

# Molybdän

Studie über die Nutzung  
des kritischen Materials Molybdän vor  
dem Interessenbereich des ESM

Jörg Nispel, Karina Fries,  
Rebecca Hentschel,  
Gert Homm, Armin Reller

*December 2014*

# **STUDIE ÜBER DIE NUTZUNGSPOTENZIALE DER KRITISCHEN METALLE COBALT UND MOLYBDÄN VOR DEM INTERESSENBEREICH DES ESM**

## **MOLYBDÄN**



# STUDIE ÜBER DIE NUTZUNGSPOTENZIALE DER KRITISCHEN METALLE COBALT UND MOLYBDÄN VOR DEM INTERESSENBEREICH DES ESM

**Dr. Jörg Nispel, M.Sc. Karina Fries, Dipl.-Ing. Rebecca Hentschel und Dr. Gert Homm**

**Prof. Dr. Armin Reller**

Fraunhofer-Institut für Silicatforschung ISC, Projektgruppe für Wertstoffkreisläufe und Ressourcenstrategie IWKS  
(in Alzenau und Hanau)

## MOLYBDÄN



# Inhalt

|   |           |
|---|-----------|
| Abbildungsverzeichnis .....   | 6         |
| Tabellenverzeichnis.....  | 7         |
| <b>1 Einleitung.....</b>  | <b>9</b>  |
| <b>2 Verfügbarkeit .....</b>  | <b>10</b> |
| 2.1 Minen, Konzerne und Standorte .....                                 | 10        |
| 2.2 Länderkonzentration .....   | 15        |
| 2.3 Begleit-/Hauptmetalle .....   | 17        |
| 2.4 Gesetzgebungen für höhere vertikale Transparenz .....               | 18        |
| <b>3 Nutzen nach Funktion und Anwendung.....</b>                        | <b>19</b> |
| 3.1 Eigenschaften .....   | 19        |
| 3.2 Anwendungen .....   | 20        |
| 3.3 Funktionen.....   | 21        |
| 3.4 Substitution .....  | 28        |
| <b>4 Kritikalität.....</b>  | <b>30</b> |
| <b>5 Unternehmensclusterung .....</b>                                   | <b>33</b> |
| 5.1 Clusterung nach Funktionen .....                                    | 33        |
| 5.2 Clusterung nach Relevanz (strategisch, technisch, ökonomisch) ..... | 33        |
| 5.2.1 Hohe ökonomische Relevanz.....                                    | 34        |
| 5.2.2 Hohe technische Relevanz.....                                     | 34        |
| 5.2.3 Hohe strategische Relevanz.....                                   | 35        |
| 5.3 Clusterung nach Parallel-Verarbeitung .....                         | 35        |
| <b>6 Vorhandene Re-Phasen .....</b>                                     | <b>36</b> |
| 6.1 Art der Re-Phasen .....   | 36        |
| 6.2 Kritische Hinterfragung des elementaren Rückgewinns .....           | 39        |
| <b>7 Analyse der Ergebnisse   Mo .....</b>                              | <b>40</b> |
| 7.1 Interpretation.....   | 40        |
| 7.2 Trends.....   | 43        |
| 7.2.1 Stahlsektor.....  | 43        |
| 7.2.2 Energiesektor .....   | 44        |
| 7.2.3 Entsalzungssektor .....   | 49        |
| 7.2.4 Automobilssektor .....  | 50        |
| 7.3 Kriterienbewertung .....  | 54        |
| 7.3.1 Kommentare zur potenziellen Entwicklung .....                     | 56        |
| 7.3.2 Entwicklungspotenziale.....                                       | 60        |
| <b>8 Allgemeines Fazit.....</b>   | <b>61</b> |
| <b>9 Literaturverzeichnis .....</b>                                     | <b>63</b> |

## Abbildungsverzeichnis

|   |    |
|---|----|
| Abbildung 1: Minenstandorte Molybdän nach Ländern und Betreiber (USGS 2013). .....  | 12 |
| Abbildung 2: Globale Minenproduktion und Preisentwicklung von Molybdän<br>1900 bis 2012.....  | 13 |
| Abbildung 3: Globale Minenproduktion und Preisentwicklung von Molybdän<br>1990 bis 2012.....  | 13 |
| Abbildung 4: Prozessschema der Molybdänproduktion (IMOA 2014b), (ThompsonCreek<br>Metals Company Inc. 2013). .....  | 14 |
| Abbildung 5: Länderanteile der Weltproduktion Molybdän 2012 (USGS 2013). .....  | 15 |
| Abbildung 6: Entwicklung der Herfindahl-Hirschmann-Indizes 1990, 2000 und 2012<br>(USGS 2013). .....  | 16 |
| Abbildung 7: Länderanteile der Molybdän-Hauptproduzenten 1990, 2000 und 2012<br>(USGS 2013). .....  | 16 |
| Abbildung 8: Vergleich von World Governance Index (WGI) 2012, Human Development<br>Index (HDI) 2012 und Environmental Performance Index (EPI) 2014 der<br>Molybdän-Hauptförderländer..... | 17 |
| Abbildung 9: Hauptanwendungen von Molybdän (Mohammad Mahdi Kiaee 2013).....   | 20 |
| Abbildung 10: Anteilige Endnutzung von Molybdän im Jahr 2012 (EUC 2014b). .....   | 21 |
| Abbildung 11: Wertschöpfungsdiagramm von Preis, Legierung und<br>Korrosionsbeständigkeit (Bleck und Hosten 2013). .....   | 22 |
| Abbildung 12: Volumen- und Wertanteile der Metalle eines Edelstahl (Kausch et al. 2014). ..   | 24 |
| Abbildung 13: Die größten Stahlerzeuger in Deutschland 2010 (Bleck und Hosten 2013). ...  | 37 |
| Abbildung 14: Prozessschema des Katalysatorrecycling (AURA Technologie GmbH 2014). ...  | 38 |
| Abbildung 15: Molybdän Angebot und Nachfrage, in Millionen Pfund (Antofagasta 2013). ..   | 41 |
| Abbildung 16: Entwicklung der Stahlproduktion der austenitischen Stähle, Ferrite und<br>Duplexstähle bis 2030 (Team Stainless 2013). .....  | 43 |
| Abbildung 17: Globale Entwicklung der Strombereitstellung durch Wasserkraft<br>(Regenerative Zukunft 2011). .....   | 44 |
| Abbildung 18: Aufbau eines CdTe und CIGS Moduls (IMOA 2013b). .....   | 46 |
| Abbildung 19: Zu erwartende Entwicklung des Photovoltaikmarktes bis 2017 (clerc 2012). ..   | 46 |
| Abbildung 20: Installierte Onshore und Offshore Leistung in der EU in GW (EWEA 2011). ...   | 47 |
| Abbildung 21: Vorhandene und im Bau oder in der Planung befindliche Erdgasleitungen in<br>Europa (blz Bayern 2009). .....   | 48 |
| Abbildung 22: Erdgas Pipelines in den USA (Wikipedia 2011). .....   | 48 |
| Abbildung 23: Meerwasserentsalzungskapazität verschiedener Länder<br>in Tausend m <sup>3</sup> pro Tag (Menzel 2012).....   | 49 |
| Abbildung 24: Weltweite Meerwasserentsalzungskapazität von 1965 bis 2001<br>(Angerer et al. 2009).....  | 50 |
| Abbildung 25: Entwicklung der Kapazität der Meerwasserentsalungsanlagen bis 2030<br>(Globalwaterintel 2013). .....  | 50 |
| Abbildung 26: Einfluss des Automobilgewichts auf den CO <sub>2</sub> -Ausstoß (IMOA 2014a). .....   | 51 |
| Abbildung 27: Verwendung von UHSS und AHSS Stählen in einem Ford 500 und Ford<br>Freestyle (farbig markiert) (Battrum 2007). .....  | 52 |
| Abbildung 28: Anteil der Autoflotte gemessen an der aktuellen Bevölkerungszahl 2010<br>(General Moly 2011). .....   | 52 |
| Abbildung 29: Vergleich der Automobilnachfrage der BRIC-Staaten (a) sowie Nordamerika,<br>Japan und Europa (b) (Virga 2012). .....  | 53 |

## Tabellenverzeichnis

|   |    |
|---|----|
| Tabelle 1: Molybdän-Charakteristika (IMOA 1998). .....  | 19 |
| Tabelle 2: Molybdänverbindungen die als Legierungselement in verschiedenen<br>Stahlanwendungen zum Einsatz kommen (Kiaee 2013). .....   | 22 |
| Tabelle 3: Molybdänhaltige Legierungen, deren Eigenschaften und beispielhafte<br>Anwendungen (Plansee 2014). .....                      | 23 |
| Tabelle 4: Stichproben verschiedener Stähle, auf deren Molybdängehalte<br>(Battrum 2008). .....   | 24 |
| Tabelle 5: Anwendungsgebiete einzelner Mo-basierter Katalysatoren<br>(Hassan 2003). .....   | 26 |
| Tabelle 6: Molybdändisulfid-Anwendungen (IMOA 2014a). .....   | 27 |
| Tabelle 7: Molybdänhaltige Korrosionshemmer und Farben (IMOA 2014a). .....  | 27 |
| Tabelle 8: Molybdäneigenschaften für ausgewählte Anwendungen (IMOA 2013a). ..   | 28 |
| Tabelle 9: Kritikalitätsmatrix nach Reller für Molybdän. ....   | 30 |
| Tabelle 10: Übersicht über die Einordnung nach Relevanzstufen des<br>Metalls Molybdän. ....   | 34 |
| Tabelle 11: Neben Molybdän genutzte Elemente in denselben Anwendungen. ....   | 35 |
| Tabelle 12: Einzelne Mo-Katalysator-Recyclingunternehmen deren Zielprodukte,<br>Kapazität und verwendetes Verfahren (Hassan 2003). .... | 38 |
| Tabelle 13: Globale Verteilung der Wasserkraftpotenziale<br>(Regenerative Zukunft 2011). ....   | 45 |
| Tabelle 14: Entwicklungspotenziale nach Wirtschaftszweigen/Branchen<br>(Einschätzung durch die Fraunhofer-Projektgruppe IWKS). ....     | 54 |



# 1 Einleitung

Starke Produktionsanstiege begründet in fortwährend hoher Nachfrage sowie die vermehrte Molybdänproduktion Chinas, welche im Jahr 2007 die amerikanische Molybdänproduktion ablöste und somit Amerikas Vormachtstellung auf diesem Markt ersetzte, macht auch Molybdän zu einem Metall, welches nicht höchst kritisch ist, jedoch zukünftig unter Beobachtung stehen sollte.

Seither sind auf chinesischer Produktionsseite stetige Anstiege zu verzeichnen, während die US-amerikanische Produktion stagniert. Die Preisanstiege der letzten Jahre sind ein weiterer Faktor, der Molybdän als kritisches Element unter Beobachtung stellt.

Das Haupteinsatzgebiet in der Stahlproduktion, sowohl in Form von Baustahl, Werkzeug- und Schnellarbeitsstahl, Edelstahl als auch Gusseisen wird den Einsatz von Molybdän auch zukünftig hoch halten. Ein simpler aber dennoch stichhaltiger Grund ist der Anstieg der Weltbevölkerung sowie das Streben der asiatischen Bevölkerung in Richtung westlichen Standards. Denn selbst bei stagnierender Weltbevölkerung steigt der Ressourcenbedarf mit dem Wohlstand eines Landes.

Ursächlich sind Konsumgüter genauso wie Infrastrukturprojekte, die in den nächsten Jahrzehnten immense Mengen verschiedenster Stahlsorten beanspruchen werden (Eckert 2012). Neben der Stahlindustrie spielt Molybdän vor allem in Superlegierungen sowie in Katalysatoren und als Beschichtungs- und Schmiermittel in Form von MoS<sub>2</sub> eine wichtige Rolle. Weiterhin ist es als essentielles Spurenelement im katalytischen Zentrum verschiedener Enzyme von Pflanzen und Tieren vorzufinden.

Diese unterschiedlichen Anwendungen, in denen Molybdän aufgrund seiner einzigartigen Eigenschaften seit Jahrzehnten genutzt wird, lenken den Blick hin auf die Versorgungslage, den derzeitigen Molybdänverbrauch und dessen Reichweite.

Für viele Unternehmen aus sehr unterschiedlichen Branchen hat dieses Metall eine hohe Relevanz, sei es ökonomischer, technischer oder strategischer Art. Ziel dieser Studie ist es, die Hintergründe der Relevanz von Molybdän für die Unternehmen aufzudecken und die Unternehmen nach der Art der Relevanz zu klassifizieren. Dadurch wird ersichtlich, welche Branchen vor ähnlichen Herausforderungen hinsichtlich der zukünftigen Rohstoffversorgung stehen, selbst wenn ihre Interessen am Metall durch unterschiedliche Nutzungspotentiale geprägt sind. Das „Reller’sche Konzept“ der Stoffgeschichten, wie es in der Einleitung von Cobalt zu sehen ist, wird aufgegriffen und auf die Unternehmensebene heruntergebrochen.

Aufgrund der über 2.000 verfügbaren Stahlsorten ist es nicht möglich diese einzeln zu betrachten. Aus diesem Grund wird Molybdän als Legierungselement im Anwendungsgebiet Stahl zusammengefasst dargestellt und wenn es die Datenlage zuließ punktuell vertieft.

## 2 Verfügbarkeit

Ausschlaggebend für viele Innovationen auf der Basis bestimmter Rohstoffe sind nicht nur die technische Machbarkeit bzw. die besonderen Eigenschaften, sondern in der Realwirtschaft, neben gesetzlichen Vorschriften, in erster Linie deren Verfügbarkeit und Preis. Es ist daher nur möglich ein vollständiges Bild über die Motive der Verwendung eines speziellen Metalls in einer bestimmten Anwendung zu erhalten, wenn dessen Zugänglichkeit und Preis bekannt sind. Zur Verfügbarkeit zählen im Sinne der metallischen Elemente des Periodensystems deren geologische Häufigkeit, die Lokalität der Minen, die Unternehmenskonzentration der Minenbetreiber und jährlich aus Primär- (Mine) und Sekundärproduktion (Recycling) gewonnene Mengen des Elements.

### 2.1 Minen, Konzerne und Standorte

Der Name des Industrie- und Refraktärmetalls Molybdän, mit der Ordnungszahl 42, leitet sich vom griechischen Molybdaena – Bleiglanz – ab, mit dem Molybdänglanz lange Zeit verwechselt wurde. In Lagerstätten kommt es meist als Molybdänit (Molybdänglanz -  $\text{MoS}_2$ ) vor. Das röntgenamorphe  $\text{MoS}_2$  wird als Jordisit bezeichnet. Weitere molybdänhaltige Erzminerale sind Wulfenit (Gelbbleierz) sowie Powellit.

Der Clarkwert (Krustendurchschnitt) für Molybdän liegt bei 1,1 ppm. Die Abbauwürdigkeit für Molybdänit liegt bei rund 0,3 % im Erz. In großen Lagerstätten kann diese jedoch noch tiefer liegen (Pohl 2005). Kupferschiefer enthält 0,01 - 0,02 % Molybdän und Molybdänglanz zwischen 0,3 - 0,6 Gew.-% (Pilarsky 2014). Auch Uranerze des Sandsteintyps führen Molybdänglanz als Nebenprodukt.

Bestehende und bekannte Lagerstätten sind die Cu-Mo-Porphyre Chiles, Chinas und der USA. Die im Jahr 1971 in China entdeckten Molybdänlagerstätten in kambrischen Schwarzschiefern bis Algenkohlen, sind von der Produktionsmenge gering, aber dennoch wissenschaftlich interessant. Es handelt sich um 5 - 15 cm mächtige sulfidreiche Flöze, die Molybdängehalte von 4 % aufweisen (Pohl 2005).

Da Molybdän zu den Spurenelementen zählt, ist es in organischer Substanz angereichert.

Die Molybdänreserven weltweit belaufen sich im Jahr 2012 auf rund 11 Mio. t. Ein Viertel entfällt dabei auf die USA, rund 20 % auf Chile und rund 40 % auf die Volksrepublik China. Weitere geringe Reserven befinden sich in Peru, Russland, Kanada und Armenien. Die statische Reichweite der Reserven beläuft sich damit auf derzeit 44 Jahre. Die weltweiten Molybdänressourcen werden auf 19,4 Mio. t geschätzt, wovon sich mehr als ein Viertel in den USA befinden (USGS2013).

Im Jahr 2012 wurden rund 250.000 t Molybdän gefördert. Davon war China mit 105.000 t der Hauptproduzent, gefolgt von den USA mit 57.000 t und Chile mit rund 35.000 t.

Die USA verfügen 2012 über 12 molybdänabbauende Minen. Davon sind vier Primärminen, die sich in Colorado, Idaho, Nevada und New Mexiko befinden. Die übrigen 8 sind Kupferminen, wovon vier in Arizona und je eine in Montana, Utah, Nevada und New Mexiko ist (USGS 2013).

Die Unternehmenskonzentration für Molybdän lässt sich aufgrund der gering verfügbaren Daten chinesischer Unternehmen nur schwierig abschätzen. Eine Studie der deutschen Rohstoffagentur geht unter Betrachtung des Herfindahl-Hirschman-Index (HHI) der Bergbauunternehmen exklusive China von einem HHI von 481 im Jahr 2009/2010 aus. Wird China gesamt als ein „Staatsunternehmen“ in die Berechnung einbezogen, so ergibt sich ein HHI von 2.080 (Buchholz et al. 2012).

Bedeutende molybdänfördernde Unternehmen sind:

- Freeport McMoRan rund 40.000 t/a (USA)
- Codelco rund 20.000 t/a (Chile)
- Grupo Mexico rund 20.000 t/a (Mexiko)

-----  
 Verfügbarkeit  
 -----

Daneben sind Rio Tinto (GB/Australien), Teck (Kanada), China Molybdenum Company Limited (China) und Jinduicheng Molybdenum Group Mining Corporation (China) zu nennen (Abbildung 1).

Auf die zehn größten Molybdänhersteller entfallen zwei Drittel der Weltproduktion. Die Ressourcen werden von den großen Unternehmen kontrolliert, sodass der Zugang erschwert ist. Das US-amerikanische Unternehmen Freeport war im Jahr 2012 der größte Molybdänproduzent mit 17 % gefolgt von dem chilenischen Unternehmen Codelco und Grupo Mexico.

Die chinesischen molybdänproduzierenden Unternehmen befinden sich vorwiegend in den molybdänreichen Regionen Henan, Shaanxi und Liaoning. Die Unternehmen Jinduicheng Molybdän und Molybdän Luoyang verfügen über reiche Molybdänminen und sind hinter den drei hier genannten größten Molybdänproduzenten auf Platz vier und fünf vertreten.

Spezifische Informationen bezüglich chinesischer Minengesellschaften und Minen selbst sind aufgrund der geringen Transparenz nicht verfügbar.

Des Weiteren gibt es kleinere Molybdänvorkommen in Armenien, deren Abbau das deutsche Unternehmen Cronimet Mining AG betreibt. Eine weitere in deutschem Besitz befindliche Mine Wolfram Camp Mining (WCM) welches ein 100%iges Tochterunternehmen der „Deutsche Rohstoffe“ ist befindet sich in Australien. Deren Hauptabbauprodukt ist Wolfram und Molybdänkonzentrat ( $\text{MoS}_2$ ) fällt als verkaufsfähiges Beiprodukt an.

Eine ausführliche Liste der Minenbetreiber ist dem Unternehmenskompendium zu entnehmen.



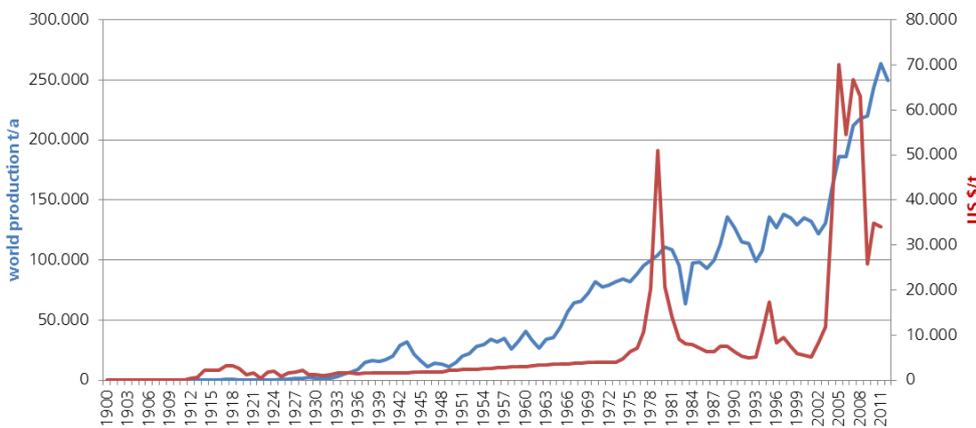
Die Molybdänproduktion ist im Laufe der letzten Jahre stetig gestiegen. Von 1990 bis heute hat sich die Molybdänproduktion fast verdoppelt (Abbildung 2) und erreichte im Jahr 2011 mit 264.000 t ein neues Produktionsmaximum (Abbildung 2 und Abbildung 3). Im Jahr 2007 überstieg die chinesische erstmals die amerikanische Molybdänproduktion. Bis heute steigt sie kontinuierlichen an, während die amerikanische Produktion auf ähnlichem Niveau verharrt.

Seit 2003 ist insgesamt ein größerer Produktionsanstieg zu beobachten, mit dem auch größere Preisanstiege bis zur Weltwirtschaftskrise 2008 einhergehen. Preispeaks sind bei Molybdän, wie bei fast allen Metallen, im Jahr 2008 sowie Mitte der 70er Jahre während der 1. und besonders der 2. Ölkrise zu sehen. Nachfragespitzen sind neben solchen „besonderen Ereignissen“ durch globale Trends, wie ein beschleunigtes Wirtschaftswachstum verursacht. Die Preispeaks von Molybdän waren zudem von Seiten der Konsumenten getrieben, die eine Angebotsverknappung erwarteten, was zu erhöhter Nachfrage führte. Mitte der 80er Jahre ist ein rapider Preisrückgang zu beobachten, der auf einen Angebotsüberschuss aufgrund erhöhter Produktionsmengen neuer Minen zurückzuführen ist. Im Jahr 1995 ist ein weiterer Preispeak zu beobachten, der erneut auf erwartete Angebotsverknappungen zurückzuführen ist.

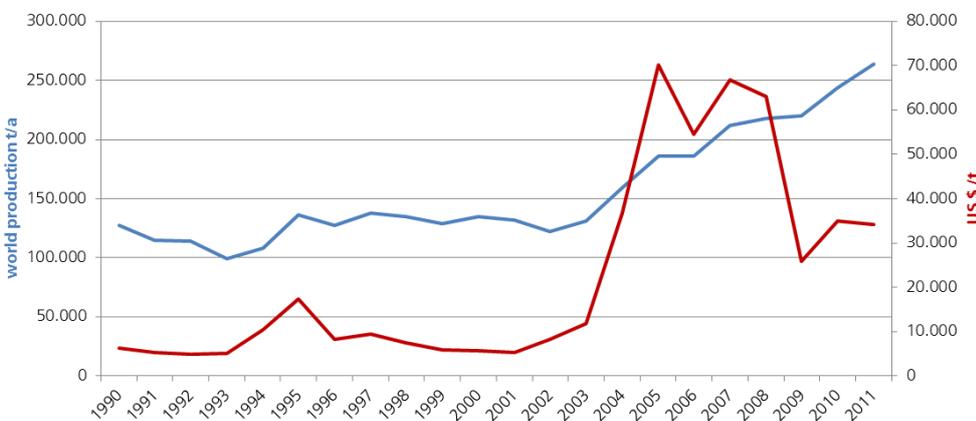
Im Jahr 2002 sind die Ursachen der Anstiege des Molybdänpreises Produktionsschwierigkeiten europäischer Lieferanten sowie ein Rückgang chinesischer Exporte.

Seit 2010 wird Molybdän an der London Metal Exchange (LME) gehandelt. Derzeit liegt der Preis bei ca. 29.000 US\$/t (02.07.2014). Durch die hauptsächliche Förderung als Koppelprodukt der Kupferförderung ist der Molybdänmarkt unelastischer als die Rohstoffförderung und der Bergbau generell. Eine erhöhte Nachfrage kann nur durch höhere Produktionskapazitäten des Hauptprodukts gedeckt werden. Kurzfristige Nachfragesprünge führen daher, auch wegen temporärer Verknappung, zu starken Preiserhöhungen (SATW 2010). Der Preis von Molybdän als Stahlveredler hängt zusätzlich stark mit den Preisentwicklungen von Stahl zusammen (Bräuninger et al. 2013).

