäute. Die löslichen Verbindungen reichern sich in der Leber und in den Knochen an. Die kompakten Metalle sind chemisch aber relativ stabil. Da die Lanthanoide meist nur in geringen Mengen inhaliert werden - beispielsweise über den Rauch von Lichtbogenlampen - liegen für eine toxikologische Beurteilung zu wenige Daten vor.	Einsatz in Zukunftstechnologien wie Hybrid- und Elektromotoren, Technologien zur Nutzung erneuerbarer Energien
<u>Eu - Europium</u>	Roter Leuchtstoff in Farbbildröhren, photostimulierte Lumineszenz, UV-rotes Licht, Hochdruckquecksilberlampen, Energiesparlampen, Gewinnung von Szintillbarium-Kristallen, Fluoreszenzspektroskopie	Stäube von Yttrium, Scandium und deren Oxiden, können beim Einatmen in der Lunge eingelagert werden, Stäube entstehen besonders bei der Verarbeitung. Es besteht die Gefahr, dass sich eine chronische	Einsatz in Zukunftstechnologien, z.B. energiesparende Leuchtmittel
<u>Dy - Dysprosium</u>	Zusammen mit Blei: Abschirmmittel für Kernreaktoren; Bestandteil von Permanentmagneten, die in Strom-Generatoren und in Elektroautos eingesetzt werden, Energiesparlampen, Laserwerkstoffe, Glas, Halogenlampen, CDs		Einsatz in Zukunftstechnologien, z.B. Magnete in Elektromotoren, Generatoren oder

Rohstoff	Einsatzgebiet ⁴	Soziale und/oder Umweltwirkung	Relevanz für Ressourceneffizienz
		Lungenfibrose ausbildet. (Seilnacht o.J.)	Windkraftanlagen, energiesparende Leuchtmittel

Tabelle 3: Einsatzgebiet, Ressourceneffizienzrelevanz und soziale/Umweltwirkungen ausgewählter Rohstoffe – Platingruppenmetalle⁵

Rohstoff	Einsatzgebiet und Eigenschaften	Soziale und/oder Umweltwirkung	Relevanz für Ressourceneffizienz
<u>Pd - Palladium</u>	Dreiwegekatalysator, Verwendung in Brennstoffzellen als Elektrodenmaterial, Speichermaterial für Wasserstoff in zukünftigen Wasserstoffauto. Medizin: Einsatz in der Zahntechnik	Nickelallergiker sprechen zum Teil auch auf Palladiummetall an, vereinzelt Zahnfleischentzündungen nach Zahnsanierungen mit Palladium-Dentallegierungen, Palladiumstäube aus Autokatalysatoren haben vermutlich ein ähnlich toxisches Potenzial wie feinverteiltes Platin.	Einsatz in Zukunftstechnologien z.B. als Wasserstoffspeicher in Elektroautos, Brennstoffzellen
<u>Ir - Iridium</u>	Platinlegierungen mit 20-30% Iridium besitzen große Härte und Korrosionsbeständigkeit, Einsatz in Medizin (u.a. Zahntechnik), Labor und elektrischen Schaltkontakten, Schmuck, UV-Schutz in Brillengläsern.	Beimengung in Dentallegierungen; da Iridium nur in geringsten Mengen beigemischt ist, liegen für eine toxikologische Beurteilung zu wenige Daten vor.	Potenzielle Erhöhung der Nutzungsdauer
<u>Pt - Platin</u>	Absorption und Aktivierung von Wasserstoff und Sauerstoff ⇒ bedeutende Rolle als Katalysator. Katalysatoren für	Autokatalysatoren emittieren fein verteilte Platin- und Palladiumstäube. Messbare	Einsatz in Zukunftstechnologien:

⁵ nach www.seilnacht.com/Lexikon/

Rohstoff	Einsatzgebiet und Eigenschaften	Soziale und/oder Umweltwirkung	Relevanz für Ressourceneffizienz
	Salpetersäureherstellung, die Ammoniaksynthese und zahlreiche andere Prozesse. Dreiwegekatalysator, in Brennstoffzellen als Elektrodenmaterial; elektrische Schaltkontakte, Heizleitern oder Thermoelemente.	Zunahme der Platinstaubkonzentration seit der Einführung des Katalysators. In wie weit die Metallstäube als Allergen oder Umweltgift in Frage kommen, ist noch nicht abschließend geklärt.	Katalysatoren, Brennstoffzellen, Kontakte
<p><i>Die für Platingruppenmetalle beschriebenen Gesundheits- und Umweltwirkungen treten überwiegend in der Nutzungsphase auf.</i></p>			

Tabelle 4: Einsatzgebiet, Ressourceneffizienzrelevanz und soziale/Umweltwirkungen ausgewählter Rohstoffe – Stahlveredler

Element	Einsatzgebiet und Eigenschaften	Soziale und/oder Umweltwirkung	Relevanz für Ressourceneffizienz
<u>Si - Silicium</u>	<p>Wie Mangan in jedem Stahl enthalten (Eisenerze enthalten Silizium, Schmelze nimmt Si aus Ofenauskleidung auf). Siliciumstähle besitzen Si-Gehalt von mehr als 0.40%. Das Metalloid erhöht die Festigkeit und Dichtigkeit, besonders bei Stahlguss. Dehnung nur wenig beeinflusst, Zugfestigkeit wird um etwa 10 kg/mm² je % Si erhöht, Streckgrenze in ähnlicher Weise. Ein hoher Si-Gehalt (ca. 14%) macht Stahl widerstandsfähig gegen chem. Einflüsse⁶</p> <p>"Wafer" (dünne Scheiben aus Silicium-Einkristall) für Mikrochips, Halbleitern, Photovoltaik (PV, Herstellung von Solarzellen).⁷</p>	<p>Siliciumverbindungen sind beim Menschen für die Struktur von Knorpel, Haut und Bindegewebe von Bedeutung.</p> <p>Silicium und seine Verbindungen gelten als wenig toxisch, das Einatmen von Stäuben sollte jedoch vermieden werden weil es zu Reizungen führen kann.⁷</p>	<p>Einsatz in Zukunftstechnologien, z.B. in PV-Anlagen</p>
<u>V - Vanadium</u>	<p>Schon geringe Zusätze verbessern die Warmfestigkeit und verringern die Überhitzungsempfindlichkeit. Schweißbarkeit kaum beeinflusst, starker Karbidbildner, erhöht Zugfestigkeit und Streckgrenze, Einsatz häufig in Verbindung mit Chrom oder Wolfram. Bau- und Werkzeugstähle.⁶</p> <p>Redox-Flow Elektrizitätsspeicher⁸</p>	<p>Vanadiumstäube und einige anorganische Verbindungen sind krebserzeugend oder keimzellenschädigend. Gefahr für Arbeiter, die längere Zeit in einem Metallverhüttungsbetrieb arbeiten und die Stäube längere Zeit einatmen (chronische Vanadiumvergiftung mit Schleimhautreizungen oder chronischen</p>	<p>Einsatz in Zukunftstechnologien</p> <p>Kann in Energiespeichern eine größere Unabhängigkeit der Nutzung erneuerbarer Energien von aktuellen Wetterverhältnissen</p>

⁶ Dynamic Steel AG (2012)

⁷ Seilnacht (o.J.)

