

Dr.-Ing. Gerhard Angerer  
Alexandra Mohring  
Dr. Frank Marscheider-Weidemann  
Prof. Dr. Martin Wietschel

## **Kupfer für Zukunftstechnologien**

Nachfrage und Angebot unter besonderer  
Berücksichtigung der Elektromobilität

Karlsruhe, Juli 2010

Projektergebnisse aus dem Projekt

*Fraunhofer Systemforschung Elektromobilität FSEM*

Gefördert vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)

**Kontakt:**

Prof. Dr. Martin Wietschel  
Fraunhofer ISI  
Breslauer Str. 48  
76139 Karlsruhe  
Telefon 0721 / 6809-254  
E-mail: [wietschel@isi.fhg.de](mailto:wietschel@isi.fhg.de)

<http://www.isi.fraunhofer.de/>

## Inhaltsverzeichnis

	Seite
<b>1 Einleitung.....</b>	<b>1</b>
<b>2 Eigenschaften, Vorkommen und Produktion .....</b>	<b>2</b>
<b>3 Applikationen von Kupfer .....</b>	<b>8</b>
<b>4 Technische Trends bei den Kupferapplikationen .....</b>	<b>13</b>
<b>5 Simulationsmodell und Szenarioannahmen .....</b>	<b>16</b>
5.1    Einführung in das Modell.....	16
5.2    Das Simulationsmodell für den Rohstoff Kupfer.....	20
<b>6 Foresight von Kupferangebot und Nachfrage.....</b>	<b>31</b>
6.1    Ergebnisse des Kupfermodells.....	31
6.2    Kupferverbrauch und Angebot .....	34
6.3    Vergleich mit langfristigen Prognosen anderer Forschungseinrichtungen.....	36
<b>7 Fazit und Ausblick .....</b>	<b>37</b>
<b>8 Literaturverzeichnis .....</b>	<b>40</b>

## Abbildungsverzeichnis

	Seite
Abbildung 2-1: Schema der Kupfergewinnung aus oxidischen und sulfidischen Erzen .....	4
Abbildung 2-2: Entwicklung des Kupferpreises an der London Metallbörse (LME) .....	8
Abbildung 3-1: Permanentmagnet-Elektromotor für Hybridfahrzeug .....	11
Abbildung 5-1: Neuzulassungsanteile Welt – Dominanz.....	18
Abbildung 5-2: Neuzulassungsanteile Welt – Pluralismus .....	19
Abbildung 5-3: Graphische Modellierung des Wachstums.....	22
Abbildung 5-4: Allgemeines Fahrzeugmodell.....	24
Abbildung 5-5: Graphische Modellierung der Kupfermenge im Pkw-Segment.....	24
Abbildung 5-6: Verbrauch Raffinade-Kupfer weltweit 1928–2008.....	27
Abbildung 5-7: Modellierung der Menge, die in den Recycling-Prozess geht .....	28
Abbildung 5-8: Modellierung Anwendungsende im Segment Architektur .....	28
Abbildung 5-9: Recyclingprozess schematisch .....	29
Abbildung 5-10: Graphische Modellierung des Recyclingprozesses in Vensim .....	30
Abbildung 6-1: Gesamtkupferverbrauch Dominanz-Szenario bis 2050 .....	31
Abbildung 6-2: Kupferverbrauch Dominanz-Szenario aufgeschlüsselt nach Segmenten.....	32
Abbildung 6-3: Gesamtkupferverbrauch Pluralismus-Szenario bis 2050 .....	33
Abbildung 6-4: Kupferverbrauch Pluralismus -Szenario aufgeschlüsselt nach Segmenten.....	33
Abbildung 6-5: Dominanz-Szenario Vergleich Kupferverbrauch kumuliert und Ressourcen + Reserven .....	35
Abbildung 6-6: Pluralismus-Szenario Vergleich Kupferverbrauch kumuliert und Ressourcen + Reserven .....	36