-----  
Verfügbarkeit  
-----



**Abbildung 2: Globale Mienenproduktion und Preisentwicklung von Molybdän 1900 bis 2012.**



**Abbildung 3: Globale Mienenproduktion und Preisentwicklung von Molybdän 1990 bis 2012.**

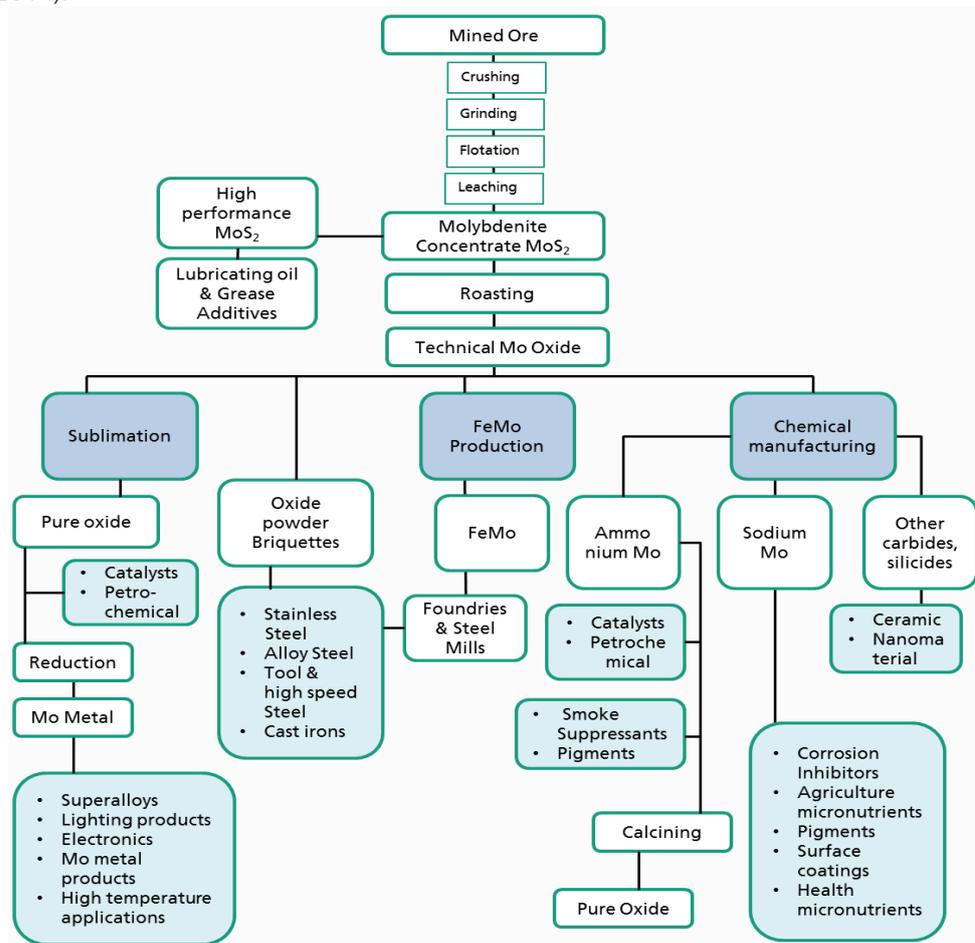
**Produktion:**

Einen Überblick über den Prozess der Molybdänproduktion gibt Abbildung 4. Kugel oder Stabmühlen zerkleinern das abgebaute Erz zu feinen Teilchen (3 - 10 mm). Mittels Flotation werden Molybdänit und Kupfersulfid getrennt. Das resultierende Konzentrat enthält zwischen 85 - 92 % MoS<sub>2</sub>. Das Molybdänit-Konzentrat enthält rund 57 % Molybdän und weniger als 0,1 % Schwefel (IMO 2014b).

Durch Säureextraktion können weitere Verunreinigungen entfernt werden. Während des Röstens (500 - 650 °C) wandelt sich das MoS<sub>2</sub> in Molybdänglanz (MoO<sub>3</sub>) um. Die weitere Reinigung des MoO<sub>3</sub> erfolgt entweder nasschemisch oder durch Sublimation. Bei der nasschemischen Reinigung wird MoO<sub>3</sub> in wässrigem Ammoniak gelöst. Das gebildete Ammoniummolybdat wird nach Auskristallisation durch Erhitzen an der Luft zu aufgereinigtem MoO<sub>3</sub> zersetzt. Zur Reinigung durch Sublimation wird MoO<sub>3</sub> bei 1.200 bis 1.250 °C in elektrisch beheizten Drehrohröfen verdampft. Zur Herstellung des Metalls wird MoO<sub>3</sub> oder Ammoniummolybdat in einem Zweistufenprozeß mit Wasserstoff reduziert, wobei zunächst bei etwa 500 °C Molybdän(IV)-oxid gebildet wird, das dann in einer zweiten Stufe bei etwa 1.100 °C weiter zu Molybdän reduziert wird. Aus dem durch den Reduktionsprozess resultierenden Molybdänpulver entsteht kompaktes Molybdän durch pulvermetallurgische Verfahren oder durch Vakuum-Lichtbogenschmelze.

Andere Verfahren zur Herstellung von Molybdän verarbeiten Molybdänerze durch oxidierende Schmelzreaktion mit Soda zu Natriummolybdat, das durch Säurezusatz in Molybdänoxid-Hydrat überführt wird. Es werden elektrochemische Verfahren genutzt oder chlorierende Aufschlüsse molybdänarmer Erze durchgeführt, wobei abdestillierendes Molybdän(V)-chlorid MoCl<sub>5</sub> mit Wasserstoff zu Molybdän reduziert wird. Sehr reines Molybdän kann durch thermische Zersetzung von Molybdänhexacarbonyl Mo(CO)<sub>6</sub> bei 350 bis 400 °C gewonnen werden (Spektrum 2014).

**Abbildung 4: Prozessschema der Molybdänproduktion (IMO 2014b), (ThompsonCreek Metals Company Inc. 2013).**



Zwischen 30 - 40 % des  $\text{MoO}_3$  wird zu Ferromolybdän (FeMo) verarbeitet. Dafür wird das Molybdänoxid mit Eisenoxid gemischt und durch Aluminium in einer Thermit-Reaktion reduziert. Das Produkt ist in der Regel ein Barren, der einen Molybdängehalt von 60 bis 75 % enthält.

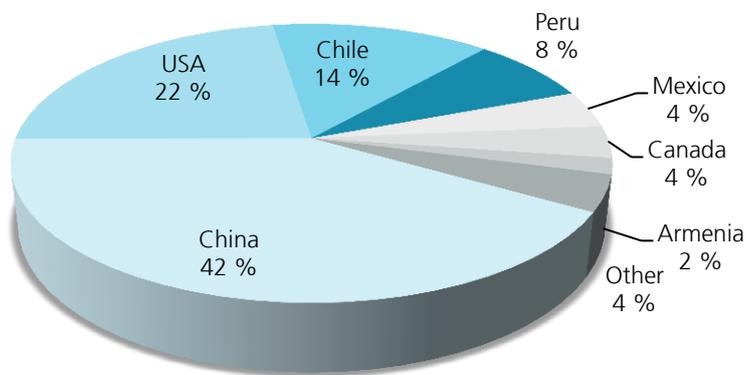
Das Nebenprodukt Rhenium wird aus Molybdänkonzentrat beim Rösten gewonnen (IMO A 2014b) (IMO A 2013a).

-----  
Verfügbarkeit  
-----

## 2.2 Länderkonzentration

Im Jahr 2012 wurden rund 250.000 t Molybdän gefördert. Davon entfielen mit rund 105.000 t (42 %) auf China und mit 23 % rund 57.000 t auf die USA (USGS 2013). Weitere Produzenten sind Chile (14 %), Peru (8 %), Mexiko (4 %), Kanada (4 %) und Armenien (2 %) (Abbildung 5).

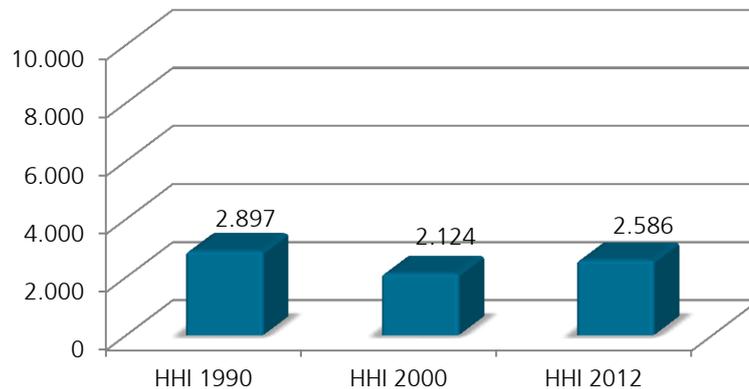
**Abbildung 5: Länderanteile der Weltproduktion Molybdän 2012 (USGS 2013).**



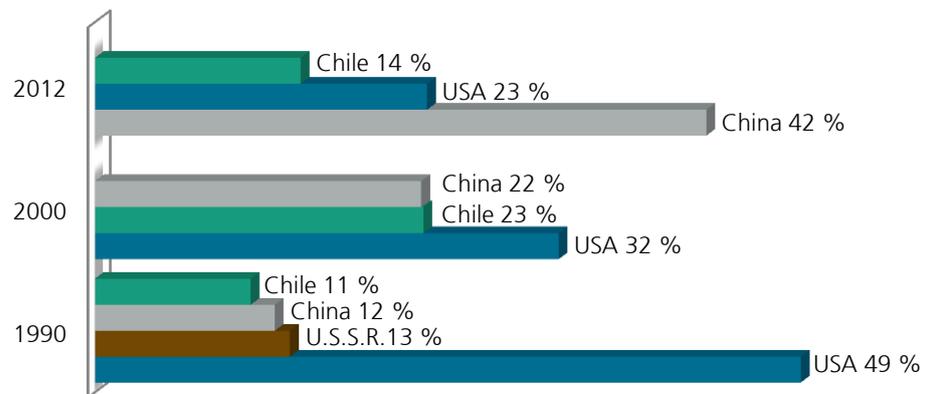
Rund zwei Drittel der Molybdänmengen stammen derzeit aus China und den USA, was zu einem Herfindahl-Hirschmann Index (HHI) der Länderkonzentration von 2.586 (2012) führt und eine mittlere bis starke Länderkonzentration ausdrückt. Denn der Herfindahl-Hirschmann-Index ist eine Maßzahl zur Beurteilung der Marktkonzentration. Errechnet wird er durch Summation der Quadratsumme der Anteile aller Marktteilnehmer. Daraus ergibt sich ein Maximalwert von 10.000, wobei dieser Wert die maximale Konzentration abbildet.

Wird der HHI im Laufe der Jahre betrachtet, so lässt sich erkennen, dass er beispielsweise 1990 mit 2.897 Punkten höher lag als derzeit (Abbildung 6). Dieser hohe Wert ist jedoch nicht durch die chinesische Dominanz, sondern durch die amerikanische Vormachtstellung begründet, wie Abbildung 7 zu entnehmen ist. Erst im Jahr 2007 hat die chinesische Produktion erstmals die amerikanische Molybdänproduktion übertroffen.

**Abbildung 6: Entwicklung der Herfindahl-Hirschmann-Indizes 1990, 2000 und 2012 (USGS 2013).**



**Abbildung 7: Länderanteile der Molybdän-Hauptproduzenten 1990, 2000 und 2012 (USGS 2013).**



Der Human Development Index (HDI) ist ein Wohlstandindikator, der die Lebenssituation innerhalb eines Landes anhand verschiedener Faktoren, wie Lebenserwartung, Bildung und Bruttonationaleinkommen bewertet. Er nimmt Werte zwischen 0 (geringe menschliche Entwicklung) und 1 (sehr hohe menschliche Entwicklung) an (UNDP 2011).

Der World Governance Index (WGI) bildet die Stabilität von Staaten ab und wird unter anderem durch folgende Faktoren bewertet:

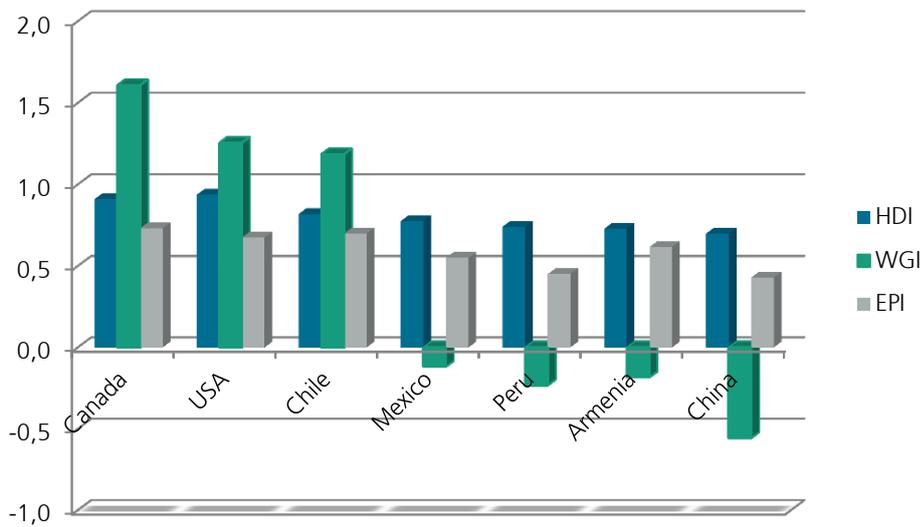
- Control of Corruption,
- Government Effectiveness,
- Political Stability,
- Regulatory Quality,
- Rule of Law,
- Voice and Accountability.

Er kann Werte zwischen -2,5 (geringe Stabilität) und +2,5 (hohe Stabilität) annehmen (Kaufmann et al. 2013).

Der Environmental Performance Index (EPI) der Yale University bewertet die Umweltprobleme einzelner Staaten und deren Umgang damit. Er bewertet den Schutz der menschlichen Gesundheit vor Umweltschäden anhand verschiedener Parameter (Health impacts, Air Quality, Water and Sanitation) und den Schutz der Ökosysteme durch folgende Faktoren (Water Resources, Agriculture, Forests, Fisheries, Biodiversity and Habitat, Climate and Energy). Er nimmt Werte zwischen 100 (gut) und 0 (schlecht) an (Yale University 2014). Zur besseren Darstellung wird der EPI auf Werte zwischen 0 und 1 umskaliert.

Abbildung 8 zeigt, dass im Hauptförderland China (42 %) sowohl der Wohlstandsindikator (HDI), als auch der Stabilitäts- und der Umweltfaktor vergleichsweise gering ausfallen. Sodass hinsichtlich geringer Stabilität ein erhöhtes Versorgungsrisiko besteht. Auch die Länder Peru (8 %), Armenien (2 %) und Mexiko (4 %) weisen sehr niedrige WGI-Werte und somit geringe Stabilitäten auf. Vergleichsweise gute Werte in den hier aufgeführten Kategorien zeigen die Länder Kanada, USA und Chile, die in Summe für ca. 41 % der Weltproduktion verantwortlich sind.

-----  
 Verfügbarkeit  
 -----



**Abbildung 8: Vergleich von World Governance Index (WGI) 2012, Human Development Index (HDI) 2012 und Environmental Performance Index (EPI) 2014 der Molybdän-Hauptförderländer. EPI auf Werte zwischen 0 und 1 skaliert (UNDP 2014) (Kaufmann et al. 2013) (Yale University 2014).**

### 2.3 Begleit-/Hauptmetalle

Molybdän kommt in der Natur in der Regel nicht in elementarer Form vor, sondern meist als Mineral Molybdänit (Molybdänglanz – MoS<sub>2</sub>) (von Nauckhoff 2010). Die einzigen vier Gesteinsproben in denen Molybdän in gediegener Form auftrat, sind in einer Probe des Vulkans Korjakschaja Sopka auf der russischen Halbinsel Kamtschatka Oblast und in drei Gesteinsproben des Mondes gefunden wurden (Mindat 2014). Es handelt sich hier jedoch lediglich um sehr geringe Mengen.

Molybdänit ist das wichtigste Molybdänerz. Daneben tritt Molybdän in Wulfenit (Gelbbleierz – PbMoO<sub>4</sub>) und Powelit (CaMoO<sub>4</sub>) auf. Molybdänit ist zudem die einzige Quelle für Rhenium, dessen Gehalt als ReS<sub>2</sub> bis zu 1,9 % betragen kann. Rhenium weist eine hohe Dichte, elektrische Leitfähigkeit und mechanische Festigkeit bei hohen Temperaturen auf. Zum größten Teil wird es zur Herstellung hochtemperaturresistenter Legierungen und als Katalysator zur Gasoline-Produktion verwendet.

Molybdän wird auf drei verschiedene Art und Weisen gewonnen:

- Primärminen, in denen der Fokus auf Molybdän liegt,
- Co-Produkt-Minen, in denen der Abbau von Molybdän als auch von kupferführenden Erzen stattfindet,
- Bei-Produkt-Minen, bei denen der Fokus auf der Förderung von Kupfer liegt und Molybdän einen zusätzlichen wirtschaftlichen Gewinn bedeutet (IMO 2014b).

Diese Co- sowie Bei- Produktförderung kann zusammengefasst als Gewinnung als Nebenprodukt bezeichnet werden.

Die Hauptmenge des Molybdäns wird als Nebenprodukt in der Kupferherstellung gewonnen und rund 30 % aus Molybdänerzen selbst (Pilarsky 2014). Andere Quellen gehen davon aus, dass 50 % des in westlichen Staaten gewonnenen Molybdäns als Beiprodukt aus porphyrischen Kupferlagerstätten gefördert werden und 17 % aus Primärquellen stammen. Rund 33 % des Molybdäns aus China sind primären Ursprungs (General Moly 2010).

Der deutsche Rohstoffbedarf wurde 2012 hauptsächlich durch den Import der Erze, Konzentrate und Ferromolybdän gedeckt. Die Importmengen Erze, Konzentrate und Oxide belief sich insgesamt auf 7.158 t und stammten vorwiegend aus China, USA, Kanada, Belgien, Niederlande und Großbritannien. Die Einfuhren von Ferromolybdän beliefen sich auch rund 16.934 t, wovon ein Drittel der Menge aus Armenien und der russischen Föderation stammte. Deutschland ist neben China, den USA und Japan einer der größten Molybdänverbraucher (Huy et al. 2013) und damit der zentrale Markt in Europa und auf eine gesicherte Versorgung angewiesen.

## 2.4 Gesetzgebungen für höhere vertikale Transparenz

Da die USA der zweitgrößte Molybdänproduzent hinter China ist und Molybdän nicht zu den sogenannten Konfliktrohstoffen gezählt wird, wie beispielsweise Tantal, existieren bezüglich Molybdän derzeit keine Gesetze für mehr Transparenz und gegen massive Menschenrechtsverletzungen, wie der Dodd-Frank Act (Huy et al. 2011). Wenngleich die chinesischen Produktionsstätten, -mengen und Akteure wenig Transparenz zulassen.

Internationales Konfliktpotential wird daher durch China ausgelöst. Denn als der größte Molybdänversorger hat China für verschiedene Metalle, darunter auch Molybdän, Exportrestriktionen in Form von Ausfuhrzöllen und -kontingenten erlassen, auch wenn diese häufig die internationalen Handelsregeln verletzen.

## 3 Nutzen nach Funktion und Anwendung

Nutzen nach Funktion und Anwendung

### 3.1 Eigenschaften

Molybdän (Mo) ist Element Nummer 42 des Periodensystems in der Gruppe 6A zwischen Chrom und Wolfram. Das silbrige Metall hat einen der höchsten Schmelzpunkte aller Elemente (2.623°C), wobei seine Dichte (10,28 g/cm<sup>3</sup>), im Gegensatz zu anderen hochschmelzenden Metallen, nur 25 % höher ist als die von Eisen. Sein Wärmeausdehnungskoeffizient ist der kleinste aller großtechnisch genutzten Metalle, während es eine der höchsten Wärmeleitfähigkeiten aller Elemente besitzt. Es ist plastisch verformbar, wird jedoch durch kleinste Verunreinigungen mit Sauerstoff und Stickstoff spröde (von Nauckhoff 2010). In Legierung mit anderen Metallen lässt es sich leicht verwenden. Molybdän kommt in der Natur nicht natürlich vor, sondern ist in verschiedenen Oxidationsstufen in Mineralien enthalten (Mohammad Mahdi Kiaee 2013). Tabelle 1 stellt die wichtigsten Charakteristika kurz zusammen.

| Characteristics          | Value   |
|--------------------------|---|
| Melting point            | 2,623 °C  |
| Specific gravity         | 10.28 g/cm <sup>3</sup>                             |
| Standard atomic weight   | 95.95 u   |
| Density                  | 10,22 kg/m <sup>-3</sup>                            |
| Colour                   | graumetallisch                                      |
| Boiling point            | 4,639 °C  |
| Heat of vaporisation     | 600 kJ/mol  |
| Thermal expansion:       | 4.8 x 10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup>              |
| Thermal conductivity     | 142 W/m K <sup>-1</sup>                             |
| Electrical conductivity: | 18.2 x 10 <sup>6</sup> A/V m <sup>-1</sup>          |
| Crystal structure        | Body-Centred Cubic;<br>Lattice Constant: a=3.1468 Å |
| Crustal abundance        | 14 ppm  |

**Tabelle 1: Molybdän-Charakteristika (IMO 1998).**

Als Spurenelement ist Molybdän für fast alle Organismen essentiell. Es bildet das katalytische Zentrum einer Vielzahl von Enzymen, wie der Nitrogenase, Nitrat-Reduktase, Sulfit-Oxidase und Xanthin Oxidoreduktase. Die bioverfügbare Form von Molybdän ist das Molybdat-Ion MoO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, welches in mehreren Schritten als Mo-Cofaktor (Eisen-Molybdän-Cofaktor, Pterin-Molybdän-Cofaktor) in die Enzyme eingebaut wird (Schwarz et al. 2009). Vor allem bei Leguminosen zur N-Bindung durch Knöllchenbakterien (Nitrogenase) und der Nitratreduktase ist Molybdän essentiell. Die Nitratreduktase ist bedeutend bei der Stickstoff-Ernährung der Pflanze im Eiweißstoffwechsel, sie katalysiert die Reduktion von Nitrat zu Nitrit und weiter zu

Ammoniak. Bei der Nitraternahrung der Pflanze ist der Molybdänbedarf daher höher als bei der Ammoniumernahrung. Bei gestörtem Eiweißstoffwechsel der Pflanze kommt es zur Anhäufung von Zucker und Stärke und letztendlich zur Beeinträchtigung der Chlorophyllsynthese.

Im Gegensatz zu anderen Mikronährstoffen, wie Bor, Kupfer, Mangan und Zink, deren Verfügbarkeit mit sinkendem pH-Wert steigt, tritt Molybdänmangel fast ausschließlich auf Böden mit niedrigem pH-Wert auf, da die Pflanzenverfügbarkeit durch eine starke Bindung im Boden reduziert wird. Durch Molybdänmangel kann somit ein Boden unfruchtbar werden, was die Düngung mit Ammoniumheptamolybdat, Natriummolybdat sowie Molybdändünger-Lösung erklärt (Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft 2005).

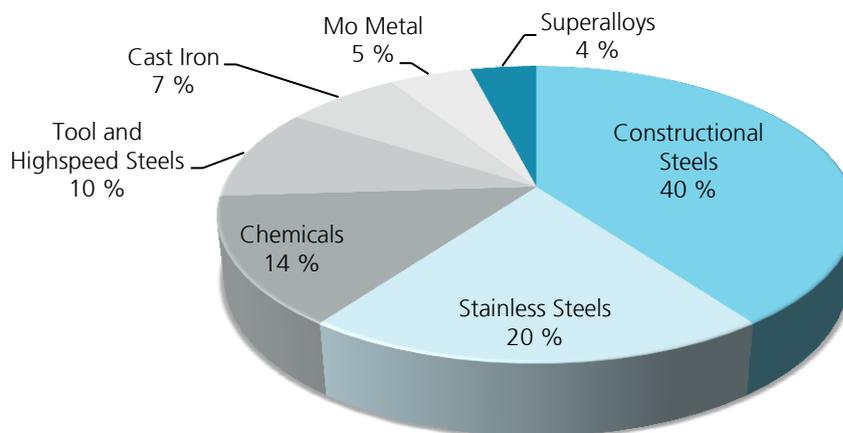
Molybdänhaltige Enzyme werden zudem zur Purinzersetzung und Harnsäurebildung genutzt. Schätzungen der DGE gehen für Jugendliche und Erwachsene von einer essentiellen Tageszufuhr von 50 bis 100 µg aus.

## 3.2 Anwendungen

Aus den genannten Eigenschaften wird ersichtlich, dass die Beimischung bereits kleiner Mengen Molybdän zu einer Aufwertung der Funktion in den entsprechenden Anwendungen führen kann.

Die Steigerung der Wertigkeit durch die Zugabe von Molybdän wird in einem großen Spektrum von Anwendungen genutzt. Abbildung 9 zeigt die Anteile der unterschiedlichen Primäranwendungen Molybdäns und Abbildung 10 die Anteile der Endnutzung. Einer Studie zu Folge betrug der Molybdänverbrauch 2009 in allen Anwendungen weltweit 212.000 Tonnen (Mohammad Mahdi Kiaee 2013). Dies beinhaltete sowohl neues als auch rezykliertes Metall.

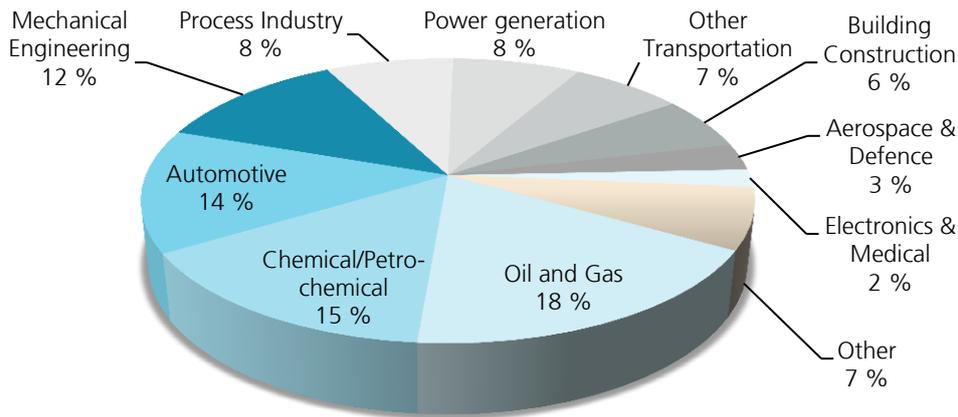
**Abbildung 9:**  
Hauptanwendungen von Molybdän (Mohammad Mahdi Kiaee 2013).