⁸ IZT und adelphi (2011)

Element	Einsatzgebiet und Eigenschaften	Soziale und/oder Umweltwirkung	Relevanz für Ressourceneffizienz
		Lungen- oder Darmerkrankungen). ⁷	ermöglichen
<u>Cr - Chrom</u>	<p>Erhöhte Festigkeit, Dehnung gering herabgesetzt, verbesserte Warmfestigkeit und Zunderbeständigkeit. Hohe Cr-Gehalten machen Stähle rostbeständig und verschleissfest. Schweißbarkeit nimmt mit zunehmendem Cr-Gehalt ab, starker Carbiddbildner. Die Zugfestigkeit des Stahls steigt um 8–10 kg/mm² je % Cr; die Streckgrenze wird ebenfalls erhöht, jedoch nicht in gleichem Masse, verringerte Kerbschlagzähigkeit.⁹</p> <p>Hochkorrosionsfeste Legierungen für offshore Wind, Meerwasserentsalzung, CCS, maritime Tech.¹⁰</p>	Nur geringe toxische Wirkung von reinem Metall und für die Chrom(III)-salze. Die Chrom(VI)-verbindungen (Chrom(VI)-oxid) und die Chromate (Kaliumdichromat, Kaliumchromat) wirken auf Haut und Schleimhäute stark ätzend, eingenommen verursachen sie Magen- und Darmschäden, Leber- und Nierenentzündungen und gelten mit hoher Wahrscheinlichkeit als krebserzeugend, erbgutverändernd oder fortpflanzungsgefährdend. ¹¹	Einsatz in Zukunftstechnologien, CCS, Windkraftanlagen Potenzielle Erhöhung der Nutzungsdauer
<u>Ni - Nickel</u>	<p>Geringere Steigerung der Festigkeit von Stahl im Vergleich zu Silizium und Mangan, die Dehnung sinkt dabei nur wenig. Gute Durchhärtung, besonders in Verbindung mit Chrom. Chrom-Nickel-Stähle sind korrosionsfest und zunderbeständig sowie warmfest. Keine Beeinträchtigung der Schweißbarkeit, starke erhöhung der Kerbschlagzähigkeit bei Baustählen, insbesondere bei tieferen Temperaturen.⁹</p>	Nickel und seine Verbindungen gelten als stark allergieauslösende Stoffe, außerdem sind sie potenziell krebserzeugend. Eine Gefahr besteht vor allem beim Einatmen von Stäuben, aber auch bei der Berührung mit der Haut. Die Wirkung alltäglicher Legierungen z.B. aus Münzen und Essbesteck, ist noch nicht geklärt. Legierungen dürften jedoch allgemein	Einsatz in Zukunftstechnologien Einsatz in Energiespeichern ermöglicht eine größere Unabhängigkeit der Nutzung erneuerbarer Energien von aktuellen

⁹ Dynamic Steel AG (2012)

¹⁰ IZT und adelphi (2011)

¹¹ Seilnacht (o.J.)

Element	Einsatzgebiet und Eigenschaften	Soziale und/oder Umweltwirkung	Relevanz für Ressourceneffizienz
	Akkus8 Fein verteiltes Nickel kann bei höheren Temperaturen große Mengen an Wasserstoff aufnehmen ¹²	als chemisch stabiler gelten als das reine Metall. Das toxische Potenzial der Nickelverbindungen, z.B. Nickel(III)-oxid oder Nickel(IV)-oxid, ist noch größer als beim metallischen Nickel. ¹²	Wetterverhältnissen
<u>Nb - Niob</u>	Legierung von Stahl für Pipelines, den Automobilbau und als Konstruktionswerkstoff, hochfeste und leichte Stähle; IKT, technische Keramik ¹³	Bisher keine Auswirkungen auf Umwelt bekannt; Gesundheit: Staub reizt Augen und Haut ¹³	Zukunftstechnologien, potenzielle Energieeinsparung in Nutzungsphase
<p>Für alle Stahlveredler gilt, dass sie helfen den erforderlichen Einsatz von Eisen zu reduzieren - durch die Erhöhung der Festigkeit etc. kann eine geringere Masse Stahl die gewünschte Leistung erbringen. Außerdem ermöglicht der Korrosionsschutz eine längere Nutzungsdauer.</p> <p>Die beschriebenen Umweltwirkungen treten vorwiegend in der Verarbeitungsphase auf und dürften analog auch beim Recycling von Bedeutung sein.</p>			

¹² Seilnacht (o.J.)

¹³ IZT und adelphi (2011)

3.1.1. Seltene Erden

Seltene Erden werden auch als Seltenerdmetalle bezeichnet. Zu ihnen gehören die chemischen Elemente der 3. Gruppe des Periodensystems. Es sind die folgenden Metalle: Scandium (Ordnungszahl 21), Yttrium (39), Lanthan (57), sowie die 14 auf das Lanthan folgenden Elemente (58-71), die Lanthanoide. Die größte industrielle Bedeutung haben Neodym, Yttrium, Lanthan, Cer, Praseodym, Samarium, Europium, und Gadolinium (Tradium GmbH). Seltene Erden sind zwar aus vielen Teilen der Erde bekannt, meistens jedoch in einer Form, die technisch, ökonomisch und ökologisch schlecht nutzbar ist. Da sie bis vor einigen Jahren nicht als „begrenzt“ wahrgenommen wurden, fand kaum einer Verbesserung der Gewinnungsmethoden statt und Erze mit geringem Gehalt an Seltenen Erden wurden sogar teilweise auf Halden entsorgt. Bisher ist es nach wie vor billiger, die benötigten Seltenen Erden relativ ineffizient aus besonders reichen Lagerstätten zu holen. Die Seltenerden Storkwitz AG geht auf Grund der Erfahrungen mit anderen metallischen Rohstoffen, wie Gold und Kupfer, jedoch davon aus, dass es zukünftig die Möglichkeit einer fast vollständigen Nutzung der gewonnenen mineralischen Rohstoffe gibt (Borg 2012).

Die Seltenen Erden spielen eine sehr große Rolle für die Nutzung und Speicherung von erneuerbaren Energien und sind in diesem Segment kaum zu ersetzen. Häufig werden aus wirtschaftlichen Gründen Mischungen aus mehreren seltenen Erden genutzt. Eine Auftrennung ist sehr aufwändig und kostspielig (IZT und adelphi 2011) Ob sich der energetische und chemische Aufwand zur Auftrennung ökonomisch lohnt hängt davon ab, ob der Einsatz des reinen Metalls eine (wesentliche) Verbesserung gegenüber der Mischung darstellt.

Trade-offs zwischen Ressourceneffizienzpotential der eingesetzten Seltenerdmetalle und potentieller Umwelt- und Gesundheitsauswirkungen entstehen insbesondere bei der Gewinnung der Rohstoffe – die Nutzungsphase sowie die Nachbereitungsphase fallen hier kaum ins Gewicht.¹⁴ Bei Abbau der Seltenen Erden stellt ihr vergesellschaftetes Vorkommen mit radioaktivem Thorium und/oder Uran ein Problem dar, weil bei der Gewinnung radioaktiv kontaminierte Abräume entstehen, die zur radioaktiven Belastung von Mensch und Umwelt beitragen können.¹⁴ Weiterhin erfordert die Gewinnung der Metalle aus den Erzen den Einsatz umwelt- und gesundheitsschädigender Chemikalien, welche sowohl den Abraum als auch Oberflächen- und Grundwässer verunreinigen können (IZT und adelphi 2011). Zwar stellen Stäube, Oxide und Hydroxide, die insbesondere bei der Verarbeitung entstehen, eine gesundheitliche Gefahr dar, weil sie Augen und Schleimhäute reizen und eingeatmet die Lunge gefährden können. Da die kompakten Metalle chemisch relativ stabil sind, ist das Gefahrenpotenzial in der Nutzungsphase jedoch gering (Seilnacht o.J.).

3.1.2. Platingruppenmetalle

Die Platingruppenmetalle sind essentielle Bestandteile von Energiespeichern, die sowohl für Elektromobilität als auch Nutzung erneuerbarer Energien eine wichtige Rolle spielen – u.a. deswegen, da die Energiespeicher die unregelmäßige Versorgung mit Windenergie und/oder Sonneneinstrahlung abpuffern können. Darüber hinaus bilden Platingruppenmetalle eine wichtige Grundlage für die Funktionsweise von Katalysatoren und damit für Verminderung von umwelt- und gesundheitsschädlichen Abgasemissionen. Nach bisherigen Erkenntnissen sind Platingruppenmetalle in diesem Einsatzfeld, wenn überhaupt, nur durch einander ersetzbar.

¹⁴ Persönliche Kommunikation Dr. Frank Marscheider-Weidemann, Fraunhofer ISI.

Trade-offs zwischen Ressourceneffizienzpotentialen der eingesetzten Platingruppenmetalle und Umwelt- und Gesundheitsauswirkungen ergeben sich zwar zweifelsohne ebenfalls in der Phase der Gewinnung (stark abhängig von den Gewinnungsmethoden sowie den Umwelt- und Sozialstandards und deren Einhaltung in den Gewinnungsgebieten), aber im Vergleich zu den Seltenerdmetallen ist bei den Platingruppenmetallen die Nutzungsphase deutlich relevanter für Umwelt- und Gesundheitsauswirkungen. Die Platingruppenmetalle sind potenzielle Allergene, Mensch und Umwelt sind insbesondere in der Nutzungsphase exponiert. Von den drei Platingruppenmetallen, die aus Kfz-Katalysatoren emittiert werden, ist vor allem Palladium (öko-)toxikologisch relevant. Eine zuverlässige Abschätzung des Risikopotenzials bedarf jedoch weiterer toxikologischer Untersuchungen sowie Freilandstudien zur Erfassung der aktuellen Kontaminationssituation (LUBW 2005). Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass die Konzentrationen an Platingruppenmetallen, die in der Umwelt vorliegen, humantoxikologische wenig bedenklich sind und beispielsweise auch unterhalb der Allergieschwelle für Platin liegen.¹⁵ Die aus Kfz-Katalysatoren emittierten Platinmetalle gehen darüber hinaus einem möglichen Recycling unwiederbringlich verloren. Erschwerend kommt hinzu, dass ein großer Anteil an Altfahrzeugen in Länder Osteuropas und Nordafrikas ohne eine Recyclingwirtschaft für Autokatalysatoren verbracht wird.

Der Einsatz in Energiespeichern und als Kontakte birgt ein geringeres Risiko der Umweltkontamination (da Emissionen und Abgase in der Nutzungsphase signifikant weniger entstehen). Hier kommt es dann darauf an, dass die in den Energiespeichern eingesetzten Mengen an Platingruppenmetallen adäquat entsorgt und idealerweise recycelt werden, um weiterhin für ressourceneffiziente Technologien zur Verfügung zu stehen und nicht über chemische Prozesse als Emissionen in die Umwelt gelangen.

3.1.3. Stahlveredler

Eine Ressourceneffizienz-relevante Eigenschaft von Stahlveredlern ist ihre Korrosionsfestigkeit da eine entsprechende Legierung insbesondere mit Molybdän oder Chrom die Lebensdauer von Stahlkonstruktionen deutlich erhöhen und so den Ressourcenbedarf (Ersatzbeschaffung) verringern kann. Allerdings lassen es Rebound-Effekte fraglich erscheinen, ob der Einsatz moderner Stahlsorten insgesamt zu einem geringeren Ressourcenverbrauch führt. So wurde in der Automobilindustrie die Erfahrung gemacht, dass ein verringerter Ressourcenverbrauch pro Auto durch die wachsende Anzahl von Autos überkompensiert wurde (Wuppertal Institut 2008). Darüber hinaus sind einige der Elemente der Stahlveredler-Gruppe auch in der Speicherung von Energie oder der Energiegewinnung einsetzbar.

Trade-offs zwischen Ressourceneffizienzpotentialen der eingesetzten Stahlveredler und Umwelt- und Gesundheitsauswirkungen sind insbesondere bei der Gewinnung und Verarbeitung (sowie bei Aufbereitung im Sinne von Wiederverwendung) zu erwarten, in der Nutzungsphase hingegen kaum.¹⁵ Viele der genannten Stahlveredler sind zwar als Spurenelemente lebenswichtig, in größeren Mengen aber allergieauslösend oder toxisch, insbesondere die Freisetzung von Stäuben bei Abbau und Verarbeitung der stahlveredelnden Elemente ist zu vermeiden. Wenn bei der Verarbeitung der genannten Elemente angemessene Schutzmaßnahmen getroffen werden, dürfte der Nutzen die Risiken jedoch deutlich übersteigen.

¹⁵ Persönliche Kommunikation Dr. Frank Marscheider-Weidemann, Fraunhofer ISI.

Die technischen Entwicklungen führen dazu, dass Stahlveredler, aber auch andere Legierungselemente sparsamer eingesetzt werden können. Die Deutsche Bundesstiftung Umwelt sieht ein Problem darin, dass zunehmende Materialeffizienz bei manchen Rohstoffen, u.a. auch Stahlveredler, dazu führt, dass die Metalle nur noch in geringsten Mengen in den technischen Endprodukten enthalten sind. Dies wiederum erschwert das Recycling oder macht es unwirtschaftlich (DBU 2011). Die in der Produktion verringerte Menge an Legierungselementen könnte schlussendlich dem Recycling verloren gehen und müsste für eine weitere Produktion durch Primärprodukte ersetzt werden.

3.1.4. Zusammenschau

Zusammenblickend wird deutlich, dass der Einsatz der unterschiedlichen Rohstoffgruppen in High-Tech-Materialien für Zukunftstechnologien in unterschiedlichen Lebenszyklusphasen zu Trade-offs zwischen Ressourceneffizienz auf der einen und potentiellen Umwelt- und Gesundheitsauswirkungen auf der anderen Seite führt. Allen Rohstoffgruppen ist gemein, dass die Phase der Rohstoffgewinnung zu deutlichen Umwelt- und z.T. auch Gesundheitsauswirkungen führt, insbesondere durch Eingriffe in die Landschaft, Einfluss auf Grundwasserspiegel und mögliche Kontaminationen durch Chemikalien, die bei der Aufkonzentration der gewünschten Elemente eingesetzt werden. Zusätzlich sind in einigen Regionen der Schutz von Arbeitern und auch der Schutz von Anwohnern im Falle einer Havarie mangelhaft. Das Ausmaß der Auswirkungen hängt dabei von verschiedenen Faktoren ab, u.a. von

- dem Rohstoffvorkommen in Vergesellschaftung mit anderen, z.T. umwelt- und gesundheitsschädigenden Elementen
- der zur Trennung bzw. Aufbereitung der Rohstoffe erforderlichen bzw. verfügbaren und überwiegend eingesetzten Technologien und Substanzen (insbesondere umwelt- und gesundheitsgefährdende Chemikalien wie Arsen)
- den im Abbauland bzw. in der Abbauregion geltenden Umwelt-, Gesundheits- und Sozialstandards
- sowie deren Einhaltung, Kontrolle und Durchsetzung.

Für die in dieser Analyse betrachteten Rohstoffgruppen erscheinen die Seltenerdmetalle besonders bedeutsam im Sinne der Trade-offs, aufgrund der vorherrschenden Importabhängigkeit von China und dort z.T. dokumentierter Umwelt- und Gesundheitsprobleme bei der Gewinnung von Seltenerdmetallen (siehe z.B. Öko-Institut 2013). Da manche der Stahlveredler (z.B. Silicium und Vanadium) jedoch z.T. ebenfalls aus China kommen und die Gewinnung weiterer Stahlveredler und von Platingruppenmetallen in Südafrika, Russland oder Brasilien mitunter auch mit Umwelt- und Gesundheitsproblemen verbunden ist (siehe z.B. Wittmer et al. 2010), ist eine umfangreichere Analyse nötig, um die Bedeutung der Gewinnungsphase im Sinne von Trade-offs mit Ressourceneffizienzpotential bestimmter Rohstoffe detaillierter untersuchen zu können.

In diesem Zusammenhang laufen bereits Studien für das Umweltbundesamt, u.a. zu „Ansätze zur Reduzierung von Umweltbelastungen und negativen sozialen Auswirkungen bei der Gewinnung von Metallrohstoffen“ (FKZ 3712 94 315). Diese Studien sollten zur Beantwortung der Frage nach Trade-offs herangezogen werden.

Im Hinblick auf Trade-offs in der Nutzungs- und Entsorgungsphase sind die Platingruppenmetalle besonders

hervorzuheben, insbesondere mit Blick auf Emissionen aus KFZ-Katalysatoren und auf das weltweit unzureichende Recycling derselben. Für die Stahlveredler hingegen ist es neben der Gewinnungsphase auch in großem Maße die Verarbeitungs- bzw. Wiederverwendungsphase, bei der über Staubemissionen Umwelt- und Gesundheitsschäden eintreten können.

Insgesamt überwiegt damit die Gewinnungs- und Verarbeitungsphase im Sinne der Trade-offs – und damit erscheint der Großteil der Umwelt- und Gesundheitsauswirkungen, die mit dem Einsatz von Rohstoffen in High-Tech-Materialien für Ressourceneffizienz-steigernde Zukunftstechnologien verbunden sind, in die Abbauländer und die Länder mit der maßgeblichen Rohstoffverarbeitung verschoben zu sein (ecological burden shifting).