Der weltweit größte Bedarf entfällt dabei auf die Stahlindustrie. Mehr als 70 % der Jahresproduktion werden als Legierungsbestandteil für die verschiedensten Stähle (40 % Baustahl, 20 % Edelstahl, 10 % Werkzeug- und Schnelldrehstahl, 7 % Gusseisen) verwendet. Dadurch werden je nach Anwendung, die Festigkeit, Härbarkeit, Schweißbarkeit, Zähigkeit, Hochtemperaturfestigkeit oder Korrosionsbeständigkeit durch die Zugabe von Molybdän verbessert.

Zu den wichtigsten stahlverarbeitenden Branchen zählen die Automobilindustrie, der Maschinen- und Anlagenbau, die Bauindustrie sowie die Öl- und Gasindustrie. Mit Molybdän gehärteter Stahl sorgt beispielsweise in der Automobilindustrie für einen geringeren Materialbedarf und somit zu Gewichtseinsparungen.

Eine weitere Industrie, die von den Eigenschaften Molybdäns profitiert, ist die chemische Industrie. Hier wird es als Katalysator, Polymeraufbereiter, Korrosionshemmer und Hochleistungsgleitmittel eingesetzt. Mit etwa 14 - 15 % der globalen Molybdänproduktion fließt ein beachtlicher Teil in diesen Industriezweig (EUC 2014b) (Mohammad Mahdi Kiaee 2013).



Nutzen nach Funktion und Anwendung

**Abbildung 10: Anteilige Endnutzung von Molybdän im Jahr 2012 (EUC 2014b).**

### 3.3 Funktionen

*Molybdän als Legierungselement:*

Molybdän und daraus resultierende Legierungen werden in einer Vielzahl verschiedener Produkte und Märkte, wie beispielsweise in der Materialbearbeitung, Glasherstellung, Hochtemperaturöfen und -anlagen, Luft- und Raumfahrt und Verteidigungsanwendungen eingesetzt. Die vielseitigen Eigenschaften macht es zum Metall der Wahl in diesen Sektoren (Mohammad Mahdi Kiaee 2013).

Die Vielzahl an Anwendungsgebieten nach Endnutzen zeigt Abbildung 10.

Weitere Anwendungen findet Molybdän in der Elektronik- und Halbleiterindustrie, als Halbleiterplatten, Kühlkörper, Kontaktstifte, in Hochtemperatur- und Vakuumöfen sowie Heizelementen.

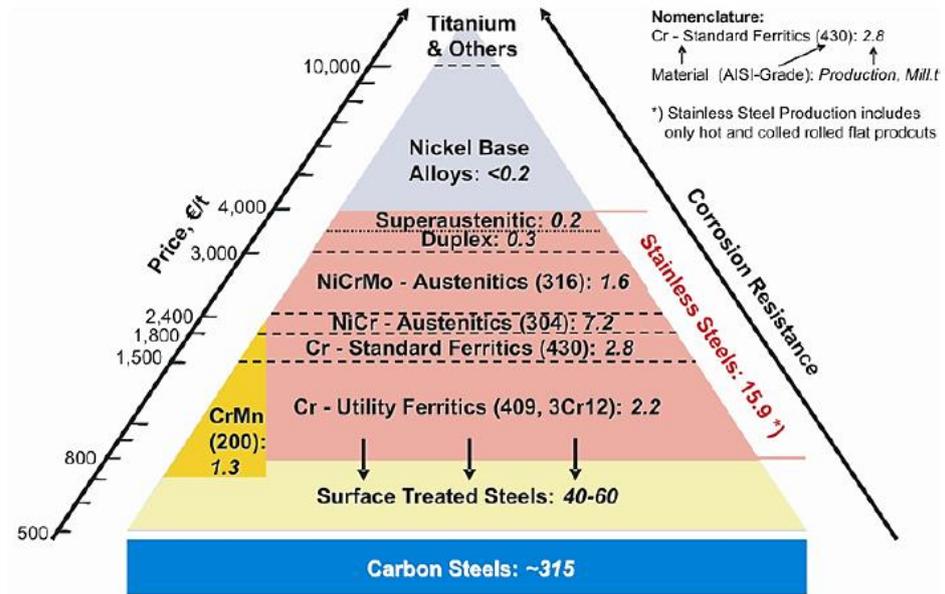
In der chemischen Industrie wird es als Beschichtung in Form von Spritzdraht, Spritzpulver als Verdampferschiffchen genutzt.

Auch in der Nukleartechnologie findet sich Molybdän in verschiedenen Anwendungen wieder. Beispielsweise als Ofenteile, Ladeeinrichtungen und Fusionsreaktoren.

In der Medizin wird Molybdän in Röntgenröhren in x-ray-Anoden oder Kollimatoren eingesetzt sowie in Form des Isotops 99 in der Nuklearmedizin (EUC 2014b).

Molybdän als Legierungselement in Stahl wird in den meisten Fällen in Kombination mit anderen Elementen, wie beispielsweise Chrom, Nickel, Vanadium, Wolfram und Niob verwendet (Imgrund und Kinsman 2007).

**Abbildung 11:**  
Wertschöpfungsdiagramm von Preis, Legierung und Korrosionsbeständigkeit (Bleck und Hosten 2013).



Da es einen hohen Schmelzpunkt besitzt, jedoch eine geringere Dichte als Wolfram hat, kommt es häufig bei Hochtemperaturanwendungen zum Einsatz (Mohammad Mahdi Kiaee 2013). In welchem Zusammenhang dabei Preis, Korrosionsbeständigkeit, zugefügte Legierungselemente sowie die Produktionsmenge stehen, ist im Wertschöpfungsdiagramm Abbildung 11 nachzuvollziehen. Durch verschiedene Legierungszusätze können unter anderem die folgenden Eigenschaften bestimmt werden:

- Physikalische Eigenschaften (Schmelzpunkt, Dichte, Wärmekapazität etc.),
- Mechanische Eigenschaften (Festigkeit, Duktilität, Kriechverhalten etc.),
- Chemische Eigenschaften (Korrosionsbeständigkeit, Ätzverhalten etc.),
- Bearbeitbarkeit (spanabhebende Bearbeitung, Verformungsverhalten etc.),
- Rekristallisationsverhalten (Rekristallisationstemperatur, Versprödungsneigung etc.).

Die folgende Tabelle 2 zeigt die chemische Zusammensetzung in der Molybdän in verschiedenen Stahlanwendungen hinzugefügt wird.

**Tabelle 2:**  
Molybdänverbindungen die als Legierungselement in verschiedenen Stahlanwendungen zum Einsatz kommen (Kiaee 2013).

| Superalloys      | Stainless Steel    | Tool Steel & High Speed Steel | Cast Iron          | Alloy Steel      |
|------------------|--------------------|-------------------------------|--------------------|------------------|
| Mo metal pellets | Technical Mo oxide | Technical Mo oxide            | Technical Mo oxide | Ferro-molybdenum |
|                  | Ferro-molybdenum   | Ferro-molybdenum              | Ferro-molybdenum   |                  |

Molybdänoxid ist das wichtigste Produkt das molybdänhaltigen Legierungen und rostfreien Stählen zugefügt wird. Es enthält in der Regel 56 - 58 % Molybdän und maximal 0,5 % Kupfer.

Ferromolybdän (FeMo) findet in der Produktion von molybdänhaltigen Stählen oder Gusseisen Verwendung. Typischerweise enthält es 65 - 75 % Molybdän und maximal 0,5 % Kupfer. In Stählen mit geringen Molybdängehalten (in der Regel nicht mehr als

0,2 % Mo), wie beispielsweise hochfeste niedriglegierte Stähle (HSLA – high-strength low-alloy steel), kommt FeMo zum Einsatz.

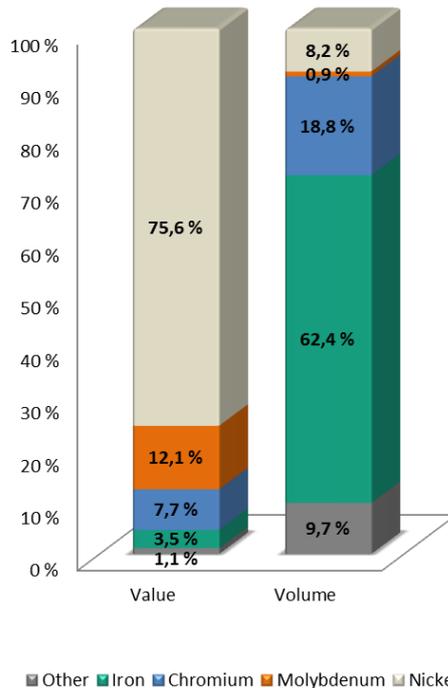
Reines Molybdänmetall (mind. 99,9 %) wird für Superlegierungen verwendet, um eine Kontamination mit Spurenelementen zu vermeiden. Das Molybdänpulver wird zu Pellets gepresst und unter Wasserstoff gesintert, um diese zu verdichten, die Härte der Pellets zu erhöhen und adsorbierten Sauerstoff und Oxidfilme auf der Oberfläche der Partikeloberfläche zu reduzieren (Mohammad Mahdi Kiaee 2013). Einige molybdänbasierte Legierungen und deren Eigenschaften sind in der folgenden Tabelle 3 kurz aufgeführt.

-----  
Nutzen nach Funktion und Anwendung  
-----

| Alloy                                  | Compound   | Characteristics   | Application  |
|--|--|---|--|
| TZM<br>(Titanium-Zirkonium-Molybdenum) | 0.5 % Ti<br>0.08 % Zr<br>0.01 - 0.04 % C                                     | Higher recrystallization temperature and better creep resistance. The recommended temperatures of use are between 700 and 1,400 °C. | High-temperature applications involving demanding mechanical loads, for example in forging tools or as rotating anodes in X-ray tubes.   |
| MHC<br>(Molybdenum-Hafnium-Carbon)     | 1.2 % Hf<br>0.1 % C  | Extremely fine carbides, the material benefits from outstanding heat and creep resistance. Recommended temperature 1,550 °C.        | Metal forming applications<br>Extrusion dies   |
| ML<br>(Molybdenum-Lanthanumoxide)      | 0.3 % La <sub>2</sub> O <sub>3</sub><br>0.7 % La <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | A so-called stacked fiber structure is stable at up to 2,000 °C.<br>Creep-resistant even under extreme conditions of use.           | Furnace components such as stranded and other wires, sintering and annealing boats or evaporator coils. In the lighting industry, molybdenum-lanthanum oxide is used, for example, for retaining and feed wires. |
| MoW<br>(Molybdenum-Tungsten)           | 20 - 50 % Mo   | High-temperature properties<br>Corrosion resistance<br>Enhanced etchability   | Used for the manufacture of zinc as well as for stirring tools in the glass industry.<br>MoW alloys to produce sputtering targets for coating flat screens.  |
| MoCu<br>(Molybdenum-Copper)            | 15 % Cu<br>30 % Cu   | High thermal conductivity<br>Low thermal expansion  | Passive cooling elements (heat sinks and heat spreaders) in electronic components.<br>In the automotive industry they are used as carrier plates for the IGBT modules that act as inverters in electric drives.  |
| MoRe<br>(Molybdenum-Rhenium)           | 5 % Re<br>41 % Re  | Ductile even below room temperature<br>Very good weldability  | Thermocouple wires   |

**Tabelle 3: Molybdänhaltige Legierungen, deren Eigenschaften und beispielhafte Anwendungen (Plansee 2014).**

**Abbildung 12: Volumen- und Wertanteile der Metalle eines Edelstahls (Kausch et al. 2014).**



Wird Molybdän zu einem Nickel-Chrom-Stahl hinzugefügt, verbessert es die Beständigkeit gegen Lochfraßkorrosion, insbesondere durch Chloride und Schwefelchemikalien. In Chromstählen verringert es die Tendenz während des Betriebs oder der thermischen Behandlung zu zerfallen. In niedrig legierten Stählen verbessert es die Hochtemperaturbeständigkeit und Härte.

Über 10 % der Produktion des rostfreien Stahls enthält durchschnittlich 2 % Molybdän. Traditionell ist der wichtigste molybdänhaltige Edelstahl Typ 316 (18 % Cr, 10 % Ni, und 2 oder 2,5 % Mo), der etwa 7 % der weltweiten Edelstahlproduktion darstellt. Wenngleich der Gewichtsanteil von Molybdän in Edelstahl vergleichsweise gering ist, ist dessen Wertanteil in Edelstahl sehr hoch. Das Verhältnis von Wert- zu Volumenanteil beträgt bei Molybdän rund 12:1 (Abbildung 12). Die Stahlsorte 316 wird zur 300er Serie (Chrom-Nickel) der austenitischen Stähle gezählt. Daneben gibt es die 200er Serie, die zu den Chrom-Mangan austenitischen Stählen zählt. Die 400er Serie sind die martensitischen bzw ferritischen Stähle. Die 500er Serie sind martensitische und die 600er Serie Stähle ausscheidungshärtbare Stähle. Die Duplex-Stähle sind der 2.000er aber auch 3.000er Serie zuzuordnen und enthalten alle Molybdän. Daneben existieren eine Vielzahl weiterer Stähle, die nicht dieser Kategorisierung zuzuordnen sind, aber dennoch Molybdän enthalten, wie beispielsweise Stahl PH 13-8 Mo, welcher 2 - 2,5 % Molybdän enthält. Insgesamt machen derzeit jedoch vier Stahlsorten (304, 409, 430 und 316) rund 80 % der weltweiten Edelstahlproduktion aus. Stahltyp 304 ein Chrom-Nickelstahl ist mit einem Anteil von rund 53 % der weltweit bedeutendste (Battrum 2008).

Tabelle 4 bestätigt, dass ein Großteil der Stähle Molybdän enthält.

**Tabelle 4: Untersuchung verschiedener Stähle, auf deren Molybdängehalte (Battrum 2008).**

| Steel grade          | No. of grades | No. with Mo | % with Mo |
|----------------------|---------------|-------------|-----------|
| Austenitic           | 66            | 19          | 29        |
| Ferritic             | 21            | 10          | 48        |
| Martensitic          | 23            | 12          | 52        |
| Duplex               | 12            | 12          | 100       |
| PH                   | 16            | 9           | 56        |
| <b>Total/Average</b> | <b>136</b>    | <b>60</b>   | <b>44</b> |

In den letzten Jahren ist ein Wachstum molybdänveredelter Ferrite zu beobachten, wie beispielsweise Typ 444 (18 % Cr, 2 % Mo), Typ 436 (18 % Cr, 1,25 % Mo) und Typ 434 (17 % Cr, 1 % Mo). Die Gesamttonnage der Ferrite hat sich von 47.000 t im Jahr 2002 auf 366.000 t im Jahr 2005 sprunghaft erhöht. Ihr Anteil an der Gesamtstahlproduktion hat sich daher von 0,3 % auf 1,7 % in nur drei Jahren deutlich erhöht. Ein Wachstum der Duplex-Stähle wurde auch beobachtet und wird auf 200.000 t im Jahr 2006 geschätzt (Imgrund und Kinsman 2007).

In Werkzeugstählen trägt Molybdän in Kombination mit Vanadium zur sekundären Härtung bei. Die Zugabe von Molybdän führt zu einer Trennung des Bainit- (Zwischenstufengefüge) und Perlit- Bereichs und erlaubt den Schritt des Abschreckens. Produkte aus Werkzeugstählen sind beispielsweise Handwerkzeuge, Messer und Sägen, Gesenke, Druckgussformen und Formplatten. Der typische Molybdängehalt in Werkzeugstählen liegt bei rund 0,8 %.

Molybdän ist ein wichtiger Bestandteil des primären M<sub>6</sub>C Karbid, das Schnellarbeitsstahl verschleißfester macht. Schnellarbeitsstähle werden hauptsächlich für Schneidwerkzeuge und Sägen für Stahl, Guss und NE-Materialien sowie Spiralbohrer, Fräser und Schubwerkzeuge verwendet. Der durchschnittliche Molybdängehalt liegt bei rund 5 % (Imgrund und Kinsman 2007).

Der hohe Schmelzpunkt, die gute Hitzefestigkeit sowie seine ausgezeichnete Leitfähigkeit sind perfekt geeignet für Superlegierungen. Darüber hinaus ist es unempfindlich gegenüber Angriffen von reduzierenden Säuren oder Basen.

Die wirtschaftlich bedeutendste Superlegierung ist die Nickelbasislegierung, die in verschiedenen Turbinen zum Einsatz kommt. Molybdän dient darin vor allem der Erhöhung der Festigkeit. Markennamen für Nickelbasislegierungen sind beispielsweise Inconel®, Incoloy®, Hastelloy®, Nimonic®, Waspaloy®, Cronifer® und Nicrofer®. Eine weitere Gruppe der Superlegierungen sind Cobaltbasislegierungen denen, je nach Anwendung, auch Molybdän zugefügt (< 1,0 Gew.-%) wird, um die Verschleißbelastung und Beständigkeit gegen Abrieb zu erhöhen. Auch Titanlegierungen, die fast Einsatztemperaturen hochwarmfester Stähle erreichen, enthalten je nach Zusammensetzung 0,25 Gew.-% Molybdän (Angerer et al. 2009). Weitere Hochtemperaturlegierungen weisen verschiedenste Molybdängehalte zwischen 3 - 15 Gew.-% auf.

Reines Molybdän 99,95 - 99,97 (abhängig vom Erzeugnis) wird vor allem in Öfen und Glas schmelzenden Komponenten sowie Halbleiterkühlkörpern genutzt. In elektronischen Bauteilen ist es in Form von Sputtertargets zu finden. Diese dienen dazu, Glas mit sehr dünnen metallischen Schichten zu versehen, auf denen Halbleiterbauelemente wie z. B. Transistoren für Flachbildschirme aufgebaut werden. Molybdän dient hier als Rückkontakt der auf das Glassubstrat gesputtert oder durch Elektronenstrahlverdampfen aufgebracht wird. In Glasschmelzelektroden bewährt es sich durch seine hohe thermische, aber auch elektrische Leitfähigkeit sowie seine enorme Festigkeit und Stabilität (H.C. Starck 2014).

#### *Molybdän in der chemischen Industrie:*

Molybdän wird im chemischen Bereich in einer Vielzahl von Produkten verwendet. Dazu zählen beispielsweise, Katalysatoren, Schmiermittel (MoS<sub>2</sub>), Korrosionshemmer, Rauchminderer und Pigmente (Mohammad Mahdi Kiaee 2013). In Form von Katalysatoren wird es für die Hydrierung, Dehydrierung und Reduktion eingesetzt. Einige wichtige Anwendungen von Molybdänkatalysatoren sind in Tabelle 5 dargestellt.

**Tabelle 5: Anwendungsgebiete einzelner molybdänbasierter Katalysatoren (Hassan 2003).**

| Application   | Catalyst   |
|---|--|
| Acrylonitrile of propene and ammonia  | Bi-Molybdate   |
| Acrylic acid  | MoO <sub>3</sub> /carrier material   |
| Desulfurization of natural gas  | MoO <sub>3</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub><br>(MoO <sub>3</sub> 13 - 21 %)<br>NiO - MoO <sub>3</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub><br>(MoO <sub>3</sub> 18 %, NiO 3.5 %)<br>Cu-Mo-sulfide/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> |
| Removal of exhausts from power plants, incineration plants and chemical plants. | MoO <sub>3</sub> /TiO <sub>2</sub> (5-10 %)  |
| Formaldehyde-production   | Fe-Mo-oxide (Mo: 55 %)   |
| Hydrocracking   | Ni-Mo-sulfide  |
| Hydrotreating   | Mo-Co-sulfide or Mo-Ni-sulfide (Mo: 13 - 15 %)   |
| Maleic anhydride by benzene-oxidation   | V <sub>2</sub> O <sub>5</sub> -MoO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>  |
| Propylene oxide   | Mo-compounds   |
| Synthesis gas (partial oxidation), CO-conversion                                | Co-Mo-sulfide  |

Molybdänkatalysatoren werden sowohl hydro- als auch pyrometallurgisch verarbeitet. Zielprodukte sind dabei Ferromolybdän, Molybdänoxid und Ammoniumdimolybdat. Während Ferromolybdän und Molybdänoxid Anwendung in der Stahlherstellung finden, wird Ammoniumdimolybdat für die Herstellung von Katalysatoren genutzt (Hassan 2003).

Mengenmäßig sind Hydrotreating-Katalysatoren von größter Bedeutung, da sie ca. 14 % Molybdän enthalten. Für Westeuropa wird das Aufkommen auf 10.000 t/a geschätzt. An zweiter Stelle stehen die Hydrocracking-Katalysatoren. In Pulverform oder als Beimischung mit Öl widersteht der Rohstoff extremen Drücken und Temperaturen, was ihn zu einem Hochleistungsschmierstoff der Extraklasse werden lässt. In der Ölverarbeitung werden Molybdän-Katalysatoren daher zur Entschwefelung eingesetzt (H.C. Starck).

Als Molybdänsulfid wird Molybdän in pulverisierter Form in Größenordnungen von 1 bis 100 µm als Schmiermittel eingesetzt (Tabelle 6). Die Schmiereigenschaft beruht – wie die des Graphits – auf dem Kristallgefüge, welches ohne Veränderung der metallischen Oberfläche eine Schmierwirkung entfaltet. Molybdänsulfid ist weich, hydrophob und auch bei hohen Temperaturen beständig sowie äußerlich dem Graphit ähnlich. Als Festschmierstoff hat es eine gute Haftfähigkeit auf Stahl und anderen Metallen. Es bildet einen starken dauerhaften Film bis etwa 350 °C und widersteht chemischen Angriffen. In inerter Umgebung liegt die Zersetzungstemperatur bei 1.500 °C. Es wird als Trockenschmierung und auch Ölschmierung eingesetzt und erhöht die Lebensdauer von Maschinenteilen und dient so der Schadensvorbeugung (Gerthsen 2006). Angereichert in Fetten verlängert es Wartungsintervalle von Bauteilen die schwer zugänglich sind. Auch in speziellen Kunststoffen, wie Nylon und Teflon, wird es als schmierender Zusatz verwendet.

Weitere chemische Anwendungen sind als Rauchminderer und Ammoniumoctamolybdat und Molybdäntrioxid beispielsweise in PVC-Kabeln.

MoSi<sub>2</sub> wird in Spezialkeramik angewendet, zum Beispiel für Heizelemente, Öfen sowie in der Luft- und Raumfahrt, Gasturbinen und -motoren (IMOA 2014a).

Nutzen nach Funktion und Anwendung

Molybdenum disulfide formulations

**Tabelle 6: Molybdändisulfid-Anwendungen (IMOA 2014a).**

| Mo content (%) | Product Type   |
|----------------|--|
| 1 - 20         | Greases - for manufacturing, mining and transportation                     |
| 20 - 60        | Pastes - mineral or synthetic base   |
| 0.5 - 5        | Industrial and motor oils or synthetic fluids                              |
| 1 - 20         | Water suspensions  |
| up to 85       | Bonded coatings - air or heat cured, organic, inorganic                    |
| 1 - 40         | Metal working compounds, soaps, powders                                    |
| 10 - 100       | Pure or mixed powders  |
| 1 - 10         | Friction Products, sintered Cu brakes, semi-metallic and non-asbestos pads |
| 1 - 30         | Plastic, rubber & metal composites   |

Molybdät-Pigmente sind licht- und hitzestabil und sorgen für eine stabile Farbgebung und Korrosionsschutz in Molybdänorange und Molybdänrot (IMOA 2014a) (Tabelle 7).

| Application               | Molybdate  |
|---------------------------|--|
| Steel, aluminium, copper  |  |
| Central heating systems   | Sodium molybdate   |
| Automobile engine coolant |  |
| Paints                    |  |
| Plastics                  | Zinc, calcium, strontium molybdate, molybdenum orange: lead molybdate plus lead chromate Phosphomolybdates |
| Rubber                    |  |
| Ceramics                  |  |

**Tabelle 7: Molybdänhaltige Korrosionshemmer und Farben (IMOA 2014a).**

Weitere Anwendungen sind als Leitmaterial in elektronischen Bauteilen von Bildschirmen, Solarzellen, Halogenlampen oder Röntgengeräten. Molybdänhaltige Farbpigmente kommen darüber hinaus auch in der Kunststoff- und Keramikindustrie zum Einsatz. Einen Überblick zu ausgewählten Anwendungen und die entsprechende Funktion des Molybdäns sind in Tabelle 8 kurz aufgeführt (IMOA 2013a).