Box 1: Exkurs zur Illustration: Nanomaterial und -partikel

Der Begriff „Nanomaterial“ wird in der Literatur teilweise synonym zu „High-Tech-Material“ verwendet. Daher werden Nanomaterialien zu Illustrationszwecken auch in dieser Kurzanalyse mit betrachtet. Nanopartikel sind definiert als Partikel, die in mindestens einer Dimension eine Größe von 1 bis 100 Nanometer besitzen, also kleiner als ein Zehnmillionstel eines Meters sind (der BUND spricht sich für eine Größe bis 300nm aus, weil auch in dieser Größenordnung nanospezifische Eigenschaften auftreten). Die extreme Größenreduktion der Partikel bedingt grundlegende Änderungen der physikalisch-chemischen Eigenschaften der Stoffe, z.B. nimmt die Reaktivität mit anderen Stoffen zu, einige wasserunlösliche Stoffe werden auf Nanoebene wasserlöslich. Wegen dieser neu erschlossenen Eigenschaften kommen Nanopartikel in einer Vielzahl von High-Tech-Anwendungen zum Einsatz.

Im Allgemeinen wird in der verfügbaren Literatur davon ausgegangen, dass Nanotechnologie effiziente und ressourcenschonende Produktionstechniken und Produkte hervorbringen kann. Der BUND z.B. sieht grundsätzlich Potenzial in diesem Bereich, weist jedoch darauf hin, dass die Ökobilanz unter Einbeziehung des Lebenszyklus „nicht immer besser ist, als die von vergleichbaren konventionellen Produkten“ und fordert entsprechend eine genau Betrachtung der Lebenszyklen. Ein Vorteil könnte sein, dass chemische Effekte durch strukturelle ersetzt werde – z.B. bei Antifouling-Mitteln für Schiffe – und gefährliche chemische Substanzen durch weniger gefährliche ersetzt werden können. Dem gegenüber steht der Einsatz von Energie, Wasser und Chemikalien (z.B. Benzol als Lösungsmittel) bei der Herstellung, wodurch Abfall und Treibhausgase entstehen (BUND 2010).

Potenziale zur Ressourcenschonung durch den Einsatz von Nanomaterialien umfassen (UBA 2009):

- Miniaturisierung:
 - Einsatz magnetischer Nanopartikel in Klebeverbindungen – die Aushärtung von Klebeverbindungen und deren Lösung ist über ein magnetischen Wechselfeld möglich, dies begünstigt Recycling.
 - Verringerung von Schichtdicken
 - Nanotechnische Sensoren: Gewichtsreduktion und Funktionsoptimierung
- Energieeinsparung:
 - Nanotechnisch optimierte Kunststoffe können in Fahr- und Flugzeugen zu einer Gewichtsreduktion und daraus folgender Energieeinsparung führen.
 - OLED – doppelt so effizient wie Energiesparlampen, zehnmal so effizient wie herkömmliche Glühbirnen.
 - Effektivere Nutzung der Sonnenenergie durch die Erhöhung des Wirkungsgrads von Dünnschichtkristallen oder Entspiegelung von Solarzellen
 - Einsatz von Siliziumoxid- und Nanorußpartikeln in Autoreifen zur Reduktion des Rollwiderstands

Box 1: Exkurs zur Illustration: Nanomaterial und -partikel, Fortsetzung

Allerdings stehen Nanopartikel im Verdacht negative Umweltwirkungen zu haben, Nanoröhrchen zum Beispiel stehen im Verdacht ein ähnliches Gefährdungspotenzial zu besitzen wie Asbest. Auch ist ungeklärt welche Wirkung Nanopartikel entfalten wenn sie in einen tierischen oder menschlichen Organismus gelangen, was sie nachweislich tun (BUND 2012). Der VDI spricht sich für eine Einzelfallbewertung aus, wendet sich also gegen eine pauschale Risikobewertung für die Produktgruppe als Ganzes. Entscheidend für das Risikopotenzial ist laut UBA, ob Nanomaterialien fest in eine Matrix eingebunden sind oder nicht. Besonders kritisch ist eine Verwendung von Nanopartikeln in Wegwerfartikeln bzw. Artikeln mit kurzer Nutzungsdauer, weil bei ihnen der Produktionsaufwand in der Lebenszyklusbewertung eine große Rolle spielt und die Nanopartikel nach einer nur extrem kurzen Nutzungsdauer in die Umwelt gelangen können – mit ungewisser Wirkung.

Die Beurteilung und Regulierung von Nanomaterial, fällt unter das bestehende Chemikalien, Arzneimittel- und Lebensmittelrecht. Kritiker sehen in diesen Regelungen jedoch die speziellen Eigenschaften von freien Nanoteilchen nicht ausreichend berücksichtigt. Das Problem lässt sich z.B. an REACH verdeutlichen: Die Regelungen verlangen zwar eine Registrierung sämtlicher Stoffe, von denen in der EU mehr als eine Tonne pro Jahr produziert oder importiert wird, doch bei viele Nanomaterialien handelt es sich noch um Spezialprodukte, welche derzeit in geringeren Mengen hergestellt werden. Hinzu kommt, dass davon ausgegangen werden kann, dass bekannte und als nicht toxisch geltende Stoffe, in einer Nanovariante sehr wohl toxische Wirkung entfalten können, ein Beispiel dafür ist das Titandioxid (Verbraucherzentrale Berlin o.J.).

Bezüglich Nanomaterial wäre ein Verbot von Nanomaterial in „Wegwerfartikeln“ und Lebensmitteln und deren Verpackung denkbar, das vorerst solange gilt bis eine Risikoabschätzung und -vermeidung wissenschaftlich fundiert möglich ist, aber auch dann ist der Einsatz kritisch zu sehen, wegen des hohen Produktionsaufwands.

Der VDI befürchtet eine Überregulierung der Nanotechnologie und damit eine Behinderung der Marktfähigkeit. Stattdessen setzt er auf eine starke Eigenverantwortung der Unternehmen und Hersteller. (VDI 2013)

4. Handlungsoptionen zur Verringerung von Trade-offs

Die im vorangehenden Kapitel untersuchten Trade-offs zwischen Einsatz der Rohstoffe zur Steigerung der Ressourceneffizienz und den damit verbundenen potentiellen Umwelt- und Gesundheitsauswirkungen verdeutlichen, dass der wirtschaftsstrategische Rahmen heutiger und im Sinne von Zukunftstechnologien wohl auch künftiger Verwendungszwecke mit Umwelt- und Gesundheitsauswirkungen verbunden bleibt.

Nach vorliegender Datenlage lassen sich vermehrt potenzielle Umweltauswirkungen erkennen, insbesondere durch die Gewinnung und teilweise auch Aufbereitung bzw. Verwertung von Rohstoffen aus den drei Rohstoffgruppen – beispielsweise bei der Gewinnung von Seltenen Erden oder Chrom durch den Anfall radioaktiven Materials bzw. öko- und humantoxikologisch wirksamer Bestandteile. Aufgrund unzureichender Datenlage, aber auch wegen der relativen Stabilität der Rohstoffe in den Endprodukten lässt sich die humantoxikologische Wirkung der Verwendung der vorgenannten Rohstoffe nicht abschließend beurteilen.

Vor diesem Hintergrund erscheint es angebracht, zunächst und ganz wesentlich die Umweltstandards und deren Durchsetzung beim Abbau und bei der Aufbereitung von Rohstoffen zu verbessern sowie die Abbaumethoden durch (Einhaltung von) technologische(n) Mindeststandards umweltfreundlicher zu gestalten (z.B. bessere Sicherung der radioaktiven Materialien beim Abbau Seltener Erden gegen Auswaschung). In diesem Zusammenhang laufen bereits Studien für das Umweltbundesamt, u.a. zu

„Ansätze zur Reduzierung von Umweltbelastungen und negativen sozialen Auswirkungen bei der Gewinnung von Metallrohstoffen“ (FKZ 3712 94 315), sodass auf diese Aspekte im Rahmen dieser Kurzanalyse nicht näher eingegangen werden kann.

In der Phase der Verarbeitung (und auch der Wiederaufarbeitung) der Erze und reinen Elemente, können die Gefahren durch Schutzmaßnahmen minimiert werden. So ist zum Beispiel darauf zu achten, dass Lösungsmittel nicht in die Umwelt gelangen, was durch geschlossene Systeme und fachgerechte Entsorgung gewährleistet würde. Um Menschen und Umwelt zu schützen, müsste die Verarbeitung von Platingruppenmetallen, Stahlveredlern und Seltenerden in geschlossenen Räumen stattfinden, aus denen entstehenden Stäube abgesaugt (und sicher entsorgt) werden und die Arbeiter mit Atemschutz und evtl. geeigneter Schutzkleidung ausgestattet sind.