**Tabelle 8:**  
**Molybdäneigenschaften für**  
**ausgewählte Anwendungen**  
**(IMO 2013a).**

|                               | Halogen lamps | Heat sinks | LCD & photovoltaic | Semi-conductor manufacturing | X-ray tubes | Hot work tooling | Liquid-metal and glass processing | Furnace components | Surface coating |
|-------------------------------|---------------|------------|--------------------|------------------------------|-------------|------------------|-----------------------------------|--------------------|-----------------|
| <b>Physical properties</b>    |               |            |                    |                              |             |                  |                                   |                    |                 |
| Density                       |               | X          |                    |                              |             |                  |                                   |                    |                 |
| Electrical conductivity       | X             | X          | X                  |                              | X           |                  | X                                 | X                  |                 |
| Thermal conductivity          |               | X          |                    |                              | X           | X                | X                                 |                    |                 |
| Thermal expansion             | X             | X          | X                  |                              | X           | X                | X                                 | X                  |                 |
| <b>Mechanical properties</b>  |               |            |                    |                              |             |                  |                                   |                    |                 |
| Elastic modulus               | X             | X          |                    | X                            | X           | X                | X                                 | X                  |                 |
| Hot strength                  | X             |            |                    | X                            | X           | X                | X                                 | X                  |                 |
| Creep resistance              |               |            |                    | X                            | X           | X                | X                                 | X                  |                 |
| <b>Other properties</b>       |               |            |                    |                              |             |                  |                                   |                    |                 |
| Wear/Erosion resistance       |               |            |                    |                              |             | X                | X                                 |                    | X               |
| Corrosion resistance          | X             |            | X                  | X                            |             |                  | X                                 |                    | X               |
| Bond strength with substrates | X             | X          | X                  |                              | X           |                  |                                   |                    | X               |

### 3.4 Substitution

Die Substitution von Molybdän ist aufgrund der vielfältigen und speziellen Eigenschaften schwierig. In seiner Anwendung als Legierungselement in Stahl und Gusseisen sind Chrom, Vanadium, Niob und Bor in legierten Stählen und Wolfram in Werkzeugstählen geeignete Substitute (USGS 2013).

In Hochtemperaturanwendungen kann Molybdän durch Eisen-Nickel- und cobaltbasierte Superlegierungen, Keramiken und andere hochschmelzende Metalle, wie Wolfram, Tantal und Niob substituiert werden.

Da jedoch alternative Superlegierungen häufig nur bis 1.200 °C verwendet werden können und molybdänhaltige Materialien Hitzebeständigkeit bis 1.800 °C aufweisen, ist die Substitution nur begrenzt möglich. Zusätzlich weisen molybdänhaltige Materialien eine höhere Ausfallsicherheit und Duktilität als Keramiken auf und sind günstiger als Tantal und Niob (EUC 2014b). Molybdän ist hingegen ein Substitut für Tantal in Superlegierungen (USD AT&L 2013).

Weitere mögliche Substitute in Hochtemperaturanwendungen sind Graphit und Wolfram (USGS 2013). Als Schmiermittel ist Graphit ein mögliches Substitut für MoS<sub>2</sub>. Chromorange, Cadmiumrot und organische orange Pigmente können Molybdänorange ersetzen (USGS 2013).

Es ist zu beachten, dass Molybdän selbst als Substitut für teurere weniger effiziente Metalle eingesetzt wird. Ein Beispiel ist Nickel. In vielen Anwendungen der Stahlindustrie bewirkt ein Pfund Molybdän das gleiche wie 5 - 7 Pfund Nickel. Daher wird Nickel zunehmend durch Molybdän ersetzt, wobei die Stahlindustrie in diesem

Verdrängungsprozess führt. Dieser Substitutionseffekt tritt vor allem im Bereich der Edelstahlproduktion auf, wo Rostfreiheit, Zähigkeit, Korrosionswiderstand, Druckfestigkeit, Säure- und Basenresistenz, Alterungsbeständigkeit sowie Hochtemperaturverträglichkeit benötigt werden (finanzen.net GmbH 2007).

.....  
Nutzen nach Funktion und  
Anwendung  
.....

## 4 Kritikalität

Die Kritikalität von Molybdän wird in diesem Kapitel in Anlehnung an die Entscheidungsmatrix von Reller auf Basis von Experteneinschätzungen und den hier aufgeführten Informationen bewertet. Hinzugefügt werden die Kriterien „Immobilisierung“ und „Dissipation“. Jedes Kriterium wird nach dem angegebenen Bewertungsschlüssel auf einer Skala von eins bis vier hinsichtlich der hervorgerufenen Kritikalität des Elementes eingestuft. Der Durchschnitt aus allen Werten ergibt die Gesamtkritikalität und ermöglicht eine Vergleichbarkeit zwischen unterschiedlichen Elementen.

**Tabelle 9: Kritikalitätsmatrix nach Reller für Molybdän.**

**Bewertungsschlüssel:**

- 1 unkritisch,**
- 2 eher unkritisch,**
- 3 eher kritisch,**
- 4 kritisch.**

|                            |             |
|----------------------------|-------------|
| Geological Availability    | 3           |
| Geopolitical Parameter     | 2           |
| Economic Development       | 3           |
| Application Potential      | 3           |
| Ecological Parameter       | 2           |
| Recycling and Substitution | 3           |
| Immobilization             | 4           |
| Dissipation                | 3           |
| <b>Average</b>             | <b>2.88</b> |

Nachfolgend wird die stoffspezifische Bewertung der Kriterien aus Tabelle 9 näher erläutert.

### *Geologische Verfügbarkeit:*

Ein großer Teil der Reserven befindet sich in China, den USA und Chile. Insgesamt belaufen sich die weltweiten Reserven auf 11.000.000 t und sind damit als groß einzustufen. Dennoch liegt nach derzeitiger Datenlage die statische Reichweite für Molybdän bei 44 Jahren und ist trotz der größeren Reserven als gering zu bewerten. Der Herfindahl-Hirschmann-Index der Länderkonzentration liegt bei 2.586 und ist damit als mäßig konzentriert anzusehen. Daher kann von einer eher kritischen Situation ausgegangen werden.

### *Geopolitischer Faktor:*

Geopolitisch ist die Situation bei Molybdän im Vergleich zu anderen Metallen weniger drastisch. Rund 42 % der Weltproduktion stammen zwar aus China, welches im unteren Drittel der Bewertungen des World Governance Index und Human Development Index anzusiedeln ist, jedoch stammen demgegenüber 45 % aus den Ländern USA, Chile und Peru.

Mit Ausnahme von Peru sind die USA und Chile bezüglich Stabilität und Lebensstandard als gut zu bewerten. Vor dem Hintergrund der geopolitischen Situation anderer Länder und Metalle führt dies zu der Einstufung im eher unkritischen Bereich.

### *Wirtschaftliche Entwicklung:*

Molybdän ist im Vergleich ein eher seltenes Element in der Erdkruste, dessen Nachfrage mit der Stahlnachfrage korreliert und die Rohstahlproduktion hat ein Wachstum von

rund 10 % pro Jahr (finanzen.net GmbH 2007). Die benötigten Molybdänmengen wachsen dementsprechend parallel. Der Abbau findet sowohl primär als auch als Koppelprodukt statt. Die Unternehmenskonzentration des Abbaus liegt je nach Berücksichtigung chinesischer, wenig transparenter Zahlen, bei ungefähr 500 (ohne China) und bei rund 2.000 mit China. Die Marktkonzentration derzeit befindet sich im Rahmen, dennoch sollte beachtet werden, dass durch weitere Konzentration der Marktmacht die Gefahr für höhere Lieferausfallrisiken steigt.

#### *Anwendungspotential:*

Das Anwendungsgebiet von Molybdän ist vielfältig, jedoch liegt der Fokus auf der Stahlveredelung. In Baustählen, Werkzeugen im Automotivbereich sowie in Windkraftanlagen, Flugzeugturbinen und anderen Legierungen ist der Bedarf auch zukünftig, aufgrund der wirtschaftlichen Entwicklungen der BRIC-Staaten, als eher zunehmend bis konstant einzustufen.

Hinsichtlich zukünftiger Anwendungen auf dem Energiesektor ist ein steigender Bedarf an Stahllegierungen/Superlegierungen im Bereich der Windenergie und der Geothermie zu nennen. In Windkraftanlagen vor allem in Form von Turbinen. Durch hohe Zubauraten, vor allem im Rahmen der Energiewende in Deutschland, ist ein vermehrter Bedarf zu erwarten. In der Geothermie werden spezifische Eigenschaften gefordert, da beispielsweise die Bohrlochauskleidungen besonderen Umgebungsbedingungen ausgesetzt sind. Daher ist Molybdän als ein Legierungselement das Metall der Wahl, um die Sicherung der Beständigkeit gegen hohe Temperaturen, Säuren und Salz zu gewährleisten (Moss et al. 2011) (Viebahn 2014). Auf Basis der Studien von Sullivan et al. (2010) und Moss et al. (2011) wird beispielsweise der Molybdäneinsatz eines geothermischen EGS-Kraftwerk (50 MW<sub>el</sub>, 25 Bohrungen, 5 km Bohrtiefe) auf rund 7.200 t/MW geschätzt.

#### *Ökologischer Parameter:*

Molybdän ist ungiftig und essentiell für Organismen. Der absolute kumulierte Energieaufwand (KEA) für den gesamten Aufwand an Energieressourcen, die für den Abbau einer Tonne Molybdän benötigt werden, beläuft sich auf 148.889 MJ/t. Dies liegt in der Größenordnung des Abbaus von Aluminium, welches als sehr energieintensives Metall bekannt ist.

Der kumulierte Rohstoffaufwand (KRA) entlang der Gewinnungsphase, ausgenommen Abraum, beläuft sich auf 983 t/t. Dies ist ein moderater Wert, da beispielsweise der KRA für Gold, als ein sehr materialintensives Metall, bei 740.476 t/t liegt (UBA 2013).

Auch der Environmental Performance Index (EPI) ist als moderat einzustufen, was zu einer eher unkritischen Bewertung bezogen auf ökologische Parameter führt.

#### *Recycling und Substituierbarkeit:*

Die Substitution von Molybdän ist, wie in Kapitel 3.4 beschrieben, nur begrenzt möglich. Auch das Recycling ist als schwierig einzustufen, da ein elementbezogenes, auf Molybdän fokussiertes Recycling in den Hauptanwendungen nicht stattfindet. Daher sind die Parameter Recycling und Substitution als eher kritisch einzustufen.

#### *Immobilisierung:*

Der Immobilisierungsgrad wird aufgrund der Hauptanwendungen in Stahlerzeugnissen als eher kritisch eingestuft, da molybdänhaltige Produkte aus dem Stahlsektor vergleichsweise lange Lebenszyklen von mehreren Jahrzehnten aufweisen.

#### *Dissipation:*

Auch der Dissipationsgrad ist aufgrund des Haupteinsatzes in der Stahlindustrie als eher kritisch anzusehen, da Molybdän in vergleichsweise kleinen Mengen eingesetzt wird, um entsprechende gewünschte Effekte zu erzielen.

Es zeigt sich das Molybdän als „eher kritisch“ zu bewerten ist. Andere Institutionen, wie die Ad-hoc Arbeitsgruppe der EU kommen in ihren Kritikalitätsanalysen zu ähnlichen Ergebnissen. In der Bewertung von 2014 gehört Molybdän zwar nicht zu den kritischen Metallen, ist aufgrund seiner hohen wirtschaftlichen Bedeutung und auch bedingt durch das Versorgungsrisiko nah an den gesetzten Grenzen (EUC 2014a). Auch in deren letzten Studie von 2010 wird Molybdän ähnlich eingestuft (EUC 2010). Das vergleichsweise geringere Versorgungsrisiko führt zur Bewertung als eher weniger kritisch in diesen Studien. Auch eine Studie mit dem Fokus auf die deutsche Versorgungslage kommt im Falle von Molybdän zu einer mittleren Kritikalität (Erdmann et al. 2011).

Es sollte jedoch beachtet werden, dass die wirtschaftliche Bedeutung des Rohstoffs sehr hoch ist und sich das Versorgungsrisiko aufgrund politischer Instabilität in den Förderländern oder Naturkatastrophen, wodurch die Supply Chain gestört wird, sowie Exportrestriktionen, schnell verschlechtern kann.

# 5 Unternehmensclusterung

In diesem Kapitel werden Unternehmen geclustert, die Komponenten und Halbzeuge aus Metallpulvern und Vorprodukten herstellen. Für diese Unternehmen ist die Anwendung des Metalls relevant. Eine Stufe vor den Verarbeitern in der Wertschöpfungskette stehen, solche Unternehmen die beispielsweise Metallpulver. Auch diese haben ein Interesse an den Entwicklungen im Bereich der Anwendungen, da sie den Absatz der Metallpulver und ihr Kundenprofil bestimmen. Solche Unternehmen sind im Falle Molybdäns beispielsweise Treibacher AG, H. C. Starck und Cronimet.

## 5.1 Clusterung nach Funktionen

Wie in den Kapiteln zuvor dargestellt, erfüllt Molybdän in verschiedenen Anwendungen unterschiedliche Funktionen, die von verschiedenen Unternehmen genutzt werden. Je nach Anwendung ist eine produktspezifische Funktion nötig.

In einem einfachen Ansatz werden den Anwendungen zugehörige Unternehmen zugeordnet. Es wurde versucht sowohl größere „Globalplayer“ als auch kleine Unternehmen mit aufzunehmen, um die Bandbreite der anwendungsabhängigen Unternehmen so realistisch wie möglich darzustellen. Der Fokus wurde dabei, wenn möglich, auf Europa gelegt. Diese und alle weiteren Unternehmenslisten erheben keinen Anspruch auf Vollständigkeit, sondern geben lediglich einen kurzen Überblick über wesentliche Akteure.

Die Unternehmensliste ist dem Kompendium zu entnehmen.

## 5.2 Clusterung nach Relevanz (strategisch, technisch, ökonomisch)

Tabelle 10 zeigt die Einordnung der Anwendungen nach ökonomischer, technischer und strategischer Relevanz, deren allgemeine Definition folgende ist.

### **Definition ökonomische Relevanz:**

*Das Metall hat für das Unternehmen eine hohe ökonomische Relevanz, wenn es heute und kurzfristig in großen Mengen durch das Unternehmen umgesetzt wird. Dies begründet sich durch den Gehalt des Metalls in den umgesetzten Produkten bzw. der Menge der umgesetzten Produkte.*

### **Definition technische Relevanz:**

*Das Metall hat für ein Unternehmen eine hohe technische Relevanz, wenn es in einer Wachstumsanwendung mittelfristig eine Schlüsselrolle spielt.*

### **Definition strategische Relevanz:**

*Das Metall hat für das Unternehmen eine hohe strategische Relevanz, wenn es nicht-substituierbar ist und in Wachstums- und/oder Zukunftstechnologien eingesetzt wird. Es ist somit für ein Unternehmen langfristig von strategischer Bedeutung, ungeachtet weiterer Produktionen.*

**Tabelle 10: Übersicht über die Einordnung nach Relevanzstufen des Metalls Molybdän.**  
**Rot: hohe Relevanz,**  
**Gelb: mittlere Relevanz,**  
**Grün: niedrige Relevanz.**

| <b>Application</b>                   | <i>Economic<br/>Relevance</i> | <i>Technical<br/>Relevance</i> | <i>Strategic<br/>Relevance</i> |
|--------------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| <b>Steel</b>                         |                               |                                |                                |
| <i>Constructional Steels</i>         | Grün                          | Rot                            | Gelb                           |
| <i>Tool Steels</i>                   | Gelb                          | Rot                            | Gelb                           |
| <i>Highspeed Steels</i>              | Rot                           | Rot                            | Gelb                           |
| <i>Stainless Steels</i>              | Grün                          | Gelb                           | Grün                           |
| <b>Cast Iron</b>                     |                               |                                |                                |
| <b>Superalloys</b>                   |                               |                                |                                |
| <i>Nickel-based alloys</i>           | Rot                           | Grün                           | Gelb                           |
| <i>Other High temperature alloys</i> | Gelb                          | Gelb                           | Gelb                           |
| <b>Lubricants &amp; Coatings</b>     |                               |                                |                                |
| <b>Catalysts</b>                     | Rot                           | Gelb                           | Rot                            |
| <b>Pigments</b>                      | Gelb                          | Grün                           | Grün                           |

### 5.2.1 Hohe ökonomische Relevanz

Die Einstufung einer hohen ökonomischen Relevanz wird ab einem durchschnittlichen Molybdängehalt von  $\geq 5$  Gew.-% vorgenommen. Im Anwendungsgebiet Stahl sind in der Gruppe der Werkzeug- & Schnellarbeitsstähle vor allem die Schnellarbeitsstähle zu nennen, die vergleichsweise hohe Molybdängehalte, (bis 9,5 Gew.-%) aufweisen. Eine Differenzierung, insbesondere der Stahlwerke oder ähnlicher Unternehmen zwischen Bau-, Werkzeug oder Schnellarbeitsstahl, war in diesem Rahmen sowie mit den vorhandenen Informationen nicht zu leisten, da auch häufig übergreifend produziert wird. Dies erklärt die hohe Anzahl aufgeführter Unternehmen im übergeordneten Anwendungsgebiet Stahl. Die Liste der Unternehmen für die Molybdän eine hohe ökonomische Relevanz aufgrund dieser Bewertung einnimmt ist dem Kompendium zu entnehmen.

### 5.2.2 Hohe technische Relevanz

Im Anwendungsgebiet Stahl, vor allem im Bereich Baustahl sowie Werkzeugstähle, kann von einer hohen technischen Relevanz aufgrund zukünftig zunehmender Urbanisierung in Asien ausgegangen werden. Auch im Anwendungsgebiet Gusseisen, in dem Deutschland bezüglich Mengen europaweit führend ist, sind in Zukunft Zuwächse zu erwarten, da in vielen wachstumsstarken Branchen, wie der Bauindustrie, Straßenfahrzeug- und Maschinenbau sowie im Schiffbau, Luft- und Raumfahrt gegossene Komponenten wiederzufinden sind.

Die Unternehmen, für die Molybdän in diesem Bereich eine hohe technische Relevanz aufweist sind im Kompendium zu finden.

### 5.2.3 Hohe strategische Relevanz

-----  
 Unternehmensclusterung  
 -----

Molybdänsulfid ist ein wichtiger Schmierstoff und Beschichtungswerkstoff mit einzigartigen Charakteristika, der auch zukünftig eine Rolle spielen wird, da die Nanotechnologie neue Perspektiven eröffnet. So ist der Einsatz zur Entschwefelung in Brennstoffzellen oder als Halbleiter in der Elektronik von Chips, aufgrund vergleichbarer Eigenschaften zu Graphen von strategischer Relevanz. So könnte Molybdänsulfid Silizium als auch das hoch gehandelte Graphen als Material in der Chipindustrie ablösen und diese damit revolutionieren. Es könnte beim Bau von Transistoren in der Elektronik neue Möglichkeiten eröffnen. Sollte sich Molybdänsulfid neben oder gar vor Graphen durchsetzen, so wird die Molybdännachfrage künftig steigen.

Die Unternehmen für die Molybdän in diesem Bereich eine hohe strategische Relevanz aufweist ist dem Kompendium zu entnehmen.

## 5.3 Clusterung nach Parallel-Verarbeitung

Die Clusterung nach Molybdänverarbeitung ist exemplarisch und stellt weitere Elemente dar, die in den, den Anwendungen zugeordneten Unternehmen neben Molybdän verwendet werden. Aufgrund verschiedener Geschäftstätigkeiten einzelner Unternehmen bedeutet dies nicht zwangsläufig, dass diese Elemente auch in diesen Anwendungen zum Tragen kommen, sondern lediglich in den Unternehmen auch eingesetzt werden (Tabelle 11).

| <b>Application</b>               | <b>Metallic elements contained besides Mo</b>                |
|----------------------------------|--|
| <b>Steel</b>                     | Al, B, <b>Co</b> , Cr, Fe, Mn, Nb, Ni, Sn, Ta, Ti, V, W, Zn  |
| <b>Constructional Steels</b>     | N.A.   |
| <b>Tool and Highspeed Steels</b> | <b>Co</b> , Cr, Mn, Ni, V, W, V                              |
| <b>Stainless Steels</b>          | <b>Co</b> , Cr, Nb, Ni, Ti, V, W                             |
| <b>Cast Iron</b>                 | Cr, Fe, Mg, Mn, Ni, Si, V                                    |
| <b>Superalloys</b>               | Al, <b>Co</b> , Cr, Cu, Ga, Mn, Ni, Si, Sn, Ta, Ti, V, W, Zr |
| <b>Lubricants</b>                | Al, Ba, Cu, Li, Zn, graphite, heavy metal sulfides           |
| <b>Coatings</b>                  | Al, <b>Co</b> , Cr, Cu, Ni, Sn, W, Y                         |
| <b>Catalysts</b>                 | Al, Cr, Cu, Ni, PGM  |
| <b>Pigments</b>                  | Al, Bi, Cr, Fe, Ti, Zn                                       |

**Tabelle 11: Neben Molybdän genutzte Elemente in denselben Anwendungen.**

Eine Unternehmensclusterung am Beispiel von Cobalt und Molybdän gibt Kapitel 6 des Kompendiums. Diese zeigt die Verschwisterung dieser beiden Metalle innerhalb der hier aufgeführten Unternehmen im Rahmen der zugänglichen Informationen.

## 6 Vorhandene Re-Phasen

Laut Angaben der UNEP liegt der Anteil an Altschrott im Recyclingprozess für Molybdän, je nach Quelle, bei 44 % bzw. 56 % und das EOL-Recycling von Molybdän bei 30 % (UNEP 2011). Die Hauptmenge des recycelten Molybdäns geht in die Stahlproduktion. USGS beschreibt, dass über alle Anwendungen hinweg, 15 % des Molybdän-Inputs aus Altmetall stammen (USGS 2013).

### 6.1 Art der Re-Phasen

#### *Stahl:*

Stahl ist grundsätzlich zu 100 % recycelbar, ausgenommen dissipative Verluste in Öko- und Technosphäre, durch Emission oder Korrosion (Wuppertal Institut 2008).

Unterschiedliche Stahlprodukte besitzen unterschiedlich lange Lebenszyklen. Während kleine Produkte, wie Dosen eine kurze Lebensdauer aufweisen haben Schienen, Brücken, Schiffe und Gebäude sehr lange Lebenszyklen.

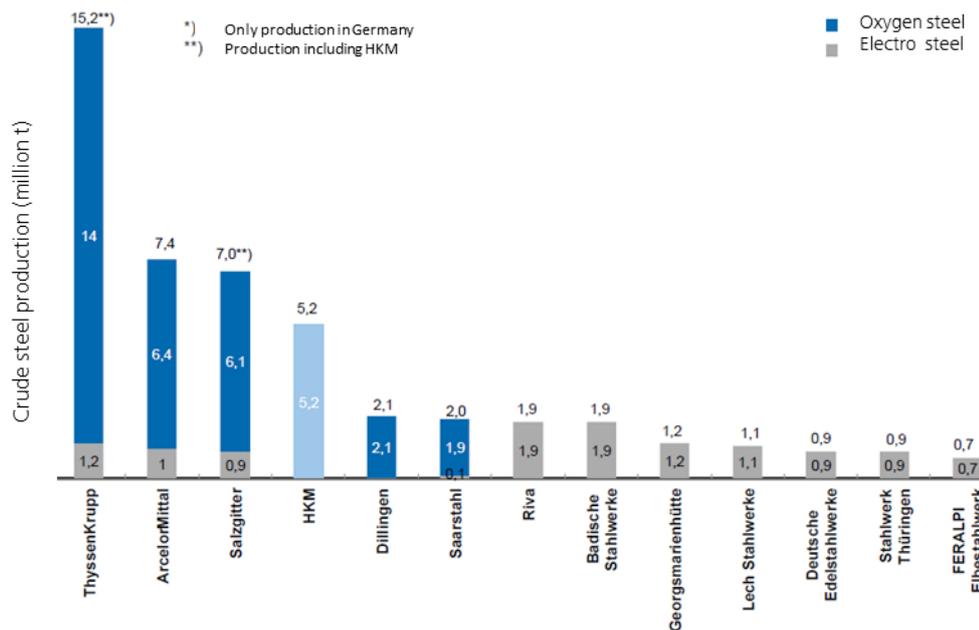
Die Stahlindustrie bezeichnet sich selbst als „Weltmeister im Schließen von Stoffkreisläufen“, jedoch steht dabei nicht die Rückgewinnung einzelner Metalle im Fokus.

Die Stahlerzeugung selbst wird grundsätzlich in zwei Verfahrensrouten eingeteilt, die Hochofenroute und die Elektrolichtbogenroute. Während bei der Hochofenroute Eisenerz unter Zugabe von Reduktionsmitteln zu Roheisen verarbeitet wird und Schrott nur in geringen Mengen zur Kühlung genutzt wird (Primärerzeugung), wird bei der Elektrolichtbogenroute ausschließlich Schrott zur Rohstahlerzeugung eingesetzt (Sekundärerzeugung) (Wuppertal Institut 2008). Das Stahlrecycling kann nicht losgelöst von der Technologie der Stahlerzeugung betrachtet werden. Während die Hochofenroute nur einen bestimmten Anteil an Schrotten im Konverter verarbeiten kann, benötigt die Elektrolichtbogenroute ausschließlich Schrotte und gegebenenfalls auch Eisenschwamm. Die Herstellung höherwertiger Stähle ist mittels Elektroofenroute aufgrund von „Verunreinigungen im Schrott“ bislang nicht geeignet (Wuppertal Institut 2008).

Etwa 1/3 des Molybdän-Recyclings entfällt auf Neuschrott und 2/3 auf Altschrott. Neuschrotte stammen dabei vorwiegend aus Fertigungsrückständen und Altschrotte aus dem Bausektor (Brücken, Gebäude, Infrastruktur, Altfahrzeuge, Produktionsmittel). Bevor Altschrotte recycelt werden können, bedarf es einer aufwändigen Vorbereitung und Einteilung in unproblematischen Schrott und Problemschrott. Zum unproblematischen Schrott zählen Maschinen- und Anlagenschrotte, Abbruchschrott usw. Problemschrott besteht im Wesentlichen aus Verbundmaterialien, die durch verschiedene Behandlungs- und Trenntechniken einen anderen Weg im Recyclingprozess nehmen als der unproblematische Teil, der nach Shreddern und Pressen als chargierfähige Ware direkt im Schrottreyclingprozess eingesetzt wird.

Die größten deutschen Stahlproduzenten sowie deren Verfahren zur Stahlproduktion und Rohstahlproduktion in Deutschland sind in Abbildung 13 abgebildet.

Molybdänhaltige Schrotte werden jedoch nicht in erster Linie aufgrund ihres Molybdängehalts recycelt, sondern vorwiegend aufgrund von Eisen, Chrom und Nickel. Molybdän wird als Verunreinigung toleriert und akkumuliert, aufgrund seiner langen Nutzungsphasen, in Stählen. Wird bei der Stahlproduktion weiteres Molybdän benötigt, wird dieses in Form von Ferromolybdän oder Molybdänoxid hinzu gegeben (Erdmann et al. 2011).



Vorhandene Re-Phasen

**Abbildung 13: Die größten Stahlerzeuger in Deutschland 2010 (Bleck und Hosten 2013).**

#### Superlegierungen (0,25 - 20 Gew.-% Molybdän):

Superlegierungen sind recycelbar und werden in großen Mengen durch verschiedene Unternehmen zurückgenommen, wobei eine Recyclingrate von 100 % noch nicht erreicht ist (Thomé-Kozmiensky 2012). Der Molybdänanteil ist vergleichsweise gering, sodass eine Rückgewinnung auf elementarer Ebene vermutlich nicht stattfindet. Ein Einsatz in Form von Legierungen bzw. fertigen Materialverbunden ist möglich (EPOW 2011) (EUC 2010).

#### Katalyse (12 - 14 Gew.-% Molybdän):

Molybdänhaltige Reststoffe von Katalysatoren und Rückstände stammen aus der chemischen, petrochemischen, der Pharma- und Lebensmittelindustrie, sowie Kessel- oder Vergasungsrückstände aus der Ölverbrennung-/vergasung oder von Nickel-Galvanik-Abfällen (Treibacher 2011).

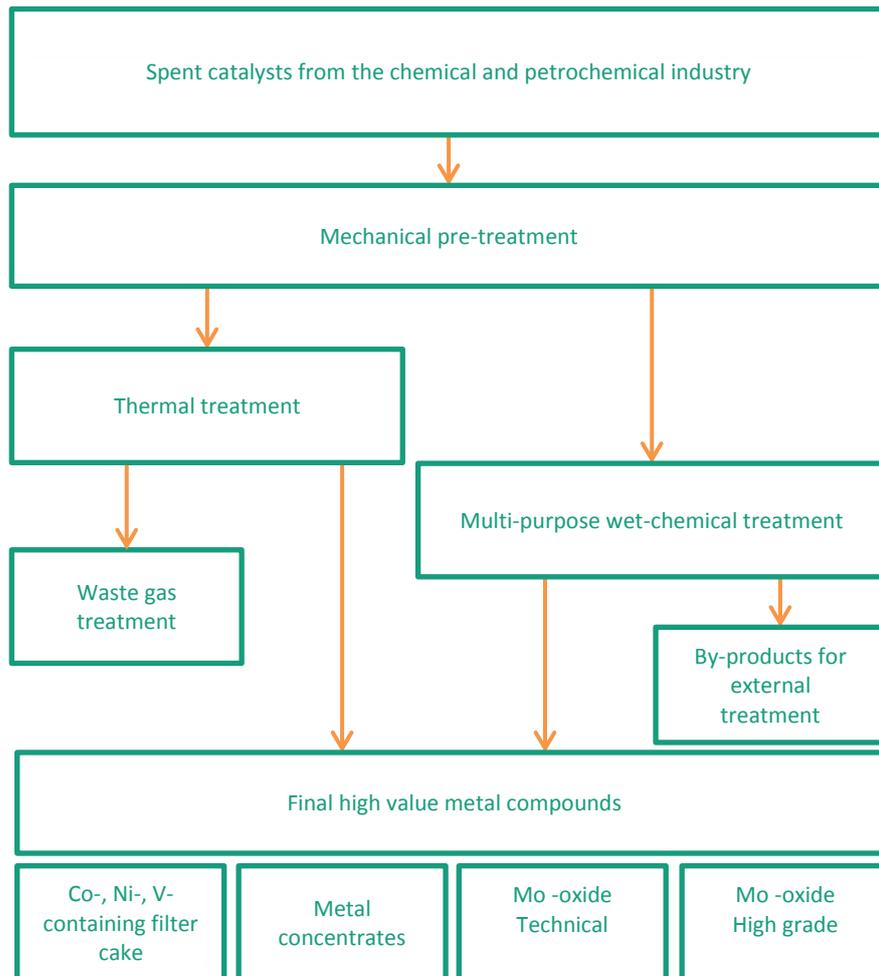
Zum größten Teil wird Molybdän aus den Hydrotreating- und Hydrocracking-Katalysatoren zurückgewonnen. Zielprodukte des Katalysatorrecyclings sind Ferromolybdän, Molybdänoxid, welche in der Stahlindustrie verwendet werden und Ammoniummolybdat.

Zur Zurückgewinnung kommen sowohl hydrometallurgische Verfahren als auch pyrometallurgische zum Einsatz, bei denen teilweise das Molybdän in der Schlacke verbleibt. Mengenmäßig sind vor allem Hydrotreating-Katalysatoren interessant, da sie Molybdänanteile von 12 - 14 % aufweisen und aufgrund ihres hohen Molybdängehalts in der Regel recycelt werden (Hassan 2003). Hydrotreating-Katalysatoren werden zu 90 % regeneriert. Die derzeitige Grenze für ein wirtschaftliches Recycling liegt bei 3 % Molybdän, wobei die Anwesenheit von Wolfram die Rückgewinnung stört.

Belastet wird das Recycling von Hydrotreating-Katalysatoren durch die Vorbehandlungskosten und den Aufwand der für die Trennung anderer Metallkomponenten nötig ist (Hassan 2003). Ein Prozessschema des Katalysatorrecyclings ist beispielhaft in Abbildung 14 dargestellt.

Vorhandene Re-Phasen

**Abbildung 14: Prozessschema des Katalysatorrecyclings (AURA Technologie GmbH 2014).**



Die Catalysis AG gewinnt rund 500 t Molybdänoxid aus gebrauchten Katalysatoren aus der petrochemischen Industrie. Neben Molybdän werden Wolfram, Nickel und Cobalt in Form oxydischer Verbindungen zurückgewonnen (Catalysis AG 2012).

Die schwedische Firma Formox AB bereitet Eisen-Molybdän-Katalysatoren aus der Formaldehyd-Produktion wieder auf.

Die Treibacher AG ist Weltmarktführer beim Recycling von Vanadium-Nickel-Molybdänkatalysatoren, die zu 100 % rückgeführt werden (Kleine Zeitung DIGITAL 2012). Weitere Unternehmen, die ein Katalysatorrecycling betreiben sind Tabelle 12 zu entnehmen.

**Tabelle 12: Einzelne Molybdänkatalysator-Recyclingunternehmen deren Zielprodukte, Kapazität und verwendetes Verfahren (Hassan 2003).**

| Recycling companies   | Process                    | Target products                             | Capacity (t/a)                 |
|-----------------------|----------------------------|---|--------------------------------|
| Aura Metallurgie GmbH | Hydrometallurgical process | Mo-Salts                                    | 10,000 Hytrotreating-Catalysts |
| Moxba BV              | Hydrometallurgical process | Mo-Salts                                    | 2,500 Hytrotreating-Catalysts  |
| Sadaci                | Pyrometallurgy process     | Mo-Oxide, Ferromolybdenum, Sodium molybdate | 3,000 Hytrotreating-Catalysts  |
| Treibacher AG         | Pyrometallurgy process     | Mo-Metal, Ferromolybdenum                   | 2,000 Hytrotreating-Catalysts  |

## 6.2 Kritische Hinterfragung des elementaren Rückgewinns

-----  
Vorhandene Re-Phasen  
-----

Die Betrachtungen der einzelnen Recyclingtechnologien zeigen auf, dass Molybdän aufgrund seiner Hauptanwendung in verschiedenen Stahlindustrien kaum elementar zurückgewonnen wird. Durch Beimischungen wird der Primäreinsatz unter Umständen etwas verringert jedoch nicht vollkommen.

Das Recycling von Beschichtungen und Schmiermitteln nach deren Gebrauch ist nicht möglich, da der Einsatz beispielsweise durch Aufsprühen sehr dissipativ ist.

Das Recycling von Katalysatoren ist demgegenüber weiter fortgeschritten, sodass dort Molybdänsalze, -oxide und auch Ferromolybdän zurückgewonnen werden.

Der elementare Rückgewinn von Molybdän ist als äußerst kritisch zu bewerten. Eine Möglichkeit zukünftig könnten, neben Superlegierungen, der Rückgewinn aus Dünnschicht-Photovoltaik sein, wenngleich die aufgebrachte Schicht nur 1 µm stark ist und noch weitere auch kritisch einzustufende Materialien in höherem Umfang dort zu finden sind (Angerer et al. 2009).

## Analyse der Ergebnisse | Mo

Die nachfolgenden Ausführungen stellen eine Bewertung der zuvor ausführlich dargestellten Markt-, Unternehmens- und Verfügbarkeitssituation dar. Die getroffenen Aussagen beziehen sich auf den Wissensstand zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Studie. Zudem beruht die aufgeführte Interpretation, Trendableitung sowie die abschließende Kriterienbewertung auf dem Fachwissen der Fraunhofer-Projektgruppe IWKS, die im Gesamtzusammenhang der genannten Fakten steht. Branchen- und unternehmensspezifisch betrachtet, können diese variieren.

### 7.1 Interpretation

Weltweit bedeutende Industriestandorte sind meist in hohem Maß von Rohstoffimporten abhängig. Aus diesem Grund sollten Industriebetriebe die Marktsituation – der Hochtechnologierohstoffe – aktiv beobachten und potenzielle Entwicklungen ableiten, um zielorientiert auf entstehende Probleme reagieren zu können.

Molybdän findet seine Hauptanwendung als Veredelungszusatz von hochwertigen und korrosionsfreien Stählen. Diese wiederum werden in unterschiedlichen Endprodukten genutzt. Nachfolgend werden wesentliche Entwicklungen und deren Bedeutung in Bezug auf die Molybdänversorgung bzw. -bereitstellung benannt.

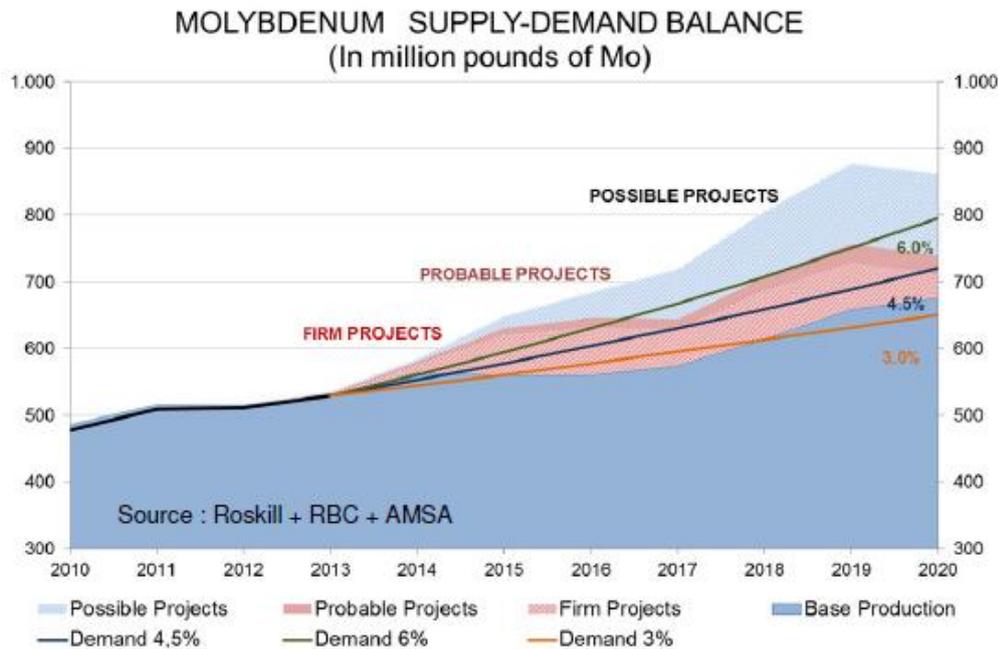
Molybdän hat eine wichtige Bedeutung im Stahlsektor und damit in unzähligen Anwendungen und vielerlei Branchen. Der hohe Schmelzpunkt und die durch den Zusatz von Molybdän erzeugte Korrosionsbeständigkeit auch unter widrigen Bedingungen führen zu verschiedensten Anwendungen auf dem Energiesektor, wie beispielsweise in der Anlagentechnik oder in Pipelines.

Da Molybdän vorwiegend als Legierungszusatz verwendet wird, ist ein elementares Recycling in 70 - 80 % der Anwendungen nicht möglich.

Molybdän hat bedingt durch die eher unkritische Versorgungslage eine mittlere Kritikalität. Jedoch sollte hier beachtet werden, dass Molybdän aufgrund des breitgefächerten Einsatzes in der Stahlbranche eine hohe wirtschaftliche Bedeutung hat. Auch der Produktionsanteil Chinas ist stetig gestiegen, sodass Exportrestriktionen zukünftig nicht ausgeschlossen sind. Auch unerwartete Ereignisse, sei es auf politischer Ebene oder auch Naturkatastrophen können die derzeit scheinbar gesicherte Supply Chain unvorhergesehen und hart treffen und die Versorgungssituation plötzlich verschlechtern.

Wenngleich die Versorgung aus geologischer Sicht sicher erscheint, so ist die Unternehmenskonzentration bei Molybdän ein zu beachtender Kritikalitätsfaktor. So entfallen auf die zehn größten Molybdänhersteller zwei Drittel der Weltproduktion.

Der Molybdänbedarf wird sich laut Angaben von Roskill (2012) bis 2016 weltweit um rund 4,6 % pro Jahr erhöhen. Wird nur China betrachtet so wird dort eine Nachfragesteigerung von 7,5 % pro Jahr erwartet. Als wichtigster Wachstumsfaktor dieser Entwicklung wird der erhöhte Bedarf nach rostfreiem Stahl, Hochleistungslegierungen sowie Katalysatoren kombiniert mit einer wachsenden Volkswirtschaft der BRIC-Staaten und weiterer Länder gesehen.



**Abbildung 15: Molybdän Angebot und Nachfrage, in Millionen Pfund (Antofagasta 2013).**

Abbildung 15 zeigt in diesem Kontext sowohl die Molybdänmenge bestehender als auch zukünftig möglicher Projekte und deren Entwicklung bis 2020. Hierbei wird deutlich, dass der prognostizierte Absatzmarkt theoretisch durch das vorhandene Angebot gedeckt werden kann. Entwicklungen zeigen jedoch, dass eine deutliche Lücke zwischen Angebot und Nachfrage entstehen kann. Demnach ist bereits bei einem Anstieg des Verbrauchs auf 6 % ein deutliches Entwicklungspotenzial zur Erschließung neuer Molybdänquellen gegeben.

Dies lässt darauf schließen, dass in absehbarer Zeit Minen, die derzeit im Bau sind, ihre wirtschaftliche Produktion beginnen werden. Hierunter zählen Projekte der aktiven Player:

- Sierra Gorda-Kupfer-Molybdän-Mine (von KGHM und Sumitomo Metal, Chile),
- Grupo Mexico und
- Rio Tinto.

Wie dargestellt trägt die Unternehmenskonzentration der Molybdängewinnung zusätzlich zu dieser Entwicklung bei. Es ist festzuhalten und kritisch zu hinterfragen, dass auf die zehn größten Molybdänhersteller zwei Drittel der Weltproduktion entfallen sowie die Marktsituation wesentlich gestalten.

Politische und gesellschaftliche Entwicklungen zur künftigen Ausrichtung unserer Gesellschaft zeigen, dass die E-Mobilität und die nachhaltige energetische Versorgung federführende Stellung einnehmen.

Die Umstrukturierung der Mobilität (E-Motiv) bietet einen weiteren Vorteil zur positiven Investition. Es wird eine Leichtbauweise gefordert, welche jedoch gleichzeitig hohe Sicherheitsstandards erfüllen muss und demnach auch gewisse Materialansprüche. Diese kann mit molybdänlegierten ultrafesten Stählen erreicht werden.

Gleichzeitig bzw. vor den bekannten Hintergründen ist damit zu rechnen, dass weitere Investitionen getätigt werden. Molybdän spielt auch zukünftig eine wesentliche Rolle als Legierungselement in Stählen.

In kleinen Zusätzen nimmt Molybdän dabei eine entscheidende Rolle ein. Hierbei dient es überwiegend der Veredelung von Stählen. Aktuell ist Molybdän für die Erzeugung von Metalllegierungen unverzichtbar. Gleichzeitig ist eine Vielzahl technischer Verfahren, Anwendungen und Endprodukte auf diesen Wertstoff angewiesen.

Demnach ist diesem Metall eine hohe bis enorme strategische Bedeutung zuzuschreiben.

Dies zeigt sich auch an der Einsatzmenge und wirtschaftlichen Relevanz des Metalls. So ist in den vergangenen Jahren der Einsatz von Molybdän stark angestiegen. Entsprechende Preisentwicklungen stellten sich zeitgleich ein.

Jüngste Entwicklungen im Bereich des Energiesektors setzen in diesem Zusammenhang Hochleistungsstähle auf Molybdänbasis voraus. Da es sich hierbei um einen starken Wachstumsmarkt handelt, der zugleich politisch unterstützt wird, ist mit dem weiteren Anstieg des Molybdänbedarfs zu rechnen.

Abschließend ist festzuhalten, dass die primäre Gewinnung von Molybdän derzeit zu mehr als einem Drittel in China stattfindet und diese in weiteren industriestarken Nationen, aufgrund der geringen natürlichen Vorkommen, keine Rolle spielen wird. Vielmehr ist entscheidend, frühzeitig die Situationen der Knappheit zu erkennen sowie das Marktgeschehen aktiv zu begleiten, um zeitnah agieren zu können. Zudem sollte berücksichtigt werden, dass die Hauptmenge des Molybdäns als Nebenprodukt in der Kupferherstellung gewonnen wird. Vor allem außerhalb Chinas ist die Gewinnung als Nebenprodukt verbreitet. In China werden rund 33 % des Molybdäns primär gefördert (General Moly 2010).

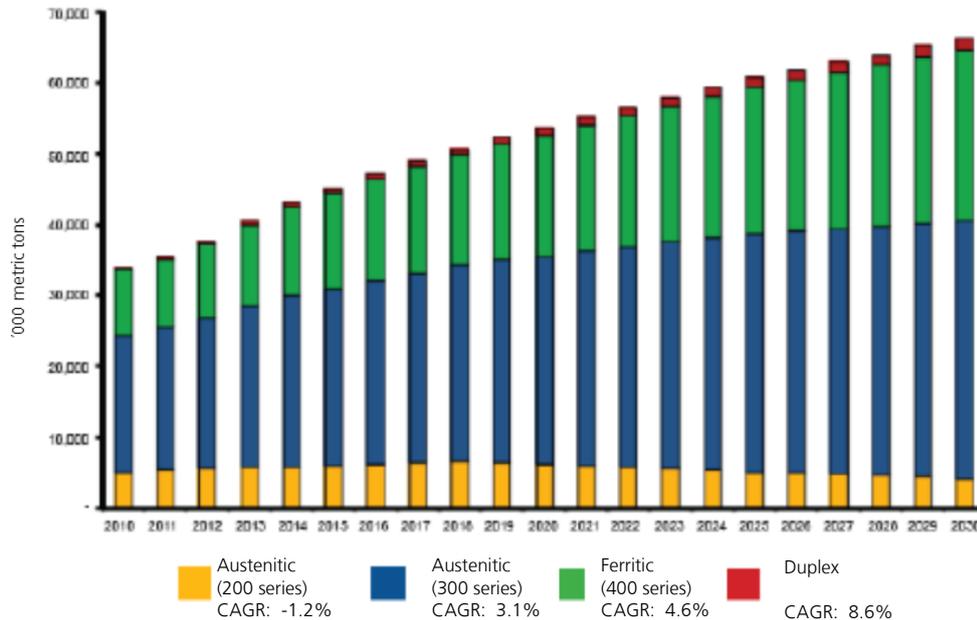
Zusammenfassend ergeben sich nachfolgende Entwicklungen:

- Die sekundäre Bereitstellung elementaren Molybdäns ist mehr als begrenzt.
- Da Molybdän einen hohen wirtschaftlichen Stellenwert hat und die Dominanz der chinesischen Versorgung zunimmt, sind zukünftig Restriktionen zu erwarten.
- Der Abbau als Nebenprodukt birgt dahingehend Nachteile, dass schnelle Reaktionen auf veränderte Marktentwicklungen noch einmal mehr ausbleiben oder nur stark verzögert stattfinden als dies im Bergbau generell der Fall ist. Das Angebot ist sehr unelastisch.

## 7.2 Trends

### 7.2.1 Stahlsektor

**Abbildung 16: Entwicklung der Stahlproduktion der austenitischen Stähle, Ferrite und Duplexstähle bis 2030 (Team Stainless 2013).**



Ähnlich wie die Molybdännachfrage wird sich zukünftig die Stahlproduktion und Stahlnachfrage erhöhen. Abbildung 16 zeigt die Entwicklung der austenitischen Stähle, Ferrite und Duplexstähle. Bis 2030 werden vor allem bei den austenitischen Stählen der 300er Serie sowie bei den Ferriten (400er Serie) deutliche Nachfragesteigerungen erwartet (Bascur 2010; Team Stainless 2013). Eine Korrelation zum benötigten Molybdänbedarf ist somit direkt gegeben.

Es ist festzustellen, dass die Versorgung der Stahlindustrie mit Molybdän einen wesentlichen Beitrag zur zukünftigen Entwicklung leisten wird. Hierbei wird der Stahlmarkt – insgesamt betrachtet – eine jährliche Wachstumsrate von 3,5 % pro Jahr aufweisen.

Dabei wird der Stahlmarkt und gleichzeitig die Stahlproduktion maßgeblich durch chinesische Unternehmen, Konzerne und staatliche Interessen begrenzt werden.

Zu erwarten ist, dass der chinesische Markt innerhalb der kommenden zehn Jahre genauso viel Stahl verbrauchen wird, wie die restliche Welt zusammen.

Die jährliche chinesische Wachstumsrate bis 2025 liegt bei rund 4,3 % (PwC 2014). Grund ist eine zunehmende Industrialisierung verbunden mit einem erhöhten Bedarf des Wohlstandsmetalls Stahl.

Zunehmender Wohlstand und der dadurch bedingte Verbrauch an molybdänbasierten Stählen werden in Kombination mit dem rasanten Bevölkerungswachstum hierzu einen wesentlichen Beitrag leisten. Zeitgleich sind in Entwicklungsländern ähnliche Bedingungen gegeben, die die Situation weiter verschärfen werden.

In verschiedensten Anwendungen und Branchen kommen molybdänlegierte Stähle in unterschiedlichen Mengen zum Einsatz. Einige interessante und sich entwickelnde sowie für die Molybdännachfrage relevante, werden im Folgenden näher erläutert.

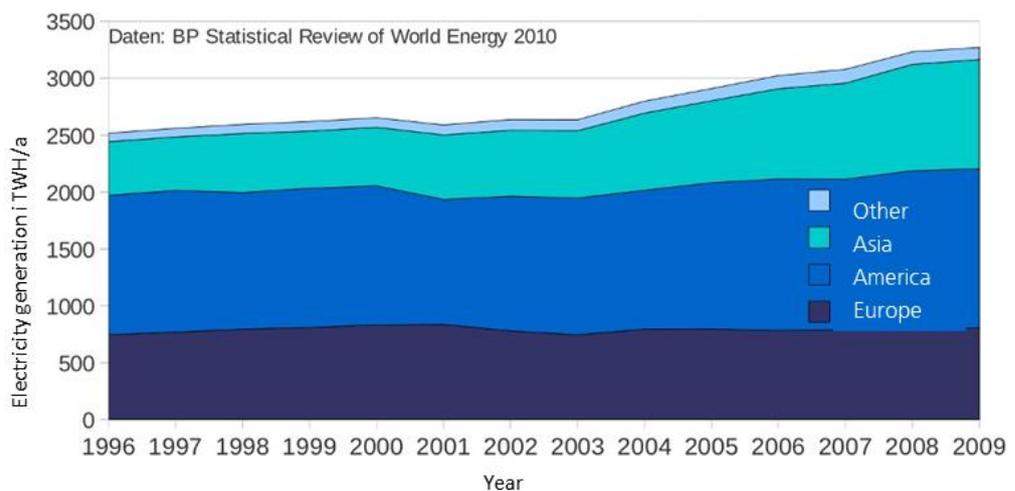
## 7.2.2 Energiesektor

Schätzungen gehen davon aus, dass rund 40 % der Molybdännachfrage vom Energiesektor bezogen werden. In verschiedensten Technologien der Öl- und Gasindustrie, den Erneuerbaren Energien, dem Bereich Katalysatoren und der Stromerzeugung werden Hauptanwendungen gesehen (General Moly 2010).

### Wasserkraft

Am Beispiel von Vattenfall Wasserkraftwerken wurde die für diese Technologie benötigten Metalle, neben Stahl und Aluminium, identifiziert. Der Großteil entfällt auf das Metall Kupfer, gefolgt von Nickel und Chrom. Molybdän spielt nur eine untergeordnete Rolle mit rund 2,2 % was dennoch einer Menge bzw. einem durchschnittlichen Materialbedarf von 2,9 kg/MW entspricht (Moss et al. 2013).