Eine wichtige Bedeutung kommt auch der Materialauswahl im Produktdesign zu. Hier bedarf es verstärkter Forschungs- und Innovationsförderung im Bereich der Substitution derjenigen Rohstoffe, die mit den potentiell signifikantesten Umwelt- und Gesundheitsauswirkungen verbunden sind, durch Rohstoffe mit deutlich geringeren oder nach bisherigem Kenntnisstand ausbleibenden Auswirkungen. Dabei ist jedoch zu beachten, dass Abwägungen zwischen der Funktionsfähigkeit und Performanz der Materialien und der Produkte auf der einen Seite und den durch Substitution verminderten Umwelt- und Gesundheitsbelastungen auf der anderen Seite vorzunehmen sind. Wie im Hinblick auf den Einsatz der Platingruppenmetalle in KFZ-Katalysatoren beschrieben, lassen sich manche Rohstoffe nach heutigem Stand von Wissenschaft und Technik gar nicht oder nur durch Rohstoffe mit ähnlichen Auswirkungen ersetzen. Zweifelsohne darf die Funktion des Produktes auch im Falle deutlicher Ressourceneffizienzpotentiale nicht über die Schutzgüter menschliche Gesundheit und Unversehrtheit sowie gute Umweltqualität gestellt werden, allerdings sind dazu nachvollziehbare, begründete und legitimierbare Kriterien zu entwickeln und anzulegen, in welchen Fällen das gilt bzw. nicht gilt. Damit ist es erforderlich, dass für alle Material- und Produktinnovationen eine Umwelt- und Gesundheitsverträglichkeitsprüfung nach aktuellem Stand von Wissenschaft und Technik durchgeführt wird, die gleichzeitig auf Substitutionspotentiale hinweist. Die finale Entscheidung über Marktzulassungen sollten dann durch diese Informationen angereichert und ggf. durch partizipative Prozesse und Anhörungen wie im Sinne des UVPG ergänzt werden.

Zusätzlich könnten verschiedene umweltpolitische Instrumente zum Einsatz kommen, welche die Verwendung bestimmter Rohstoffe über Preis- und Marktmechanismen (marktbasierte und marktschaffende Instrumente, z.B. Rohstoffinputsteuern oder auch z.T. dynamische Standards bezüglich Substitution oder Effizienzperformance von Wirtschaftsunternehmen) oder durch rechtliche Vorgaben (ordnungspolitische Instrumente, z.B. Verwendungsverbote oder Grenzwerte) regulieren oder über Informations- und Bildungsprozesse die Nachfrageseite (informativische Instrumente, z.B. z.T. Informationspflichten für eine verbesserte Transparenz in Lieferketten) zu beeinflussen versuchen.

5. Quellenverzeichnis

Borg, Gregor (2012): Die Zukunft der Seltenerden-Gewinnung. Seltenerden Storkwitz AG (SES AG). URL: <http://www.seltenerden-ag.de/nachhaltigkeit-ressourceneffizienz-seltenerden/>

BMBF-FONA (2012): Wirtschaftsstrategische Rohstoffe für den Hightech-Standort Deutschland - Forschungs- und Entwicklungsprogramm des BMBF für neue Rohstofftechnologien. Download: <http://www.fona.de/de/publikationen.php>

BMBF (2010). Ideen. Innovation. Wachstum. Hightech-Strategie 2020 für Deutschland. Bonn, Berlin. Download: www.bmbf.de/pub/hts_2020.pdf

BUND (2012): Nanomaterialien. URL: http://www.bund.net/themen_und_projekte/nanotechnologie/nanomaterialien/

BUND (2010): Löst Nanotechnologie unsere Umweltprobleme? Eine kritische Betrachtung der Chancen und Risiken. Berlin. URL: http://www.bund.net/fileadmin/bundnet/publikationen/nanotechnologie/20101116_nanotechnologie_umweltprobleme_broschuere.pdf

Die Bundesregierung (2012): Bericht der Bundesregierung - Zukunftsprojekte der Hightech-Strategie (HTS-Aktionsplan). Bonn, Berlin. URL: www.bmbf.de/pub/HTS-Aktionsplan.pdf

DBU (2011): 4. Ressourceneffizienz und Recycling – Strategien zum Umgang mit knappen Metallen. DBU aktuell Nr. 4 | April 2011. URL: http://www.dbu.de/708ibook64547_31497_705.html

Dynamic Steel AG (2012): LEGIERUNGSELEMENTE - Wissenswertes über die Legierungselemente von Stahl. URL: http://www.dynamicsteel.ch/de/dienstleistungen/legierungselemente_s01.htm

HTSM NL (2013): Roadmap ‚High Tech Materials‘. URL: http://www.htsm.nl/Innovatie/Roadmaps/HighTech_Materials

IZT/Adelphi (2011): Kritische Rohstoffe für Deutschland. URL: <https://www.izt.de/fileadmin/downloads/pdf/54416.pdf>

LUBW (2005): Untersuchungen zur Toxizität der Platingruppenelemente Pt, Pd und Rh. <http://www.fachdokumente.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/40254/?COMMAND=DisplayBericht&FIS=203&OBJECT=40254&MODE=METADATA>

Lucas, Thomas; Wilts, Henning (2011): Weltweite Wiedergewinnung von Platingruppenmetallen (PGM) – Meilensteinbericht des Arbeitspakts 2.2 des Projekts „Materialeffizienz und Ressourcenschonung“ (MaRess), Wuppertal Institut. URL: http://ressourcen.wupperinst.org/downloads/MaRess_AP2_3.pdf

Öko-Institut (2013). Description and critical environmental evaluation of the REE refining plant LAMP near Kuantan/Malaysia. Radiological and non-radiological environmental consequences of the plant's operation and its wastes. URL: <http://www.oeko.de/oekodoc/1628/2013-001-en.pdf>

Seilnacht, Thomas (o. J.): Naturwissenschaftliches Arbeiten - Didaktik der Naturwissenschaft. URL: <http://www.seilnacht.com>

Tradium GmbH (o.J): Das Öl der Zukunft: Seltene Erden. URL: www.selteneerden.de

UBA (2009): Nanotechnik für Mensch und Umwelt – Chancen fördern und Risiken mindern. URL: <http://www.lanuv.nrw.de/gedoerfnisse/pdf/UBA.pdf>

VDI (2013): Zukunft der Nanotechnik – Chancen erkennen, Technologie nutzen, Wettbewerbsfähigkeit stärken. URL: <http://www.vdi.de/artikel/vdi-veroeffentlicht-positionspapier-zur-nanotechnologie/>

Verbraucherzentrale Berlin (o.J.): Nanotechnologie: In Reich des Winzigen. URL: <http://www.vz-berlin.de/Nanotechnologie-Im-Reich-des-Winzigen>

Wittmer, D. et al. (2010). Umweltrelevante metallische Rohstoffe. Meilensteinbericht des Arbeitsschritts 2.1 des Projektes „Materialeffizienz und Ressourcenschonung (MaRess)“. URL: http://ressourcen.wupperinst.org/downloads/MaRess_AP2_2.pdf

Wuppertal Institut (2008): Stahl – ein Werkstoff mit Innovationspotenzial. URL: <http://epub.wupperinst.org/frontdoor/index/index/docId/3009>

Wuppertal Institut (2009): Kupfereffizienz – unerschlossenen Potenziale, neue Perspektiven. URL: http://www.umweltbundesamt.de/ressourcen/wi_uba_kupfer_RZ_web.pdf

I. Anhang

Tabelle 5: Einsatzgebiet, Ressourceneffizienzrelevanz und soziale/Umweltwirkungen Seltener Erden