**Abbildung 17: Globale Entwicklung der Strombereitstellung durch Wasserkraft (Regenerative Zukunft 2011).**



Die Wasserkraftnutzung ist über die letzten Jahrzehnte für alle Länder in Europa nahezu konstant geblieben (Abbildung 17). Einzige Ausnahme bildet Norwegen mit einer leichten Zunahme. Der Grund dafür, dass die Wasserkraftnutzung in Europa (ausgenommen Norwegen) nicht ausgebaut wird, sind die nahezu erschöpften Möglichkeiten für den Neubau von Kraftwerken. In Tabelle 13 sind die theoretischen, technischen und wirtschaftlichen Potenziale für den Ausbau von Wasserkraftwerken weltweit, nach Kontinenten untergliedert, aufgezeigt. Vor allem das wirtschaftliche und technisch umsetzbare Potenzial spielt eine wesentliche Rolle um einschätzen zu können, wie viel Wasserkraft im Land mit technisch machbaren und finanziell rentablen Aufwand umsetzbar ist. Es wird ersichtlich, dass Europa, Australien, Nord- und Mittelamerika kaum über Möglichkeiten eines weiteren Ausbaus der Wasserkraft verfügen. Afrika, Südamerika und Asien hingegen verfügen noch über weitreichende Möglichkeiten, um ihren Wasserkraftanteil an der Stromerzeugung zu erhöhen. Auch für Deutschland ist das wirtschaftliche Potenzial bereits ausgeschöpft. Lediglich Norwegen verfügt nach dieser Studie noch über ein nennenswertes Ausbaupotenzial. Außer Acht gelassen wurde hier jedoch das Potenzial der Meereskraftwerke, welches bisher noch nicht ausreichend erfasst ist. Natürlich sind hier vor allem Länder mit großem Küstenanteil, vor allem zu offenen Ozeanen, bevorzugt (Regenerative Zukunft 2012).

Die Umsetzung der geplanten Wasserkraftanlage wird unter den hier aufgeführten Annahmen rund 837.000 t Molybdän in Anspruch nehmen. Aufgrund der zunehmend kritischen Versorgungslage im Energiesektor sowie der Suche nach adäquaten Alternativen bildet die Wasserkraft eine lang erprobte Technologie, deren Ausbau

zukünftig, dort wo es technisch und wirtschaftlich möglich sein wird, weiterhin ausgebaut wird. Bei dieser Betrachtung sind Meerwasserkraftwerke, wie Meeresströmungskraftwerke, Gezeitenkraftwerke, Salzgradientenkraftwerke und Wellenkraftwerke nicht betrachtet worden. Auch hier ist zukünftig ein zunehmendes Potenzial molybdänhaltiger Stähle zu sehen, welche unter salzhaltigen und widrigen Bedingungen eingesetzt werden (Regenerative Zukunft 2012).

| Continent                | Theoretical potential TWh/a | Technical potential TWh/a | Economical potential TWh/a | Installed capacity GW | Currently under construction MW | Proposed (GW) |
|--------------------------|-----------------------------|---------------------------|----------------------------|-----------------------|---------------------------------|---------------|
| Africa                   | 3,876                       | 1,888                     | 1,100                      | 20.6                  | 1,806                           | 75            |
| Asia                     | 19,400                      | 6,800                     | 3,600                      | 241                   | 68,664                          | 154           |
| Australia                | 600                         | 270                       | 107                        | 13.3                  | 175                             | 0.74          |
| Europe                   | 3,220                       | 1,035                     | 791                        | 175.6                 | 1.978                           | 8             |
| North- and Middleamerica | 6,312                       | 1,663                     | 1,000                      | 158                   | 3,931                           | 12.1          |
| South america            | 6,200                       | 2,700                     | 1,600                      | 111.5                 | 11,438                          | 38.8          |
| <b>World</b>             | <b>39,608</b>               | <b>14,356</b>             | <b>8,198</b>               | <b>720</b>            | <b>87,992</b>                   | <b>288.6</b>  |

**Tabelle 13: Globale Verteilung der Wasserkraftpotenziale (Regenerative Zukunft 2011).**

### Geothermie

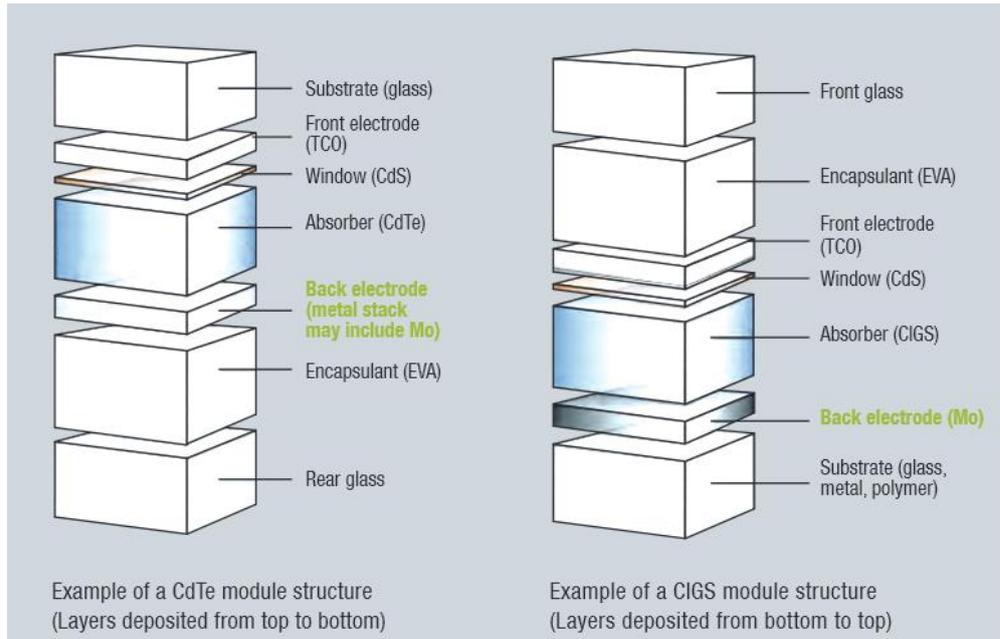
In der Geothermie, ähnlich dem Öl- und Gassektor, sind Rohrleitungen mit hoher Beständigkeit von Nöten. Vor allem Förderrohre müssen extremen Bedingungen, wie Temperaturen bis zu 500 °C, saure Umgebungen (pH = 1) sowie hohen Salz- und Gasgehalten standhalten. Eines der Metalle, welches Stahllegierungen zugesetzt wird, damit diese unter solchen Bedingungen beständig bleiben, ist Molybdän. Untersuchungen von Moss et al. (2013) zeigen, dass unter anderem die Legierungen T-95, 316L und 825 häufig genutzt werden. Diese enthalten zwischen 0,15 %, 2,5 % und 3,5 % Molybdän. Der Molybdänbedarf der Geothermie kann mit durchschnittlich 7,2 kg/MW angegeben werden.

Die installierte thermische Leistung der tiefen Geothermie-Projekte in Deutschland beträgt insgesamt rund 248 MW. Die dort benötigte Molybdänmenge ist mit rund 2.000 t anzusetzen (Statista 2014).

### Photovoltaik

In Dünnschicht-Photovoltaikzellen findet in der Regel der Zellaufbau auf Molybdän beschichteten Glassubstraten statt. Daher spielt Molybdän bei dieser wachsenden Technologie eine wichtige Rolle. Die Schicht aus Molybdän übernimmt die Funktion des Rückkontaktes. Das Molybdän wird entweder durch Sputtern oder Elektronenstrahlverdampfen auf das Glas aufgebracht. Die Molybdänschicht ist rund 1 µm dick. Abbildung 18 zeigt den Aufbau eines CdTe sowie CIGS Moduls (Angerer et al. 2009). Je nach Wachstum der Nachfrage wird sich der Bedarf, der derzeit bei rund 160 Tonnen liegt (2011), bis zum Jahr 2020 um das 8- bis 16-fache auf 1.300 bis 2.600 t erhöhen (IMOA 2013b; Virga 2012).

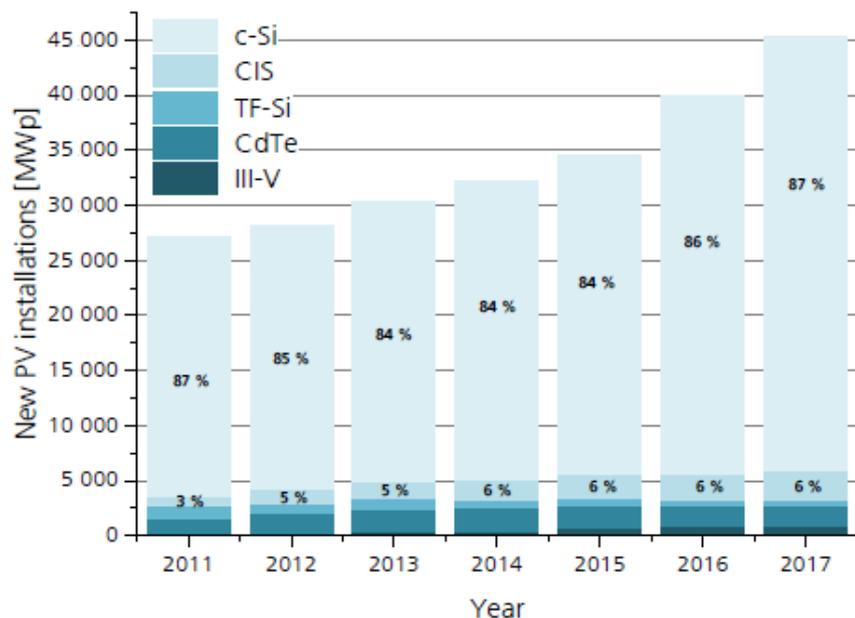
**Abbildung 18: Aufbau eines CdTe und CIGS Moduls (IMO 2013b).**



Trotz verminderter politischer Anreize in den hauptsächlichen Photovoltaikmärkten (Deutschland, Italien und Frankreich) wird davon ausgegangen, dass die neuen Märkte (China, Indien und USA) den Nachfragerückgang der alten nicht nur kompensieren, sondern sogar zu einer weltweit stetigen Nachfragesteigerung führen werden. Diese wird allerdings mit jährlich rund 9 % nicht ähnlich stark erwartet wie in den vergangenen Jahren (~30 % über die letzten 30 Jahre). Entgegen vieler Erwartungen über das Durchsetzungsvermögen von Dünnschichttechnologien, wird heute davon ausgegangen, dass Photovoltaik, basierend auf kristallinem Silizium, nicht nur seine Vorreiterrolle behalten, sondern diese auch noch weiter ausbauen wird (Abbildung 19) (clerc 2012).

Aufgrund des wachsenden PV-Marktes, kann insgesamt von einer wachsenden Zahl neuer CIS-Modul-Installationen ausgegangen werden. Bis zum Jahr 2017 werden die neu installierten CIS-Module etwa 2,8 GW Peak-Leistung produzieren und einem Marktvolumen von 1,9 Mrd. US\$ entsprechen. Ein Wachstum der CdTe und CIGS Technologie bedeutet auch einen zunehmenden Molybdänbedarf.

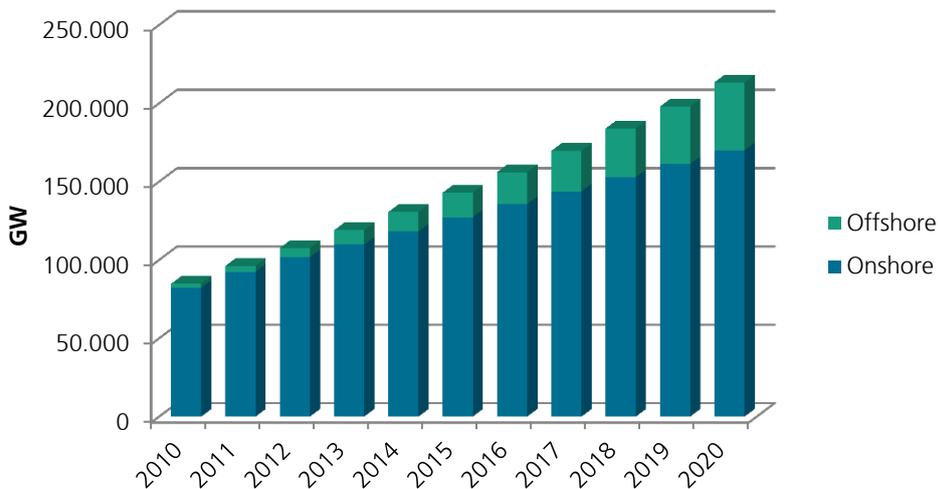
**Abbildung 19: Zu erwartende Entwicklung des Photovoltaikmarktes bis 2017 (clerc 2012).**



## Windenergie

Hochfeste Stähle werden auch im Bereich der Windenergie, vor allem im Offshore-Sektor genutzt. Der Molybdängehalt variiert auch hier zwischen 0,3 und 2,5 % (Moss et al. 2011).

Der Metallbedarf der Windenergie liegt für Molybdän nach Moss et al. (2011) bei 136,6 kg/MW. Im Offshore-Bereich sind hochfeste molybdänhaltige Stähle aufgrund der vorherrschenden Bedingungen vermehrt zu vermuten als im Onshore-Bereich. Abbildung 20 zeigt, dass vor allem im Offshore-Bereich zukünftig weitere Kapazitätsausweitungen zu erwarten sind. Molybdän wird hier in Form von Legierungen weiterhin eine wichtige Rolle spielen. Unter Annahme der gesamten Kenndaten ist der Molybdänbedarf für Offshore-Anlagen (bei einem Molybdängehalt von 2,5 %) im Jahr 2020 auf ca. 150 t zu beziffern.



**Abbildung 20: Installierte Onshore und Offshore Leistung in der EU in GW (EWEA 2011).**

## Öl und Gas

Mit der steigenden Weltbevölkerung auf 9 Milliarden bis 2050 wird die Molybdännachfrage auf dem Energiesektor zunehmen.

Neben erneuerbaren Energien werden sich auch weitere Alternativen durchsetzen. Eine in den letzten Jahren schnell wachsende Branche des Energiesektors ist die Extraktion von Schieferöl und -gas. Devon Energy eine der führenden unabhängigen Öl- und Erdgasexplorationsunternehmen in den USA und Kanada schätzt, dass Vertiefungen dieser Art bis zu viermal so viel Stahl benötigen als herkömmliche Bohrlöcher. In den USA ist die Schiefergasproduktion seit 2007 bis heute um 400 % angestiegen. JP Morgan schätzt, dass die amerikanische Schiefergasproduktion nur die Spitze des Eisbergs sein wird. Andere Länder wie China, Australien und Kanada setzen zunehmend diese Technik ein, um ihre Energieversorgung zu sichern. Mit dem zunehmenden Stahlbedarf in diesem Bereich steigt auch die Molybdännachfrage, da molybdänhaltige Stähle die unter widrigen Bedingungen standhalten, dort Einsatz finden (General Moly 2011).

In den letzten Jahren ist der Molybdänbedarf der gängigen Pipelines für den Transport von Öl und Gas sowie im Anlagenbau von 0,1 auf 0,2 - 0,3 % angestiegen. Obwohl der Molybdänanteil sehr gering erscheint, liegt der Bedarf für eine Meile einer solchen Pipeline, abhängig von der Größe, bei rund 1 t Molybdän. Neuere Stähle haben etwas höhere Molybdängehalte und ersetzen Karbonstähle zunehmend. Die Nord Stream Pipeline, die russisches Erdgas durch die Ostsee nach Deutschland transportiert, ist rund

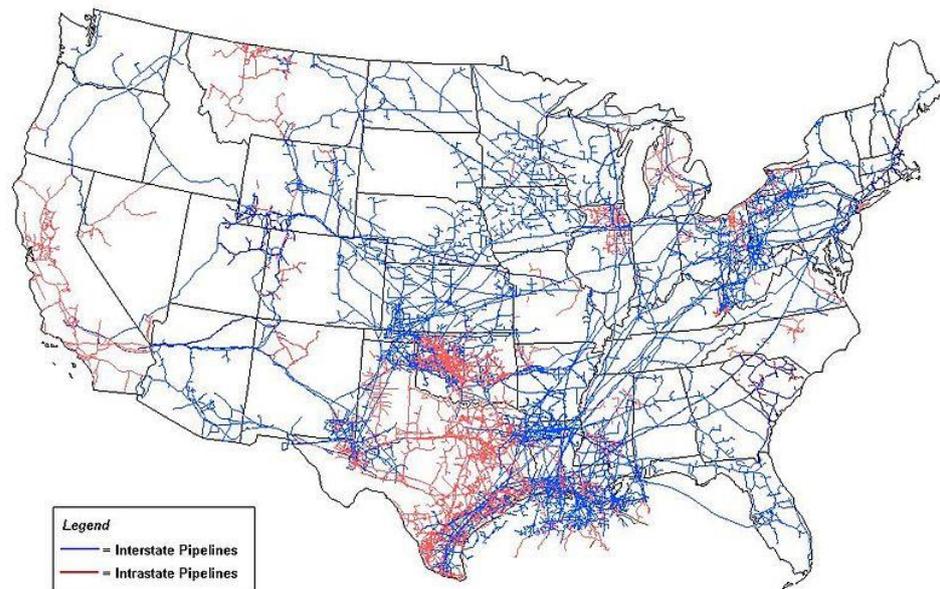
1.224 km lang und hat damit eine theoretische Molybdänmenge von ungefähr 760 t. Auch zukünftig werden solche Pipelines nachgefragt vor allem in Ländern, deren infrastruktureller Standard derzeit noch auf niedrigem Niveau ist, wodurch vermehrt Baumaßnahmen, sowohl auf diesem Energiesektor aber auch anderen Stahlnachfragenden Sektoren, getätigt werden.

Wie dicht solche Netze an Gaspipelines sein können, zeigen Abbildung 21 für die europäische Union und Abbildung 22 für die USA.

**Abbildung 21: Vorhandene und im Bau oder in der Planung befindliche Erdgasleitungen in Europa (blz Bayern 2009).**



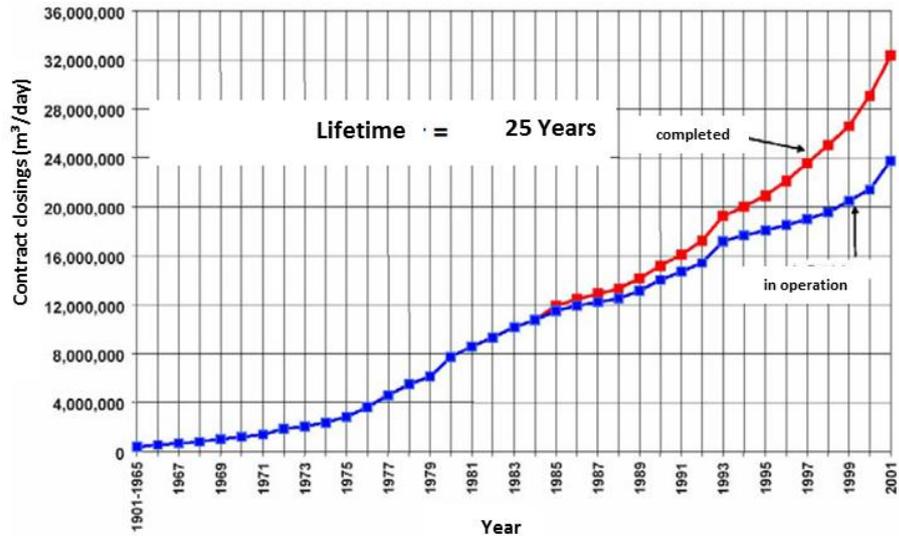
**Abbildung 22: Erdgas Pipelines in den USA (Wikipedia 2011).**



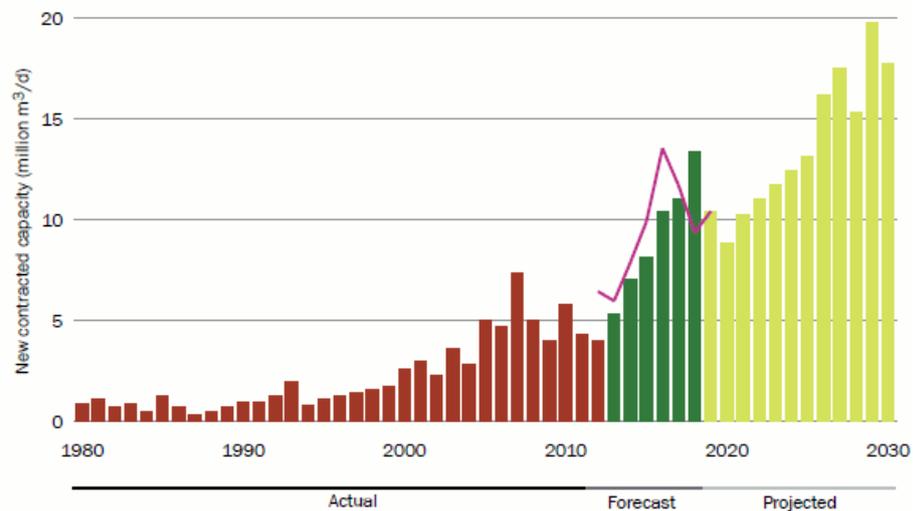
Source: Energy Information Administration, Office of Oil & Gas, Natural Gas Division, Gas Transportation Information System



**Abbildung 24: Weltweite Meerwasserentsalzungskapazität von 1965 bis 2001 (Angerer et al. 2009).**



**Abbildung 25: Entwicklung der Kapazität der Meerwasserentsalzungsanlagen bis 2030 (Globalwaterintel 2013).**



Source: DesalData.com

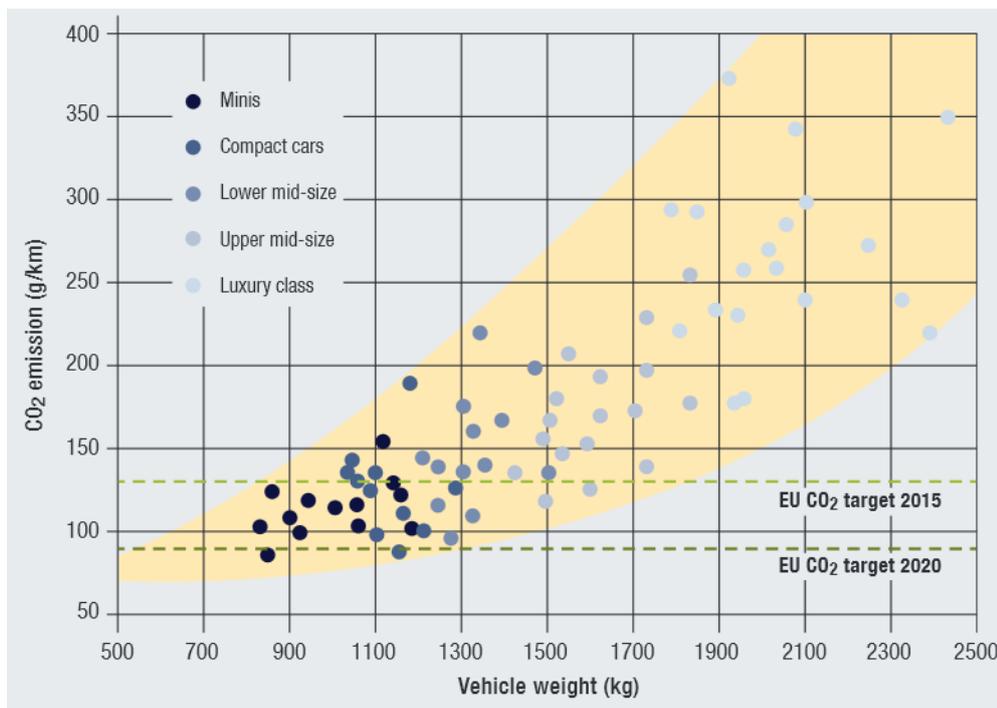
In Abbildung 25 ist die Zunahme der weltweiten Meerwasserentsalzungskapazität von 1965 bis 2001 dargestellt. Unter der Annahme, dass sich nicht Titan sondern molybdänhaltiger Stahl in der Anlagentechnik weiter durchsetzt, steigt der Molybdänbedarf der Meerwasserentsalzung um das rund 3,8-fache auf ca. 3.510 t bis 2030. Je nach Größe der zukünftig gebauten Anlagen sowie der Materialentwicklung kann dieser Bedarf auch höher liegen. Der jährliche Zubau liegt Prognosen zu Folge im Jahr 2030 bei 18,8 Mio. m<sup>3</sup>/d (Angerer et al. 2009). Abbildung 24 verdeutlicht die wachsende Kapazität bis 2030 und bestätigt einen jährlichen Zuwachs von rund 18 Mio. m<sup>3</sup>/d bis 2030.

## 7.2.4 Automobilsektor

Automobile die in den letzten 20 Jahren produziert wurden, enthalten vorwiegend Karbonstähle ohne Molybdän. Heute werden moderne molybdänhaltige Stähle genutzt, die diese „altmodischen“ Karbonstähle vom Automotivmarkt verdrängen (Battrum 2007).

Derzeit werden rund 14 % des Molybdäns durch den Automotivsektor nachgefragt. In der Automobilindustrie sorgt mit Molybdän gehärteter Stahl für einen geringeren Materialbedarf und führt damit zu Gewichtsreduktionen. Die Automobilhersteller versuchen stetig ihre Fahrzeuge hinsichtlich Sparsamkeit und Sicherheit zu optimieren.

Kraftstoffeffizienz und ein geringes Gewicht werden künftig die kritischen Designelemente sein (General Moly 2010). Gerade im Bereich der Kraftstoffeffizienz sorgen politische Vorgaben für stetige Verbesserungen und Entwicklungen. Mit der Vorgabe eines bestimmten CO<sub>2</sub> - Ausstoßes bis 2015 und einer weiteren Senkung bis 2020 in der EU stehen die Automobilhersteller vor Herausforderungen die es in Zusammenarbeit mit Forschung und Entwicklung zu realisieren gilt. Abbildung 26 zeigt, dass mit zunehmendem Gewicht des Automobils der CO<sub>2</sub> - Ausstoß steigt. Daher sind Leichtbauvarianten auch von politischer Seite gewünscht und umzusetzen (IMO 2014a).

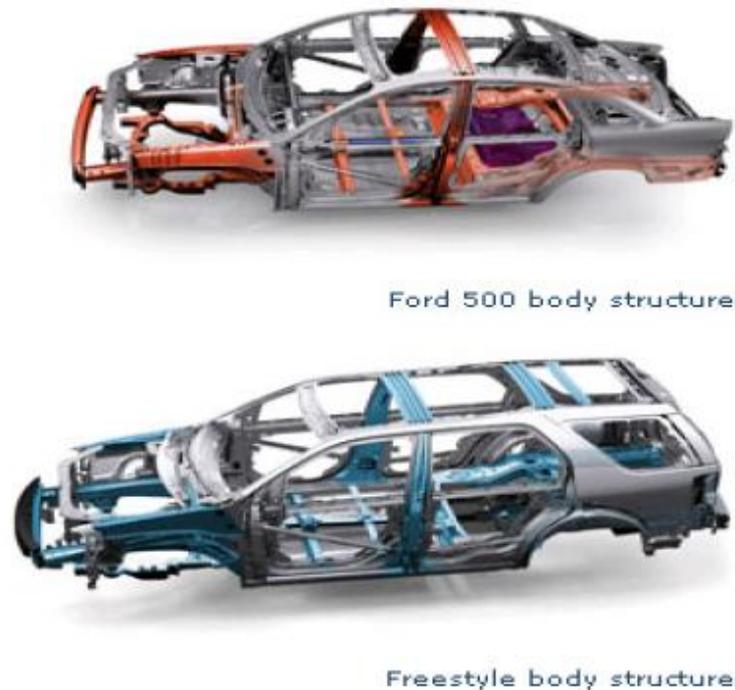


**Abbildung 26: Einfluss des Automobilgewichts auf den CO<sub>2</sub>-Ausstoß (IMO 2014a).**

Eine Vielzahl der Entwicklungen in diesem Bereich weist einen zunehmenden Molybdänbedarf in Form hochfester Stähle, beispielsweise im Fahrgestell, Motorblock, Rädern oder Hochleistungsmotorölen auf. Abbildung 27 zeigt am Beispiel eines Ford 500 und Freestyle welche Bauteile aus solchen Stählen sind. Ein typisches heute produzierte Automobil enthält Schätzungen zu Folge < 1 Pfund Molybdän. Die Tendenz ist steigend.

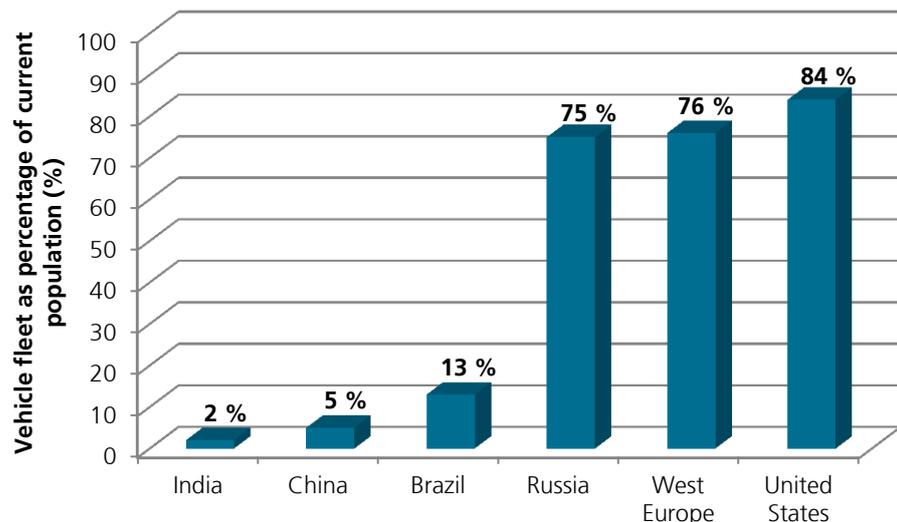
Durch die Verwendung solcher ultrahochfesten Stähle (UHSS = ultra high strength steel, AHSS = advanced high strength steel) in der Automobilindustrie konnte beispielsweise das Gewicht des Mazda 2 um 100 kg, im Vergleich zum vorigen Modell, gesenkt werden. Der Anteil der ultrahochfesten Stähle liegt bei diesem Modell bei 40 % und die Kraftstoffeffizienz wurde um 15 % gesteigert (Battrum 2007). Der Molybdänanteil liegt zwischen 0,2 - 0,4 %. Auch Nissan möchte das Gewicht seiner Fahrzeuge durch den Einsatz solcher Stähle um 15 % senken. Hier sollen rund 25 % der Teile der neuen Modelle aus solchen Stählen bestehen (Auto Mattern 2014).

**Abbildung 27: Verwendung von UHSS und AHSS Stählen in einem Ford 500 und Ford Freestyle (farbig markiert) (Battrum 2007).**



Im Jahr 1995 enthielt noch kein Bauteil der europäischen Automobile ultrahochfeste Stähle. Mittlerweile liegt der Anteil bei rund einem Drittel. Es wird prognostiziert, dass sich dieser Anteil in den nächsten zehn Jahren verdoppeln wird und damit auch der Molybdänbedarf steigen wird. Neben dem Fahrgestell findet Molybdän in Form von Schmierstoffen als MoS<sub>2</sub> oder als Molybdänoxid bzw. Ammoniumoctamolybdat, die als Rauchminderer in Plastik vor allem PVC genutzt werden, hier Anwendung. Die Automobilnachfrage wird auch zukünftig wachsen. Insbesondere 2008/09, mit der Einführung eines 2.500 US\$ Automobils in Asien (Tatar Motors), ist die Nachfrage stark angestiegen (Battrum 2007).

**Abbildung 28: Anteil der Autoflotte gemessen an der aktuellen Bevölkerungszahl 2010 (General Moly 2011).**

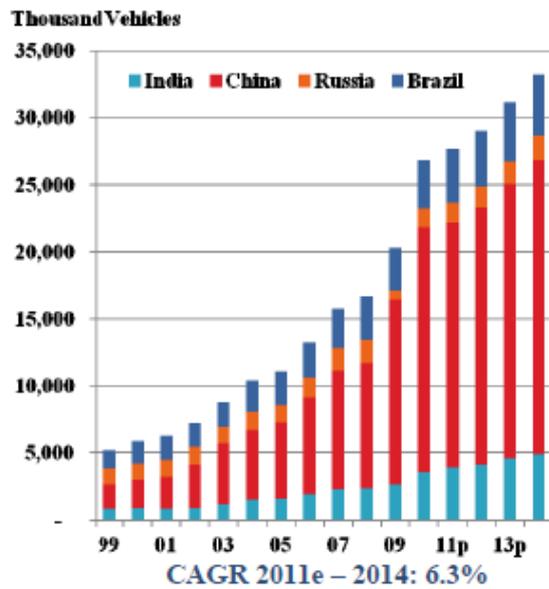


In den nächsten Jahren ist im Automotivbereich eine verstärkte Nachfrage zu sehen, da die Autoflotten der Schwellen- und Entwicklungsländer wenig ausgebaut sind. Abbildung 28 zeigt den Anteil der Autoflotte an der derzeitigen Bevölkerung. Es ist zu erkennen, dass beispielsweise der Ausstattungsgrad in China bei 5 % liegt, d.h. nur 5 % der dortigen Bevölkerung besitzen ein Auto. In Brasilien sind es 13 % und in

Indien sind es sogar nur 2 % der Bevölkerung. Mit steigender Wohlstandsentwicklung wird die Automobilnachfrage in diesen Ländern weiter steigen und damit auch die Rohstoffnachfrage (General Moly 2011).

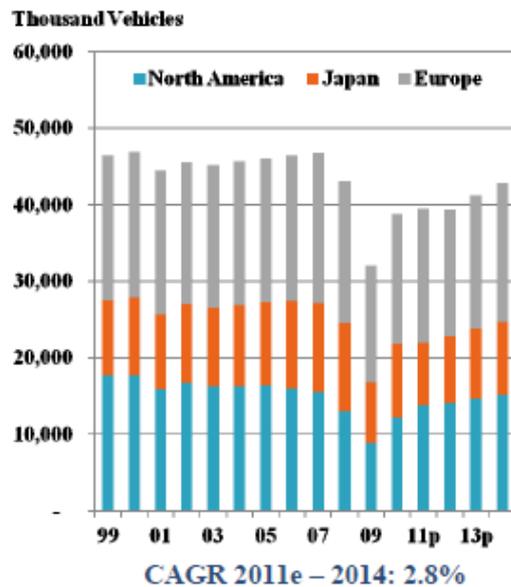
Abbildung 29 bestätigt, dass die Nachfrage an Automobilen in den letzten 5 Jahren vor allem in Brasilien, Russland, Indien und China kontinuierlich gestiegen ist, während der Bedarf in Nordamerika, Japan und Europa stagnierte.

**Vehicle Production in Brazil, Russia, India and China**



a)

**Vehicle Production in North America, Japan and Europe**



b)

**Abbildung 29: Vergleich der Automobilnachfrage der BRIC-Staaten (a) sowie Nordamerika, Japan und Europa (b) (Virga 2012).**

Auch langfristig, mit Blick auf alternative Antriebstechnologien, wie die Elektromobilität, wird eine leichte aber dennoch sichere Bauweise priorisiert werden, um durch Gewichtsreduktion größere Reichweiten zu realisieren. Die Notwendigkeit des Einsatzes von Molybdänstählen ist demnach gegeben und wird weiter ansteigen.

## 7.3 Kriterienbewertung

Die Kriterienbewertung (Tabelle 14) ordnet differenziert nach Wirtschaftszweigen/Branchen dem zukünftigen Molybdän-Markt eine potenzielle Anwendungsentwicklung und einen entsprechenden Einfluss zu. Hierbei wird unterschieden zwischen:

- ++ Potenzial für Investitionen aus industrieller Sicht.
- + Kombiniertes Potenzial für Entwicklungen aus Forschung, Industrie und Wirtschaft.
- 0 Entwicklungspotenziale vorhanden.
- Keine Entwicklungspotenziale vorhanden.

Gleichzeitig wird Wert darauf gelegt, dass neben Entwicklungspotenzialen aktiv betroffener Wirtschaftsunternehmen auch die Gesamtbreite vorhandener Branchen erfasst und erläutert wird. Diese stellen sekundäre „Nutzer“ dar, sodass vorhandene Wechselwirkungen näher differenziert werden können.

**Tabelle 14:**  
Entwicklungspotenziale nach Wirtschaftszweigen/Branchen (Einschätzung durch die Fraunhofer-Projektgruppe IWKS).

| Industrial sectors                           | Assessment (IWKS) |
|--|-------------------|
| Automotive industry                          | ++                |
| Building industry                            | +                 |
| Mining and raw materials                     | ++                |
| Chemistry and Pharmacy                       | 0                 |
| Electrical and electronics industry          | +                 |
| Energy supply                                | ++                |
| Disposal and recycling                       | ++                |
| Nutrition                                    | -                 |
| Precision mechanics and optics industry      | 0                 |
| Research and Development                     | +                 |
| Liberal professions                          | -                 |
| Healthcare industry                          | 0                 |
| Real estate and housing                      | +                 |
| Information technology and telecommunication | -                 |
| Leather industry                             | -                 |
| Aerospace                                    | ++                |
| Maritime economy                             | 0                 |
| Machinery and plant engineering              | +                 |

**Industrial sectors****Assessment (IWKS)**

Analyse der Ergebnisse | Mo

|   |    |
|---|----|
| Paper and printing industry                   | -  |
| Railroad vehicle construction                 | -  |
| Footwear industry                             | -  |
| Steel and metal                               | ++ |
| Textile and clothing industry                 | -  |
| Traffic, transport, renting of movable assets | +  |
| Water management                              | +  |
| Two-wheeler industry                          | -  |

### 7.3.1 Kommentare zur potenziellen Entwicklung

Insgesamt ist zu berücksichtigen, dass Molybdän bzw. dessen Verwendung einen wesentlichen Einfluss auf die zukünftige wirtschaftliche Entwicklung von Unternehmen und Ländern hat. Gleichzeitig sind wenige Akteure am Markt aktiv, was auch dadurch bedingt ist, dass Molybdän in vielen Fällen als Koppelprodukt der Kupfergewinnung gefördert wird.

Zusätzlich ist dieses Gewürzmetall elementar für die Erzeugung hochwertiger Stähle, die in einer Vielzahl heutiger und auch zukünftiger Technologien Anwendung finden werden.

Entsprechend sind aus aktueller Sicht alle Bereiche der Gesellschaft – oder des heutigen Lebens – von der Versorgung mit Molybdän abhängig.

Besonders vor dem Hintergrund der Energiewende, zunehmender Globalisierung und Entwicklung innovativer Werkstoffe, ist die Verfügbarkeit von Molybdän ein maßgeblicher Faktor, dessen Markt stetig zu beobachten ist. Gleichzeitig gilt es in diesem Zusammenhang Handlungsoptionen zu schaffen, die zur Reduktion der Versorgungsproblematik führen.

Vor diesem Hintergrund ergeben sich für die nachfolgenden Industriesektoren und Branchen folgende Entwicklungspotenziale.

#### **Automobilindustrie (Potenzial für Investitionen aus industrieller Sicht)**

*„In der Automobilindustrie spielen High-Tech-Stähle bereits heute eine entscheidende Rolle der Fahrzeugkonzipierung und Fertigung. Aufgrund politisch und gesellschaftlich gewollter Umstrukturierungen werden diese auch zukünftig verstärkten Einsatz finden. Einzelne Automobilkonzerne denken derzeit darüber nach, eigene Minen aufzukaufen und eigenständig zu betreiben, um ihre Versorgung mit Rohstoffen – also auch benötigtem Molybdän – nachhaltig zu sichern. Gleichzeitig wird nach neuen Substituten gesucht.“*

#### **Bauwirtschaft (Kombiniertes Potenzial für Entwicklungen aus Forschung, Industrie und Wirtschaft)**

*„Die heutige Bauwirtschaft ist auf Stahl angewiesen. Hierbei gilt, dass mit steigender Komplexität der Bauwerke auch höhere Ansprüche an den allgegenwertigen Baustoff Stahl gestellt werden. Molybdän wird hier mittel- bis langfristig Mittel zum Zweck bleiben. Aufgrund der Tatsache, dass andere (Bau-)Materialien Alternativen bieten, sind Bestrebungen ausschließlich in Kombination mit Politik, Wirtschaft und Forschung absehbar.“*

#### **Bergbau und Rohstoffe (Potenzial für Investitionen aus industrieller Sicht)**

*„Die Minenproduktion von Molybdän wird sich dem steigenden Bedarf anpassen. Hierbei ist aus aktueller Sicht die Volksrepublik China als Global-Player zu sehen, woran sich langfristig nichts ändern wird. Demnach werden in Zukunft Investitionen zur gezielten Abgrenzung dieser Abhängigkeit stattfinden. Demnach ist ebenso ein großes Potenzial für die effiziente Rückgewinnung von Molybdän zu sehen, die Abhängigkeiten mindern und Marktvorteile versprechen.“*

#### **Chemie und Pharmazie (Entwicklungspotenziale vorhanden)**

*„Das Recycling von bspw. eingesetzten Katalysatoren wird bereits betrieben. Zudem werden unterschiedliche Molybdänverbindungen rückgewonnen, die wirtschaftlich dem Second-Life zugeführt werden. Demnach ergibt sich für diese Branche ausschließlich ein Entwicklungspotenzial zur Rückgewinnung elementaren Molybdäns aus entsprechenden Produkten und Abfällen. Die Notwendigkeit hierzu ist vergleichsweise gering einzuschätzen.“*

### **Elektrotechnik- und Elektronikindustrie (Kombiniertes Potenzial für Entwicklungen aus Forschung, Industrie und Wirtschaft)**

„In Dünnschichttransistoren (TFT) dient Molybdän als leitende Metallschicht. Molybdän ist aufgrund der guten Haftung auf Glas und einer hohen elektrischen Leitfähigkeit ein ebenso weit verbreiteter Werkstoff für Elektrodenschichten in Berührungssensoren (Touch panels). Der Markt für diese Technologien ist stark gestiegen, gleichzeitig existieren aktuell keine wirtschaftlichen Systeme zur gezielten Rückgewinnung der eingesetzten Materialien bzw. des Molybdäns. Demnach ist zu erwarten, dass mit zunehmender Begrenztheit und unter steigendem Anfall ausgedienter Geräte, neue Lösungen zur nachhaltigen Nutzung gesucht werden. Dies wird jedoch ausschließlich in Kombination zwischen Forschung, Industrie und Wirtschaft realisierbar sein.

Im Elektro- und Elektroniksektor ist Molybdän vertreten. Die zukünftige Rolle jedoch unsicher. Da eine Vielzahl weiterer Metalle aktuell von höherem Interesse im Rahmen des effizienten Recyclingprozesses ist, werden ausschließlich Nischentechnologien in diesem Markt etabliert werden und entsprechende Investitionen tätigen. Begründet ist dies auch dadurch, dass EoL-Produkte eine vergleichsweise geringe Konzentration an Molybdän aufzeigen und dieses komplex gebunden ist.“

### **Energieversorgung (Potenzial für Investitionen aus industrieller Sicht)**

„Molybdän wird für die Energieversorgung ein wesentliches Element bleiben, da hochwertige Energieversorgungssysteme hochwertige Materialien voraussetzen. Da sich bspw. der Markt der erneuerbaren Energien in einem großen Wachstum befindet und kontinuierlich ausgebaut wird, ist schon heute zu überlegen, wie mit diesen Technologien am Ende ihrer Laufzeit umzugehen ist. Innovationen ergeben sich in diesem Kontext vorwiegend aus der Rückgewinnung einzelner Elemente wie Molybdän, die als Gewürzmetalle eingesetzt werden. Aufgrund der Kritikalität und des bevorstehend Aufkommens dieser Materialverbünde werden zukünftig auf diesem Gebiet deutliche Bestrebungen getätigt werden.“

### **Entsorgung und Recycling (Potenzial für Investitionen aus industrieller Sicht)**

„Logistische Strukturen des Recyclings der Hauptanwendungen von Molybdän existieren und funktionieren gut. Optimierungspotenziale ergeben sich in der elementaren Rückgewinnung des kritischen Rohstoffs. Gleichzeitig werden in Zukunft neue Massenströme (z.B. aus der Energieversorgung) anfallen, die entsprechend zu bewältigen sind. Insgesamt ergeben sich hieraus Handlungspotenziale für Unternehmen einen neuen Markt zu erschließen und zeitgleich (Erfassungs-)Strukturen aufzubauen.“

### **Ernährung (Keine Entwicklungspotenziale vorhanden)**

„In der Ernährung ist Molybdän vor allem in Hülsenfrüchten, Milchprodukten, getrockneten Früchten, Backwaren, Getreide, Eiern und Innereien enthalten. Da im Rahmen der Nahrungsmittelproduktion weitere Faktoren (bspw. die Versorgung mit Phosphor) deutlich höhere Priorität haben, sind keine gezielten Entwicklungen im Bereich Molybdän zu erwarten. Molybdän ist wesentliches Spurenelement zur Versorgung des Menschen. Der benötigte Bedarf wird über die ausgewogene Versorgung durch Lebensmittel gedeckt. Gezielte Entwicklungen zur Anreicherung von Molybdän in Lebensmittel sind nicht zu erwarten. Zudem ist die Versorgung aktuell als unkritisch zu betrachten.“

### **Feinmechanik und Optik (Entwicklungspotenziale vorhanden)**

Die Feinmechanik ist angewiesen auf diesen Werkstoff. Hochwertige Werkzeuge bestehen überwiegend aus Legierungen, die Molybdän beinhalten. Investitionen in Hinblick auf das gezielte Recycling und Substitution sind nicht zu sehen. Gleichzeitig können Preissteigerungen auf dem Materialmarkt direkt an den Endverbraucher weiter gegeben werden.

*Die optische Industrie experimentiert momentan mit Molybdän. Der großtechnische Durchbruch ist jedoch erst in einigen Jahren zu erwarten.“*

**Forschung und Entwicklung (Potenzial für Investitionen aus industrieller Sicht)**

*„Für die Forschung stellt Molybdän einen elementaren Baustein neuer Werkstoffe dar. Demnach wird hier deutliches Interesse für neue Innovationen gesehen. Die Entwicklung dieser bzw. neuartiger Wertstoffe vor dem Hintergrund wachsender Herausforderungen wird dabei in Zusammenarbeit zwischen Wissenschaft, Wirtschaft und Politik erfolgen. Neben gezielten/effizienten Neuentwicklungen werden auch alternative Rückgewinnungswege von Molybdän erschlossen werden und deren Wirtschaftlichkeit sowie Umsetzbarkeit definiert.“*

**Freie Berufe (Entwicklungspotenziale vorhanden)**

*„In diesem Sektor ist keine Notwendigkeit der Versorgung mit Molybdän zu sehen. Gleichzeitig bietet dieser keine Möglichkeiten, dem Versorgungsrisiko effizient entgegen zu wirken. Demnach sind keine gezielten Entwicklungen zu erwarten. Allenfalls können indirekte Nischenanwendungen oder Ideen einen Beitrag zur allgemeinen Situation leisten.“*

**Gesundheitswirtschaft (Entwicklungspotenziale vorhanden)**

*„Molybdän spielt sowohl in der Nuklearmedizin als auch der Prothetik eine wesentliche Rolle, sodass hier auch zukünftig ein Bedarf besteht. Ein effizientes Rückgewinnungssystem ist bisher nicht umgesetzt.“*

**Grundstücks- und Wohnungswesen (Entwicklungspotenziale vorhanden)**

*„In modernen Gebäuden verbergen sich eine große Anzahl unterschiedlicher Metalle und Legierungen, die je nach Anwendung den Einsatz von Molybdän notwendig machen. In diesem Kontext führt die immer komplexere Bauweise von Gebäuden und modernes Design zum vermehrten Einsatz dieser Materialien. Erste Bestrebungen auf diesem Gebiet belegen, dass neben dem Nutzen auch vermehrt ein Augenmerk auf die gezielte Rückgewinnung dieser Materialien gelegt wird. Neben einem Gebäudeenergiepass werden bspw. bereits heute Rohstoffpässe für Bauwerke angelegt.“*

**Informationstechnik und Telekommunikation (Keine Entwicklungspotenziale vorhanden)**

*„Der Bedarf an Metallen für die Informations- und Telekommunikationsbranche wird quantitativ und qualitativ steigen. Eine Fokussierung auf Molybdän ist nicht abzusehen. Der zunehmende Einsatz von Glasfasertechnologien lässt vermuten, dass es zu einem abgepufferten Kupfereinsatz kommen wird – primäres Molybdän ist hierbei Koppelprodukt der Gewinnung.“*

**Lederwarenindustrie (Keine Entwicklungspotenziale vorhanden)**

*„Materialverbunde aus Molybdän finden zwar Anwendung, dies jedoch nur sporadisch und aufgrund der benötigten geringen Ansprüche sind diese keinesfalls notwendig. Demnach sind in dieser Branche keine direkten Bestrebungen zu sehen.“*

**Luft- und Raumfahrt (Potenzial für Investitionen aus industrieller Sicht)**

*„Die Luft- und Raumfahrt wird zukünftig eine wesentliche Rolle in unserer Gesellschaft spielen. Diese Sektoren sind unmittelbar auf die Versorgung mit High-Tech-Lösungen angewiesen. Diese basieren mittelfristig auf der Beimischung und Verfügbarkeit von Molybdän. Daher ist zu erwarten, dass innerhalb dieser Branche Überlegungen einer gesicherten Versorgung getätigt werden.“*

**Maritime Wirtschaft (Geringe Entwicklungspotenziale vorhanden)**

„Innerhalb der maritimen Wirtschaft, sprich im Schiffsbau sowie an Häfen sind hochfeste Stähle auf Basis von Molybdän in Kombination mit Chrom und Nickel unerlässlich. Mit einer zunehmenden Containerschifffahrt könnten hier mittel- bis langfristig Potenziale der gezielten Rückgewinnung entstehen.“

**Maschinen- und Anlagenbau (Entwicklungspotenziale vorhanden)**

„Der Maschinen- und Anlagenbau stellt wie viele andere Branchen eine Weiterverarbeitungsstufe von molybdänhaltigen Werkstoffen dar. Potenziale zur Entwicklung sind in einer optimierten und sortenreinen Erfassung der Metallabfälle bzw. deren Vermeidung zu sehen.“

**Papier- und Druckindustrie (Keine Entwicklungspotenziale vorhanden)**

„Molybdän tritt hier in Form von Pigmenten auf. Alternativen sind vorhanden. Entwicklungspotenziale sind daher eher gering.“

**Schienerfahrzeugbau (Kein Entwicklungspotenziale vorhanden)**

„Im Bereich des Schienenverkehrs finden hochfeste Stähle auf Basis von Molybdän Anwendung. Dennoch ergibt sich hieraus nicht die Notwendigkeit Entwicklungen zur Versorgungssicherung oder Substitution in die Wege zu leiten.“

**Schuhindustrie (Kein Entwicklungspotenziale vorhanden)**

„Der Einsatz von Molybdän ist keinesfalls notwendig. Entsprechend sind keine Potenziale zu erwarten. „

**Stahl und Metall (Potenzial für Investitionen aus industrieller Sicht)**

„Molybdän bildet eine wesentliche Grundlage der Stahlveredelung. Zeitgleich findet es hier momentan seine Hauptanwendung. Möglichkeiten der Substitution sind allenfalls begrenzt vorhanden. Hersteller werden aus dieser Sicht in eine gesicherte Versorgung investieren, um langfristig konkurrenzfähig zu sein.“

**Textil und Bekleidung (Keine Entwicklungspotenziale vorhanden)**

„Molybdän ist hier kein begrenzender Faktor. Entwicklungspotenziale und demnach Investitionen sind nicht zu erwarten.“

**Verkehr, Transport und Vermietung beweglicher Güter (Kombiniertes Potenzial für Entwicklungen aus Forschung, Industrie und Wirtschaft)**

„Der zunehmende Einsatz von Molybdän-Stählen im mobilen Bereich ist deutlich zu verzeichnen. Es ist zu erwarten, dass sich dieser Trend fortsetzen wird bzw. verstärkt. Da sich die gesellschaftliche Mobilität derzeit in einer Umbruchsphase befindet, sind mittel- und langfristig kombinierte Entwicklungspotenziale – Wissenschaft, Politik und Wirtschaft – zu erwarten.“

**Wasserwirtschaft (Kombiniertes Potenzial für Entwicklungen aus Forschung, Industrie und Wirtschaft)**

„Aufgrund der Entwicklungen auf dem Energiesektor sowie der Trinkwasserversorgung ist ein zunehmender Einsatz hochfester Stähle zu beobachten. Es ist zu erwarten, dass sich dieser Trend fortsetzen wird.“

**Zweiradindustrie (Keine Entwicklungspotenziale vorhanden)**

„Der Einsatz von Molybdän ist nahezu nicht gegeben. Potenziale ergeben sich daher nicht. Aluminium, Carbon und andere Leichtbaustoffe sind von deutlich höherem Interesse in diesem Bereich.“

### 7.3.2 Entwicklungspotenziale

Der Ersatz bzw. die Substitution von Molybdän im Rahmen der Herstellung von Hochleistungs-Stählen ist derzeit nicht gegeben. Vielmehr müssen betroffene Unternehmen auf eine gesicherte Versorgung achten.