Element	Einsatzgebiet	Relevanz für Ressourceneffizienz
Sc - Scandium	Stadionbeleuchtung mit Hochleistungs-Hochdrucklampen, mit Holmium und Dysprosium ergibt sich tageslichtähnliches Licht; Produktion von Laserkristallen, magnetische Datenspeicher, Katalysatoren für die Chlorwasserstoff-Herstellung, Legierungszusatz, Fahrradindustrie (Scandium ist leichter als Karbon)“	
<u>Y - Yttrium</u>	Leuchtstoffe und Lampen, Radarröhren, Supraleiter, Lambda-Sonden, ODS-Legierungen, Zündkerzen., Reaktor-Rohre, Permanentmagnete mit hoher Leistung, Heizdrähte in Ionenquellen-Massenspektrometern, Kornfeinung, Laserkristalle, Mikrowellenfilter, Elektrolyte in Brennstoffzellen	Einsatz in Zukunftstechnologien, z.B. Magnete in Elektromotoren oder Windkraftanlagen; Brennstoffzellen
<u>La - Lanthan</u>	Zündsteine, Metallurgie-Legierungen, Katalysatoren zum Cracken von Petroleum, hochwertige Kathoden, Wachstumssteigerung von Pflanzen. Zusammen mit Kobalt: Magneten, Kaltleiter, Kathode von Brennstoffzellen, Wasserstoff-Speicher in Nickel-Metallhydrid-Akkumulatoren, Stadionbeleuchtung. Medizin: als Bestandteil gut sterilisierbarer Instrumente (geringe Allergie-Neigung), Herstellung von Gläsern, Kondensatormasse, Glaspoliermittel, Glühkathoden in Elektronenröhren, Medikamente zur Senkung des Phosphatspiegels bei Dialysepatienten.	Einsatz in Zukunftstechnologien, z.B. Brennstoffzellen, Magnete für Elektromotoren, Energiespeicherung
<u>Ce - Cer</u>	In Form von Mischmetall: Zusatz für Aluminium- und Eisenbasislegierungen, Zündsteine, UV-Filter in Windschutzscheiben, Emaillefärbung, Abgaskatalysatoren, Poliermittel für die Glasindustrie, weiße Leuchtdioden, Bildröhren, selbstreinigende Backöfen, Gasentladungsröhren, Regeneration von Rußpartikelfiltern, Zahntechnik (Keramik)	Energieeffiziente Leuchtdioden
<u>Pr - Praeseodym</u>	Extrem starke Magnete, Antriebe (Hybrid- und Elektromotoren), Färben von Emaille, Glas und Porzellan (blau), Sonnenschutzgläser, Abschirmmittel für Kernreaktoren, Energiesparlampen, Laser, CDs	Einsatz in Zukunftstechnologien wie Hybrid- und Elektromotoren, Technologien zur Nutzung

Element	Einsatzgebiet	Relevanz für Ressourceneffizienz
		erneuerbarer Energien; Energiesparlampen
<u>Nd - Neodym</u>	extrem starke Magnete (z.B. Neodym-Eisen-Bor-Magnete), starke Magnetfelder auf kleinem Volumen: Turbinen oder hocheffektiven Elektromotoren, Mikrofone oder Lautsprecher in Smartphones, Antriebe (Hybrid- und Elektromotoren), Färben von Emaille, Glas und Porzellan (blau), Sonnenschutzgläser, Laser	Einsatz in Zukunftstechnologien wie Hybrid- und Elektromotoren, Technologien zur Nutzung erneuerbarer Energien
<u>Pm - Promethium</u>	Keins von Bedeutung kommt in natürlichen Mineralien nicht vor (IZT, adelphi, 2011)	
<u>Sm - Samarium</u>	Kohle-Lichtbogenlampen, Laser, Neutronenabsorber in Nuklearanlagen, Bestandteil von Kobalt-Samarium-Magneten, Absorptionsglas für infrarotes Licht, Hydrierung und Dehydrierung von Ethanol in Katalysatoren, optische Gläser, Permanent-Magnete, Tonabnehmer in der Musikindustrie	Magnete, Kathalysatoren
<u>Eu - Europium</u>	Roter Leuchtstoff in Farbbildröhren, photostimulierte Lumineszenz, UV-rotes Licht, Hochdruckquecksilberlampen, Energiesparlampen, Gewinnung von Szintillbarium-Kristallen, Fluoreszenzspektroskopie	Einsatz in Zukunftstechnologien, z.B. energiesparende Leuchtmittel
<u>Gd - Gadolinium</u>	Mikrowellen, grüner Leuchtstoff in Dioden, nachleuchtende Bildschirme, Kontrastmittel für Kernspintomographien, wieder beschreibbare CDs, Kontrolle von Uran-Brennelementen, Kältetechnik	energiesparende Leuchtmittel
Tb - Terbium	Leistungsverstärker in Neodym-Eisen-Bor-Magneten; Halbleiter (Solid State Devices), grüne Fluoreszenz in Bildschirmen, Laser zur Erzeugung von kohärentem Licht, Beschriftung wieder beschreibbarer CDs, Materialprüftechnik	Einsatz in Zukunftstechnologien, z.B. Magnete in Elektromotoren oder Windkraftanlagen
Dy - Dysprosium	Zusammen mit Blei: Abschirmmittel für Kernreaktoren; Bestandteil von Permanentmagneten, die in Strom-Generatoren und in Elektroautos eingesetzt werden, Energiesparlampen, Laserwerkstoffe, Glas, Halogenlampen, CDs	Einsatz in Zukunftstechnologien, z.B. Magnete in Elektromotoren, Generatoren oder Windkraftanlagen,

Element	Einsatzgebiet	Relevanz für Ressourceneffizienz
		energiesparende Leuchtmittel
Ho - Holmium	„Zusammen mit Yttrium: für Magnetblasenspeicher, Feststofflaser, zur Herstellung von gelbem Glas“	
Er - Erbium	Lichtwellenleiter, Laserkristalle und –herstellung (Erbium-Laser), Knochenersatz und Zahnschmelz, Leuchtstoffaktivierung in Farbbildröhren, wegen Absorptionsvermögens von Wasserstoff geeignet zur Gasspeicherung	Möglicher Wasserstoffspeicher in Akkus
Tm - Thulium	Aktivierung der Leuchtstoffe in Fernsehgeräten, Röntgenstrahlungsquelle	
Yb - Ytterbium	Kornfeinung, Verbesserung in rostfreien Stählen, Nuklearmedizin, Ytterbium-Kobalt-Eisen-Mangan-Legierung für hochwertige Dauermagneten, Verstärkung von Laserleistungen	Einsatz in Zukunftstechnologien, z.B. Magnete in Elektromotoren oder Windkraftanlagen
Lu - Lutetium	Kaum eine nennenswerte Anwendung	
Soziale und/oder Umweltwirkung		
<p>Aufgrund der chemischen Ähnlichkeit ist vermutlich bei allen Lanthanoiden und deren Verbindungen die Wirkung auf den Menschen ähnlich (Ausnahme: Das radioaktive Promethium, das aber nicht natürlich vorkommt). Das feinverteilte Metall, die Oxide und die Hydroxide reizen Augen und Schleimhäute. Die löslichen Verbindungen reichern sich in der Leber und in den Knochen an. Die kompakten Metalle sind chemisch aber relativ stabil. Da die Lanthanoide meist nur in geringen Mengen inhaliert werden - beispielsweise über den Rauch von Lichtbogenlampen - liegen für eine toxikologische Beurteilung zu wenig Daten vor. Stäube von Yttrium, Scandium und deren Oxiden, können beim Einatmen in der Lunge eingelagert werden. Es besteht die Gefahr, dass sich eine chronische Lungenfibrose ausbildet. (Quelle: Seilnacht o.J.)</p> <p>Die Auswirkungen von Seltenen Erden auf Umwelt und Gesundheit ergeben sich aus dem hohen Trennungsaufwand (Energie- und Chemikalieneinsatz) und ihrem vergesellschaftetes Vorkommen mit radioaktivem Thorium und/oder Uran. Gravierende Umweltprobleme entstehen durch Eintrag in Böden und Gewässer und durch Exposition am Arbeitsplatz und Kontamination von Nahrung können ernsthafte Gesundheitsprobleme verursacht werden. (IZT, adelphi, 2011)</p>		

(Quelle, sofern nicht anders angegeben: www.selteneerden.de)

Tabelle 6: Einsatzgebiet, Ressourceneffizienzrelevanz und soziale/Umweltwirkungen der Platingruppenmetalle