Die dargestellten Trends belegen deutlich, dass die Versorgung von produzierenden Industriestaaten auf die gesicherte Versorgung mit Molybdän angewiesen ist. Gleichzeitig ergibt sich hieraus das Potenzial neuer Entwicklungen von Innovation und Substitution.

Der Wandel der Energieversorgung und Mobilität wird es zukünftig notwendig machen, entsprechende Aspekte zu setzen. Unternehmen der Molybdänverarbeitung, sind daher angehalten nachhaltig in diesen Zukunftsmarkt zu investieren und einen Beitrag zur Ressourcenunabhängigkeit zu leisten.

Zudem ist festzustellen, dass Molybdän in den meisten Anwendungen neben anderen Metallen eine eher untergeordnete Rolle spielt, der Bedarf aber dennoch besteht und eine Substitution nicht oder nur mit Leistungseinbußen möglich ist. Die hohe Anzahl verschiedenster Anwendungen in Form von Stahl erschwert die Bewertung von Molybdän. In zahlreichen Anwendungen wird das Element in geringen Konzentrationen genutzt, sodass dies das Element als eher unkritisch erscheinen lässt, da es sich um geringe Mengen handelt. Es sollte die Summe dieser zahlreichen breitgefächerten Anwendungen beachtet werden und die Abhängigkeit verschiedenster Branchen von einzelnen molybdänhaltigen Stahlapplikationen.

#### Hinweis

Zusätzlich ist ein Bewertungsmaßstab der aktuellen Akteure auf Basis der Hauptanwendungen dem Unternehmenskompendium zu entnehmen.

## 8

### Allgemeines Fazit

-----  
Allgemeines Fazit  
-----

Die Unternehmensclusterung zeigt auf, dass sowohl große Global Player als auch kleine mittelständische Unternehmen auf das Industriemetall Molybdän angewiesen sind. Es fällt auf, dass vor allem im Bereich der Beschichtungen und Schmiermittel hohe Relevanzen bestehen, da der Molybdängehalt bis nahezu 100 % betragen kann. Die Substitution ist hier nur durch völlig andere Produkte – wie Graphit – möglich, welche nicht die gleiche Leistung erfüllen.

Die kurze statische Reichweite von 44 Jahren und der zukünftig auch weiterhin hohe Bedarf verschiedenster Stahllegierungen in unterschiedlichen Branchen und Industriesektoren und ein wenig ausgeprägtes Recycling auf elementarer Ebene machen Molybdän zu einem eher kritischen Metall. Dies sollte für Unternehmen Grund genug sein ihre Versorgungslage derzeit und in Zukunft kritisch zu überprüfen. Genauso sollte die Möglichkeiten der vertikalen Integration oder Kooperation ausgelotet und identifiziert werden, um Preis- und Verfügbarkeitsrisiken vorausschauend entgegenzutreten zu können. Weitere einzelne Absicherungsmaßnahmen, die Unternehmen ergreifen können, um die Rohstoffrisiken zu senken, sind neben Produktmodifikationen und physischer Lagerung, auch Beschaffungsk Kooperationen, langfristige Lieferverträge, Diversifikation, Finanzinstrumente (Financial Hedging) und Recycling (Fridgen et al. 2013).



## 9

### Literaturverzeichnis

Angerer, Gerhard; Erdmann, Lorenz; Marscheider-Weidemann, Frank; Scharp, Michael; Lüllmann, Arne; 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 ISI. Stuttgart.

Antofagasta (2013): Market Outlook. Unter Mitarbeit von Gonzalo Sanchez. Hg. v. Antofagasta Plc, zuletzt geprüft am 09.10.2014.

AURA Technologie GmbH (2014): Aura - Produktionsprozess. Online verfügbar unter <http://www.aurat.de/?s=de.prozess.produktion>, zuletzt geprüft am 30.06.2014.

Auto Mattern (2014): Ultrahochfeste Stähle: leichter, fester, formbarer. Online verfügbar unter <http://www.auto-mattern.de/nissan/news/ultrahochfeste-staehle-leichter-fester-formbarer>, zuletzt geprüft am 16.10.2014.

Bascur, Pablo (2010): Molybdenum Market Outlook. A presentation to Ryan's Notes conference in Florida, zuletzt geprüft am 14.10.2014.

Battrum, Denis (2007): Growing Use of Molybdenum in Automobiles, zuletzt geprüft am 16.10.2014.

Battrum, Denis (2008): Stainless steel and molybdenum, zuletzt geprüft am 10.10.2014.

Bleck, Wolfgang; Hosten, Andrea (2013): Stahl - Eine historische, wirtschaftliche und technische Betrachtung. RWTH Aachen Steel Institute, zuletzt geprüft am 06.05.2014.

blz Bayern (2009): Erdgasleitungen im europäischen Verbund (Grafik). Online verfügbar unter [http://www.blz.bayern.de/blz/eup/04\\_09/images/large/800904\\_63\\_01\\_large.jpg](http://www.blz.bayern.de/blz/eup/04_09/images/large/800904_63_01_large.jpg), zuletzt geprüft am 20.10.2014.

Bräuninger, Michael; Leschus, Leon; Rossen, Anja (2013): DERA Rohstoffinformationen 17. Ursachen von Preispeaks, -einbrüchen und -trends bei mineralischen Rohstoffen. Unter Mitarbeit von David Allabouni, Stefan Kruse und Corinna Neubach, zuletzt geprüft am 26.06.2014.

Buchholz, Peter; Huy, Dieter; Sievers, Henrike (2012): DERA-Rohstoffliste 2012. Angebotskonzentration bei Metallen und Industriemineralen - Potenzielle Preis- und Lieferrisiken. Hg. v. DERA (DERA Rohstoffinformationen, 10), zuletzt geprüft am 01.07.2014.

Catalysis AG (2012): Catalysis AG - Presse: Anlage gewinnt Molybdänoxid aus gebrauchten Katalysatoren. Online verfügbar unter <http://www.catalysis-ag.com/de/presse>, zuletzt geprüft am 30.06.2014.

clerc (2012): Thin Film Photovoltaics CIS/CIGS Technology & Market. Hg. v. Yole Developpment, zuletzt geprüft am 26.11.2012.

Eckert, Daniel (2012): Aus den Tiefen der Erde kommen Traumrenditen. Hg. v. DIE WELT online. Online verfügbar unter <http://www.welt.de/finanzen/article13873603/Aus-den-Tiefen-der-Erde-kommen-Traumrenditen.html>, zuletzt geprüft am 02.07.2014.

EPOW (2011): Study into the feasibility of protecting and recovering critical raw materials through infrastructure development in the south east of England. Summary Report, zuletzt geprüft am 14.03.2014.

Erdmann, Lorenz; Behrendt, Siegfried; Feil, Moira (2011): Kritische Rohstoffe für Deutschland. Identifikation aus Sicht deutscher Unternehmen wirtschaftlich bedeutsamer mineralischer Rohstoffe, deren Versorgungslage sich mittel- bis langfristig als kritisch erweisen könnte. Hg. v. KfW Bankengruppe. Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung; Adelphi. Berlin.

EUC (2010): Critical raw materials for the EU. Hg. v. European Commission - Enterprise and Industry, European Commission Enterprise Policies, zuletzt geprüft am 20.09.2013.

EUC (2014a): REPORT ON CRITICAL RAW MATERIALS FOR THE EU. Report of the Ad hoc Working Group on defining critical raw materials, zuletzt geprüft am 06.10.2014.

EUC (2014b): REPORT ON CRITICAL RAW MATERIALS FOR THE EU NON-CRITICAL RAW MATERIALS PROFILES. Unter Mitarbeit von Adrian Chapman, zuletzt geprüft am 27.06.2014.

EWEA (2011): EU-27 National Renewable Energy Action Plans, zuletzt geprüft am 20.10.2014.

finanzen.net GmbH (2007): Aktienforum | Aktien Forum | Diskussionsboard | Community von finanzen.net. Unter Mitarbeit von Bocker, Prof. Dr. Hans J. finanzen.net GmbH. Online verfügbar unter [http://forum.finanzen.net/forum/Thompson\\_Creek\\_Metals\\_Faktenuebersicht-t281353?page=5](http://forum.finanzen.net/forum/Thompson_Creek_Metals_Faktenuebersicht-t281353?page=5), zuletzt geprüft am 02.07.2014.

Fridgen, Gilbert; König, Christian; Mette, Philipp; Rathgeber, Andreas (2013): Absicherung von Rohstoffrisiken Eine Disziplinen übergreifende Herausforderung für Unternehmen (Zeitschrift für betriebswirtschaftliche Forschung 65). Online verfügbar unter <http://www.wi-if.de/paperliste/paper/wi-364.pdf>, zuletzt geprüft am 02.07.2014.

General Moly (2010): Annual report 2010. Online verfügbar unter <http://generalmoly.com/2010-interactive/pdf/general-moly-2010-annual-report.pdf>, zuletzt geprüft am 01.07.2014.

General Moly (2011): Molybdenum Market. Annual Report 2011. Online verfügbar unter <http://generalmoly.com/annual2011/molybdenum.html>, zuletzt geprüft am 15.10.2014.

Gerthsen, Tarsilla (2006): Chemie für den Maschinenbau: Anorganische Chemie für Werkstoffe und Verfahren. Karlsruhe: Universitätsverlag Karlsruhe.

Globalwaterintel (2013): GWI DesalData's long-range desalination market forecast. Online verfügbar unter [http://www.globalwaterintel.com/client\\_media/images/articles/GWI\\_DesalData\\_long\\_range\\_desalination\\_market\\_forecast.gif](http://www.globalwaterintel.com/client_media/images/articles/GWI_DesalData_long_range_desalination_market_forecast.gif), zuletzt geprüft am 17.10.2014.

H.C. Starck (2014): Umweltgerecht, kompetent, einzigartig. High-Tech-Recycling für Refraktärmetalle, zuletzt geprüft am 07.03.2014.

Hassan, Ali (2003): Stand der Verwertung von verbrauchten Katalysatoren aus der chemischen Industrie sowie Einflussfaktoren zur Verbesserung der Kreislaufführung. Hg. v. Im Auftrag des Umweltbundesamtes. Technische Universität Berlin. Berlin, zuletzt geprüft am 25.03.2014.

Huy, Dieter; Andruleit, Harald; Babies, Hans-Georg; Homberg-Heumann, Doris; Meßner, Jürgen; Neumann, Wolfgang et al. (2013): Rohstoffsituationsbericht 2012. BGR. Hannover, zuletzt geprüft am 25.03.2014.

Huy, Dieter; Liedtke, Maren; Melcher, Frank; Graupner, Torsten (2011): Der Dodd-Frank-Act und seine Auswirkungen auf den Tantalmarkt. In: Commodity Top News Nr. 37.

Imgrund, Hans; Kinsman, Nicole (2007): Molybdenum. An extraordinary metal in high demand, zuletzt geprüft am 07.03.2014.

IMOA (2014a): Molybdenum Uses: First Use of Molybdenum, Stainless steel architecture, stainless swimming pool design, stainless water piping. International Molybdenum Association. Online verfügbar unter <http://www.imoa.info/molybdenum-uses/molybdenum-uses.php>, zuletzt geprüft am 01.07.2014.

IMOA (2014b): Molybdenum Processing. International Molybdenum Association. Online verfügbar unter <http://www.imoa.info/molybdenum/molybdenum-processing.php>, zuletzt geprüft am 01.07.2014.

IMOA (1998): Molybdenum. Unter Mitarbeit von Ian Hadley. International Molybdenum Association. Online verfügbar unter [http://www.imoa.info/download\\_files/molybdenum/About\\_Molybdenum.pdf](http://www.imoa.info/download_files/molybdenum/About_Molybdenum.pdf), zuletzt geprüft am 02.07.2014.

IMOA (2013a): Applications of Molybdenum Metal and Its Alloys. Unter Mitarbeit von Shields John A. International Molybdenum Association. Online verfügbar unter [http://www.imoa.info/download\\_files/molybdenum/Applications\\_Mo\\_Metal.pdf](http://www.imoa.info/download_files/molybdenum/Applications_Mo_Metal.pdf), zuletzt geprüft am 02.07.2014.

IMOA (2013b): Molybdenum in Power Generation. Thin Film Photovoltaic Solar Panels. Online verfügbar unter [http://www.imoa.info/download\\_files/sustainability/IMOA\\_solar\\_15.pdf](http://www.imoa.info/download_files/sustainability/IMOA_solar_15.pdf), zuletzt geprüft am 16.10.2014.

IMOA (2014a): Molybdenum in Transportation. Car Body and Chassis Construction. Online verfügbar unter [http://www.imoa.info/download\\_files/sustainability/IMOA\\_CarBody\\_Chassis\\_Construction.pdf](http://www.imoa.info/download_files/sustainability/IMOA_CarBody_Chassis_Construction.pdf), zuletzt geprüft am 17.10.2014.

IMOA (2014b): Molybdenum Mining. International Molybdenum Association. Online verfügbar unter <http://www.imoa.info/molybdenum/molybdenum-mining.php>, zuletzt geprüft am 01.07.2014.

Kaufmann, Daniel; Kraay, Aart; Mastruzzi, Massimo (2013): WGI 2013 - The Worldwide Governance Indicators (WGI). Online verfügbar unter <http://info.worldbank.org/governance/wgi/index.aspx#home>, zuletzt geprüft am 30.06.2014.

Kausch, Peter; Bertau, Martin; Gutzmer, Jens; Matschullat, Jörg (2014): Strategische Rohstoffe - Risikoversorge. Berlin, Heidelberg: Imprint: Springer Spektrum (SpringerLink : Bücher).

Kleine Zeitung DIGITAL (2012): Treibacher Industrie: Edelmetalle aus den Wohlstands-Minen. Kleine Zeitung DIGITAL GmbH & Co KG. Online verfügbar unter <http://www.kleinezeitung.at/kaernten/sanktveit/3031130/edelmetalle-den-wohlstands-minen.story>, zuletzt geprüft am 30.06.2014.

Menzel, Ulrich (2012): Die politische Ökonomie des Wassersektors. Online verfügbar unter [http://www.ulrich-menzel.de/lehre/wasser1213\\_zwoelfte\\_sitzung.pdf](http://www.ulrich-menzel.de/lehre/wasser1213_zwoelfte_sitzung.pdf), zuletzt geprüft am 16.10.2014.

Mindat (2014): Molybdenum: Molybdenum mineral information and data. Unter Mitarbeit von Ralph Jolyon und Chau Ida. Online verfügbar unter <http://www.mindat.org/min-10320.html>, zuletzt geprüft am 01.07.2014.

Mohammad Mahdi Kiaee (2013): Molybdenum as a Critical Element. ESM Foundation.

Moss, R. L.; Tzimas, E.; Kara, H.; Willis, P.; Kooroshy, J. (2011): Critical Metals in Strategic Energy Technologies. Assessing Rare Metals as Supply-Chain Bottlenecks in Low-Carbon Energy Technologies. Hg. v. European Commission, Institute of Energy and Transport, Oakdene Hollins Ltd, The Hague Centre for Strategic Studies, zuletzt geprüft am 14.03.2014.

- Moss, R. L.; Tzimas, E.; Willis, P.; Arendorf, J.; Tercero Espinoza, L. (2013): Critical Metals in the Path towards the Decarbonisation of the EU Energy Sector. Assessing Rare Metals as Supply-Chain Bottlenecks in Low-Carbon Energy Technologies. Online verfügbar unter [http://www.oakdenehollins.co.uk/media/308/Critical\\_Metals\\_Decarbonisation.pdf](http://www.oakdenehollins.co.uk/media/308/Critical_Metals_Decarbonisation.pdf), zuletzt geprüft am 25.04.2014.
- Pilarsky, Günter (2014): Wirtschaft am Rohstofftropf\_Der Kampf um die wichtigsten mineralischen Ressourcen. Wiesbaden: Springer Gabler, zuletzt geprüft am 25.03.2014.
- Plansee (2014): Molybdän (Mo). Online verfügbar unter <http://www.plansee.com/de/Werkstoffe-Molybdaen-402.htm>, zuletzt aktualisiert am 26.06.2014, zuletzt geprüft am 01.07.2014.
- Pohl, Walter L. (2005): Mineralische und Energie-Rohstoffe. Eine Einführung zur Entstehung und nachhaltigen Nutzung von Lagerstätten. Stuttgart: Schweizerbart.
- PwC (2014): Stahlmarkt 2014. Stahl 2025: Quo vadis? Online verfügbar unter [http://www.pwc.de/de\\_DE/de/industrielle-produktion/assets/pwc-studie\\_europaeische-stahlproduzenten-auf-dem-weg-zum-serviceanbieter.pdf](http://www.pwc.de/de_DE/de/industrielle-produktion/assets/pwc-studie_europaeische-stahlproduzenten-auf-dem-weg-zum-serviceanbieter.pdf), zuletzt geprüft am 15.10.2014.
- Regenerative Zukunft (2011): Wasserkraft. Online verfügbar unter <http://www.regenerative-zukunft.de/erneuerbare-energien-menu/wasserkraft>, zuletzt geprüft am 17.10.2014.
- Regenerative Zukunft (2012): Wasserkraft. Unter Mitarbeit von Christoph Schünemann. Online verfügbar unter <http://www.regenerative-zukunft.de/erneuerbare-energien-menu/wasserkraft>, zuletzt geprüft am 20.10.2014.
- Roskill (2012): Report Molybdenum: Market Outlook to 2016 (Abstract). Online verfügbar unter <http://www.roskill.com/reports/steel-alloys/molybdenum/leaflet>, zuletzt geprüft am 21.10.2014.
- SATW (2010): Seltene Metalle Rohstoffe für Zukunftstechnologien. SATW Schrift Nr. 41. Unter Mitarbeit von Patrick A. Wäger und Daniel J. Lang. Hg. v. Schweizerische Akademie der Technischen Wissenschaften. Zürich. Online verfügbar unter <http://www.satw.ch/publikationen/schriften/SelteneMetalle.pdf>, zuletzt geprüft am 02.07.2014.
- Schwarz, Günter; Mendel, Ralf R.; Ribbe, Markus W. (2009): Molybdenum cofactors, enzymes and pathways. Institute of Biochemistry. Online verfügbar unter <http://www.nature.com/nature/journal/v460/n7257/full/nature08302.html>.
- Spektrum (2014): Molybdän - Periodensystem der Elemente (PSE). Hg. v. Spektrum Akademischer Verlag. Online verfügbar unter <http://www.spektrum.de/periodensystem/molybdaen/615284>, zuletzt geprüft am 01.07.2014.
- Statista (2014): Geothermie - Installierte thermische Leistung nach Bundesland 2014. Online verfügbar unter <http://de.statista.com/statistik/daten/studie/249825/umfrage/installierte-thermische-geothermieleistung-nach-bundesland/>, zuletzt geprüft am 17.10.2014.
- Sullivan et al. (2010): Life-Cycle Analysis Results of Geothermal Systems in Comparison to Other Power Systems. Unter Mitarbeit von J.L. Sullivan, C.E. Clark, J. Han, and M. Wang. Online verfügbar unter <http://www.transportation.anl.gov/pdfs/TA/641.PDF>, zuletzt geprüft am 02.07.2014.
- Team Stainless (2013): Recycling Ferritic Stainless Steel, zuletzt geprüft am 10.10.2014.

- Thomé-Kozmiensky, Karl J. (Hg.) (2012): Recycling von Refraktärmetallen. Unter Mitarbeit von Gerhard Gille. H.C. Starck. Berlin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky (Recycling und Rohstoffe, Band 5).
- ThompsonCreek Metals Company Inc. (2013): Annual Report 2012. Littleton, Colorado, zuletzt geprüft am 20.03.2014.
- Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft (2005): Molybdändüngung in der Pflanzenproduktion. Online verfügbar unter <http://www.tll.de/ainfo/pdf/modu1105.pdf>, zuletzt geprüft am 30.06.2014.
- Treibacher (2011): Wiederverwertung. Hg. v. Treibacher Industrie AG. Online verfügbar unter <http://www.treibacher.at/de/geschaeftsfelder/stahl-und-giessereiindustrie/wiederverwertung.html>, zuletzt geprüft am 01.07.2014.
- UBA (2013): ProBas - ProBas-Projekt. Hg. v. Umweltbundesamt. Online verfügbar unter <http://www.probas.umweltbundesamt.de/php/index.php>, zuletzt geprüft am 30.06.2014.
- UNDP (2011): Table 1: Human Development Index and its components. Online verfügbar unter <https://data.undp.org/dataset/Table-1-Human-Development-Index-and-its-components/wxub-qc5k>, zuletzt geprüft am 30.06.2014.
- UNDP (2014): Table 1: Human Development Index and its components. Hg. v. United Nations Development Programme. Online verfügbar unter <https://data.undp.org/dataset/Table-1-Human-Development-Index-and-its-components/wxub-qc5k>, zuletzt geprüft am 30.06.2014.
- UNEP (2011): Recycling Rates of Metals – A Status Report. Unter Mitarbeit von Thomas E. Graedel, Julian Allwood, Jean-Pierre Birat und Matthias Buchert, zuletzt geprüft am 24.03.2014.
- USD AT&L (2013): Strategic and Critical Materials 2013 Report on Stockpile Requirements. Hg. v. Department of Defense. Office of the Under Secretary of Defense for Acquisition, Technology and Logistics, zuletzt geprüft am 18.09.2014.
- USGS (2013): USGS Minerals Information: Molybdenum. USGS - U.S. Geological Survey, Mineral Resources Program, Minerals Information Team. Online verfügbar unter <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/molybdenum/>, zuletzt geprüft am 01.07.2014.
- Viebahn, Peter (2014): Kritische mineralische Ressourcen und Stoffströme bei der Transformation des deutschen Energieversorgungssystems KRESSE\_Projektbericht. Abschlussbericht an das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi). Hg. v. Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie. Online verfügbar unter [http://wupperinst.org/uploads/tx\\_wupperinst/KRESSE\\_Endbericht.pdf](http://wupperinst.org/uploads/tx_wupperinst/KRESSE_Endbericht.pdf), zuletzt geprüft am 02.07.2014.
- Virga, Catherine M. (2012): Molybdenum: Out of Favor for Now. New York, zuletzt geprüft am 14.10.2014.
- von Nauckhoff, M.H. (2010): Strategische Metalle und Seltenerdmetalle. Investieren in Technologiemetalle und Hightech-Metalle: Indium, Wismut, Terbium & Co. München: Finanzbuch Verlag GmbH (simplified).
- Wikipedia (2011): Liste der Erdgaspipelines- Nordamerika. Hg. v. Wikipedia. Online verfügbar unter <http://de.wikipedia.org/w/index.php?oldid=130607855>, zuletzt aktualisiert am 19.09.2014, zuletzt geprüft am 20.10.2014.
- Wuppertal Institut (2008): Stahl - ein Werkstoff mit Innovationspotenzial. Wuppertal, zuletzt geprüft am 30.04.2014.

Yale University (2014): Environmental Performance Index (EPI) Country Rankings.  
Online verfügbar unter <http://epi.yale.edu/epi/country-rankings>, zuletzt geprüft am  
30.06.2014.