Element	Einsatzgebiet und Eigenschaften	Soziale und/oder Umweltwirkung	Relevanz für Ressourceneffizienz
Ru - Ruthenium	Fähigkeit Wasserstoff zu absorbieren, macht es zur geeignetem Katalysator für die Ammoniaksynthese; Legierungsbestandteil in Platinmetallen zur Erhöhung der Härte. Erhöhung der Korrosionsbeständigkeit in Titanlegierungen (Zugabe von 0,1% Ruthenium steigert sie um das Hundertfache) Katalysatoren in chemisch-technischen Verfahren und Autokatalysator.	Ruthenium (oder das Oxid) gelangt zusammen mit Platin feinverteilt aus dem Autokatalysator in die Umwelt. Außerdem ist es in Dentallegierungen enthalten. Da Ruthenium ein relativ seltenes Element ist und nur in Spuren eingesetzt wird, sind keine Wirkungen bekannt oder es liegen für eine toxikologische Beurteilung zu wenig Daten vor. Ruthenium(VIII)-oxid ist ähnlich giftig wie Osmium(VIII)-oxid.	Potenzielle Erhöhung der Nutzungsdauer r
Rh - Rhodium	Dreiwegekatalysator, Platin-Rhodium-Katalysator für die Salpetersäuregewinnung nach dem Ostwald-Verfahren, galvanisches Rhodinieren von Spiegeln (Mundspiegel, OP-Leuchten, Spiegelteleskope) wegen hohes Reflexionsvermögen und chemischen Beständigkeit	Feinverteilt Rhodium gelangt zusammen mit Platinstäuben aus dem Autokatalysator in die Umwelt. Für eine toxikologische Beurteilung liegen zu wenig Daten vor.	
Pd - Palladium	Dreiwegekatalysator, Verwendung in Brennstoffzellen als Elektrodenmaterial, Speichermaterial für Wasserstoff in zukünftigen Wasserstoffauto.	Nickelallergiker sprechen zum Teil auch auf Palladiummetall an, vereinzelt Zahnfleischentzündungen nach Zahnsanierungen mit Palladium-Dentallegierungen, Palladiumstäube aus Autokatalysatoren haben vermutlich ein ähnlich toxisches Potenzial wie feinverteilt Platin.	Einsatz in Zukunftstechnologien z.B. als Wasserstoffspeicher in Elektroautos, Brennstoffzellen
Os - Osmium	Hohen Preises führt zu technischer Anwendung in nur	Das kompakte Metall ist an der Luft wenig reaktiv.	

Element	Einsatzgebiet und Eigenschaften	Soziale und/oder Umweltwirkung	Relevanz für Ressourceneffizienz
	geringem Umfang. In Platin-Legierungen erhöht es zusammen mit Iridium die Härte.	Osmiumpulver wirkt schleimhautreizend und kann Kopfschmerzen und Sehstörungen auslösen. Gefahr durch Bildung von sehr toxische Osmium(VIII)-oxid in geringen Mengen bei Zimmertemperatur. Beim Berühren, Einatmen oder Verschlucken von Osmium(VIII)oxid in Form der Kristalle und deren Dämpfe besteht akute Lebensgefahr.	
Ir - Iridium	Platinlegierungen mit 20-30% Iridium besitzen große Härte und Korrosionsbeständigkeit, Einsatz in Medizin, Labor und elektrischen Schaltkontakten, Schmuck, UV-Schutz in Brillengläsern.	Beimengung in Dentallegierungen, da es nur in geringsten Mengen beigemischt ist, liegen für eine toxikologische Beurteilung zu wenig Daten vor.	Potenzielle Erhöhung der Nutzungsdauer r
Pt - Platin	Absorbition und Aktivierung von Wasserstoff und Sauerstoff ⇒ bedeutende Rolle als Katalysator. Katalysatoren für Salpetersäureherstellung, die Ammoniaksynthese und zahlreiche andere Prozesse. Dreiwegekatalysator, in Brennstoffzellen als Elektrodenmaterial; elektrische Schaltkontakte, Heizleitern oder Thermoelemente.	Autokatalysator emittieren fein verteilte Platin- und Palladiumstäuben. Messbare Zunahme der Platinstaubkonzentration durch die Einführung des Katalysators. In wie weit die Metallstäube als Allergen oder Umweltgift in Frage kommen, ist noch nicht abschließend geklärt.	Einsatz in Zukunftstechnologien: Katalysatoren, Brennstoffzellen, Kontakte

(Quelle, sofern nicht anders angegeben: [www.seilnacht.com/Lexikon/...](http://www.seilnacht.com/Lexikon/))

Tabelle 7: Einsatzgebiet, Ressourceneffizienzrelevanz und soziale/Umweltwirkungen der Stahlveredler

Element	Einsatzgebiet und Eigenschaften	Soziale und/oder Umweltwirkung	Relevanz für Ressourceneffizienz
Si - Silicium	<p>Wie Mangan in jedem Stahl enthalten (Eisenerze enthalten Silizium, Schmelze nimmt Si aus Ofenauskleidung auf). Siliziumstähle besitzen Si-Gehalt von mehr als 0.40%. Das Metalloid erhöht die Festigkeit und Dichtigkeit, besonders bei Stahlguss. Dehnung nur wenig beeinflusst, Zugfestigkeit wird um etwa 10 kg/mm² je % Si erhöht, Streckgrenze in ähnlicher Weise. Ein hoher Si-Gehalt (ca. 14%) macht Stahl widerstandsfähig gegen chem. Einflüsse ***</p> <p>"Wafer" (dünne Scheiben aus Silicium-Einkristall) für Mikrochips, Halbleitern, Photovoltaik (Herstellung von Solarzellen). **</p>	<p>Siliciumverbindungen sind beim Menschen für die Struktur von Knorpel, Haut und Bindegewebe von Bedeutung. Bei Kieselalgen ist die Hülle der Zellen aus Siliciumdioxid aufgebaut, das sie aus löslicher Kieselsäure im Wasser gewinnen. Siliciumdioxid findet sich zur Unterstützung des Gerüstbaus auch bei den Hornkieselschwämmen oder den Schachtelhalmen. Silicium und seine Verbindungen gelten als wenig toxisch, das Einatmen von Stäuben sollte jedoch vermieden werden. **</p>	<p>Einsatz in Zukunftstechnologien</p> <p>Hilft bei der Verringerung des Bedarfs an fossilen Energieträgern</p>
V - Vanadium	<p>Schon geringe Zusätze verbessern die Warmfestigkeit und verringern die Überhitzungsempfindlichkeit. Schweißbarkeit kaum beeinflusst, starker Karbidbildner, erhöht Zugfestigkeit und Streckgrenze, Einsatz häufig in Verbindung mit Chrom oder Wolfram. Bau- und Werkzeugstähle.***</p> <p>Redox-Flow Elektrizitätsspeicher*</p>	<p>Lebensnotwendiges Spurenelement für den Menschen. In chemisch gebundener Form Coenzym für den Stoffwechsel der Hormone, der Glucose, der Knochen und der Schilddrüsen. Mangelerscheinungen bisher nicht beschrieben. Vanadiumstäube und einige anorganische Verbindungen sind krebserzeugend oder keimzellenschädigend. Gefahr für Arbeiter, die längere Zeit in einem Metallverhüttungsbetrieb arbeiten und die Stäube längere Zeit einatmen (chronische</p>	<p>Einsatz in Zukunftstechnologien</p> <p>Kann in Energiespeichern eine größere Unabhängigkeit der Nutzung erneuerbarer Energien von aktuellen Wetterverhältnissen ermöglichen</p>

Element	Einsatzgebiet und Eigenschaften	Soziale und/oder Umweltwirkung	Relevanz für Ressourceneffizienz
		Vanadiumvergiftung mit Schleimhautreizungen oder chronischen Lungen- oder Darmerkrankungen). **	
Cr - Chrom	erhöhte Festigkeit, Dehnung gering herabgesetzt, verbesserte Warmfestigkeit und Zunderbeständigkeit. Hohe Cr-Gehalten machen Stähle rostbeständig und verschleissfest. Schweissbarkeit nimmt mit zunehmendem Cr-Gehalt ab, starker Carbidbildner. Die Zugfestigkeit des Stahls steigt um 8 – 10 kg/mm ² je % Cr; die Streckgrenze wird ebenfalls erhöht, jedoch nicht in gleichem Masse, verringerte Kerbschlagzähigkeit.*** Hochkorrosionsfeste Legierungen für offshore Wind, Meerwasserentsalzung, CCS, maritime Tech. *	Essenzielles Spurenelement, wichtig für Glucose- und Proteinstoffwechsel. Zusätzliche Chromversorgung kann positive Wirkung für Personen mit einer gestörten Glucosetoleranz, wie Diabetiker, haben. Nur geringe toxische Wirkung von reinem Metall und für die Chrom(III)-salze. Die Chrom(VI)-verbindungen (Chrom(VI)-oxid) und die Chromate (Kaliumdichromat, Kaliumchromat) wirken auf Haut und Schleimhäute stark ätzend, eingenommen verursachen sie Magen- und Darmschäden, Leber- und Nierenentzündungen und gelten mit hoher Wahrscheinlichkeit als krebserzeugend, erbgutverändernd oder fortpflanzungsgefährdend.**	Einsatz in Zukunftstechnologien CCS, Windkraftanlagen, Potenzielle Erhöhung der Nutzungsdauer
Mn - Mangan	Erhöhte Festigkeit des Stahls, nur wenig verringerte Dehnung. Günstige Auswirkung auf die Schmiedbarkeit und Schweissbarkeit aus. Höhere Mn-Gehalte bewirken in Verbindung mit Kohlenstoff einen grossen Verschleisswiderstand. Bis 3 % Mn wird die Zugfestigkeit der Stähle um etwa 10 kg/mm ² je % Mn erhöht. Bei Gehalten von 3 – 8 % steigt die Zugfestigkeit weniger stark, bei über 8 % Mn sinkt sie wieder. Ähnlich verhält sich die Streckgrenze. Mangan	Das Enzym Mangan-Superoxiddismutase ist ein Antioxidationsmittel und kann freie Radikale einfangen. Mangan-Enzyme können auch Cholesterin und Sexualhormone oder Gewebeproteine wie das Kollagen aufbauen. In Bergwerken oder in Batteriefabriken führte früher das Einatmen von Manganstäuben (oder auch von Mangan(IV)-oxid) über einen längeren Zeitraum zu schweren Lungenschäden. Im Endstadium dieser	Potenzielle Erhöhung der Nutzungsdauer

Element	Einsatzgebiet und Eigenschaften	Soziale und/oder Umweltwirkung	Relevanz für Ressourceneffizienz
	vergrößert besonders die Einhärtetiefe und erhöht die Korrosionsbeständigkeit. ***	Mangan-Pneumonien traten parkinsonähnliche Symptome auf. Auch durch das Trinken von Wasser, das mit Mangan(IV)-oxid verunreinigt ist, können schwere Schäden im Zentralnervensystem auftreten. Kaliumpermanganat und einige andere Manganverbindungen gelten als gewässergefährdend. **	
Ni - Nickel	Geringere Steigerung der Festigkeit von Stahl im Vergleich zu Silizium und Mangan, die Dehnung sinkt dabei nur wenig. Gute Durchhärtung, besonders in Verbindung mit Chrom. Chrom-Nickel-Stähle sind korrosionsfest und zunderbeständig sowie warmfest. Keine Beeinträchtigung der Schweißbarkeit, starke Erhöhung der Kerbschlagzähigkeit bei Baustählen, insbesondere bei tieferen Temperaturen. *** Akkus * Fein verteiltes Nickel kann bei höheren Temperaturen große Mengen an Wasserstoff aufnehmen **	Ob Nickel ein lebensnotwendiges Spurenelement für den Menschen ist, ist noch nicht eindeutig geklärt. Bei Pflanzen und bestimmten Bakterien wird es bei Enzymreaktionen benötigt. Nickel und seine Verbindungen gelten als stark allergieauslösende Stoffe, außerdem sind sie potenziell krebserzeugend. Eine Gefahr besteht vor allem beim Einatmen von Stäuben, aber auch bei der Berührung mit der Haut. Die Wirkung alltäglicher Legierungen z.B. aus Münzen und Essbesteck, ist noch nicht geklärt. Legierungen dürften jedoch allgemein als chemisch stabiler gelten als das reine Metall. Das toxische Potenzial der Nickelverbindungen, z.B. Nickel(III)-oxid oder Nickel(IV)-oxid, ist noch größer als beim metallischen Nickel. **	Einsatz in Zukunftstechnologien Einsatz in Energiespeichern ermöglicht eine größere Unabhängigkeit der Nutzung erneuerbarer Energien von aktuellen Wetterverhältnissen
Nb - Niob	Legierung von Stahl für Pipelines, den Automobilbau und als Konstruktionswerkstoff, hochfeste und leichte	Bisher keine Auswirkungen auf Umwelt bekannt; Gesundheit: Staub reizt Augen und Haut *	Zukunftstechnologien, potenzielle

Element	Einsatzgebiet und Eigenschaften	Soziale und/oder Umweltwirkung	Relevanz für Ressourceneffizienz
	Stähle; IKT, technische Keramik*		Energieeinsparung in Nutzungsphase
Mo - Molybdän	<p>Erhöhte Zug – und Warmfestigkeit günstige Auswirkung auf Schweißbarkeit, Schmiedbarkeit bei höherem Mo-Gehalt erschwert. Verwendung vielfach Verbindung mit Chrom, ähnliches Verhalten wie Wolfram. Mit Chrom und Nickel legiert, können hohe Streckgrenzen und Zähigkeitswerte erzielt werden, starker Karbidbildner. ***</p> <p>Legierung von Stahl, für die Energiegewinnung, den Bausektor, Schwermaschinen und im Transportwesen, korrosionsfeste Stähle (Meerwasserentsalzung, Offshore) *</p>	<p>Bisher keine Auswirkungen auf Umwelt und Gesundheit bekannt; Bestandteil einiger Enzyme *</p> <p>Lebensnotwendiges Spurenelement für alle Organismen. Essenziell für Verfügbarkeit von Stickstoff als Nährstoff für die Pflanzen. der menschliche Organismus benötigt Mo für den Aufbau der Harnsäure für den Transport und die Vorratshaltung von Eisen außerdem wird es für den Abbau schwefelhaltige Verbindungen wie Cystein oder Glutamin benötigt und hilft beim Umbau giftiger Sulfide zu Sulfaten.</p> <p>Molybdän ist in Dentallegierungen zugelassen, Personen, die nachweislich eine Metallallergie oder eine Autoimmunkrankheit haben, können auf diese Legierungen empfindlich reagieren.**</p>	<p>Einsatz in Zukunftstechnologien</p> <p>Potenzielle Erhöhung der Nutzungsdauer.</p>
W - Wolfram	<p>Werkzeugtechnik, elektronische Bauteile *</p> <p>Gesteigerte Festigkeit, erhöhte Härte und Schneidhaltigkeit. Bis zu einem gewissen Grade gewährleisten Wolframzusätze die Schweißbarkeit.“ ***</p>	<p>Umgebungskonzentrationen im allgemeinen unproblematisch, arbeitsrechtliche Bestimmungen für Hartmetallarbeitsplätze. *</p> <p>Das elementare Wolfram und auch einige der bekannten Verbindungen wie Wolfram(IV)-oxid oder Wolframsäure haben wohl nur ein geringes toxisches</p>	

Element	Einsatzgebiet und Eigenschaften	Soziale und/oder Umweltwirkung	Relevanz für Ressourceneffizienz
		Potenzial. **	
Pb - Blei	Akkus, Strahlenschutz, Träger für Antimon (Sb), Bismut (Bi), Indium (In), Cadmium (Cd) und Germanium (Ge) *	Von einem kompakten Bleistück dürfte keine Gefahr ausgehen, Allerdings ist zu beachten, dass ein Bleiblech relativ weich ist und sich das Blei leicht abstreift. Eine Hautresorption findet nach bisherigen Erkenntnissen aber nicht statt. Bleistäube oder Dämpfe werden beim Einatmen in der Lunge gut resorbiert. Bleistäube und viele der Verbindungen gelten als umweltgefährlich, sie schädigen das Kind im Mutterleib oder beeinträchtigen die Fruchtbarkeit. Im Blut bindet sich Blei an den Blutfarbstoff Hämoglobin und wird dadurch im ganzen Körper und auch in fast allen Organen verteilt. Es bildet in den Knochen und den Zähnen Bleiphosphat, dieses lagert sich für lange Zeit ein. Die Halbwertszeit liegt bei bis zu 30 Jahren. **	Einsatz in Zukunftstechnologien Ermöglicht eine größere Unabhängigkeit der Nutzung erneuerbarer Energien von aktuellen Wetterverhältnissen.
Für alle Stahlveredler gilt, dass sie helfen können, Eisen zu sparen. durch die Erhöhung der Festigkeit etc. kann eine geringere Masse Stahl die gewünschte Eigenschaften erfüllen. Außerdem kann der Korrosionsschutz eine längere Nutzungsdauer ermöglichen.			

* IZT, adelphi (2011)

** Seilnacht (o.J.)

*** Dynamic Steel AG (2012)