## Tabellenverzeichnis

	Seite
Tabelle 2-1:	Entwicklung des globalen Kupferverbrauchs in Mio. t..... 5
Tabelle 2-2:	Sekundärkupfereinsatzquoten nach Regionen der Welt 2007 ..... 6
Tabelle 2-3:	Weltweiter Kupferbestand ..... 7
Tabelle 3-1:	Globale Kupfermärkte im Jahr 2006 ..... 9
Tabelle 3-2:	Kupferinventar eines Pkw ..... 10
Tabelle 3-3:	Kennwerte der Radnabenmotoren im Fraunhofer Demonstrationsauto FrECC0 ..... 12
Tabelle 5-1:	Segmente der Kupferapplikationen..... 21
Tabelle 5-2:	Korrelationskoeffizient r..... 23
Tabelle 5-3:	Kupferinventare der Fahrzeugkonzepte..... 25
Tabelle 5-4:	Lebensdauer, Sammel- und Recyclingquoten in den Kupferapplikationen ..... 26
Tabelle 5-5:	Anteil am Gesamtkupferverbrauch in %..... 27
Tabelle 6-1:	Vergleich Ergebnisse Dominanz-Szenario und Pluralismus- Szenario ..... 34
Tabelle 6-2:	Szenario-Ergebnisse des weltweiten Raffinade- Kupferverbrauchs aus dem Globalmodell des IIED und des ISI Kupfermodells in t..... 37
Tabelle 0-1:	Entwicklung des Verbrauchs von Raffinade-Kupfer von 1928 bis 2008..... 44
Tabelle 0-2:	Entwicklung Wachstumsrate Weltwirtschaft und Wachstumsrate Raffinade-Kupfer Verbrauch ..... 46

## Abkürzungsverzeichnis

BEV	battery (powered) electric vehicle
CDA	Copper Development Association
Cu	Chemisches Zeichen für Kupfer
DKI	Deutsches Kupfer Institut
ECU	electronic control unit (Steuergerät des Verbrennungsmotors)
FCEV	fuel-cell (powered) electric vehicle
FrECC0	Fraunhofer Experimental Car Concept 0
FSEM	Fraunhofer Systemforschung Elektromobilität
Gbps	Gigabits per second (Datenübertragungsgeschwindigkeit, auch als Bandbreite bezeichnet)
GJ	Gigajoule ( $10^9$ Joule)
HEV	hybrid electric vehicle
ICA	International Copper Association
ICE	internal combustion engine (Verbrennungsmotor)
ICSG	International Copper Study Group
IIED	International Institute for Environment and Development
Kfz	Kraftfahrzeuge
LME	London Metal Exchange (Londoner Metallbörse)
Nm	Newtonmeter (Drehmomenteinheit)
PHEV	plug-in hybrid electric vehicle
Pkw	Synonym für Personenkraftwagen, Transporter, SUV und Minivans
RWTH	Rheinisch-Westfälische Hochschule Aachen
SUV	sport utility vehicle
UBA	Umweltbundesamt
USGS	United States Geological Survey
WBCSD	World Business Council for Sustainable Development
WLAN	wireless local area network
WM	Wirtschaftsvereinigung Metalle

# 1 Einleitung

Aufgrund neuer leistungsfähigerer Akkumulatoren und der starken Volatilität an den Ölmärkten wird die Elektromobilität in den letzten Jahren wieder aktiv diskutiert. Politische Ziele wie die Reduktion der Abhängigkeit vom Öl, effizientere Energiewandlung sowie signifikante CO<sub>2</sub>-Reduktionen und die Senkung lokaler Emissionen im Verkehr, sind wichtige Treiber für die Elektromobilität. Aus volkswirtschaftlicher Perspektive ist die Automobilindustrie einschließlich der Zulieferindustrie mit fast 2 Mio. Arbeitsplätzen der wichtigste Sektor in Deutschland, dessen internationale Wettbewerbsfähigkeit auf neuen Zukunftsfeldern wie der Elektromobilität erhalten werden muss.

Elektromobilität ist somit ein bedeutendes umwelt-, wirtschafts- und gesellschaftspolitisches Thema in Deutschland, welchem durch den im August 2009 verabschiedeten „Nationalen Entwicklungsplan Elektromobilität“ der Bundesregierung und der im Mai 2010 eingerichteten „Nationalen Plattform Elektromobilität“ eine besonders aktuelle und dringliche Rolle zukommt. Im Koalitionsvertrag werden die Ziele „Deutschland zum Leitmarkt für die Elektromobilität bis 2020“ zu entwickeln und „1 Millionen Elektrofahrzeuge bis 2020“ auf die Straße zu bringen genannt.

Eine massive und weltweite Marktpenetration von Elektrofahrzeugen erhöht die Nachfrage nach Rohstoffen. Betroffen ist beispielsweise die Nachfrage nach Hightech-Metallen wie Lithium für effiziente Elektrizitätsspeicher sowie Neodym und Dysprosium für kompakte und leichte Elektromotoren. Aber auch Commodities, darunter Kupfer, werden stärker nachgefragt. In dem Projekt Fraunhofer Systemforschung Elektromobilität (FSEM) wird deshalb analysiert, ob die geologische Verfügbarkeit wichtiger Rohstoffe ausreicht, um den gewünschten Ausbau der Elektromobilität zu ermöglichen.

Gegenstand der vorliegenden Analyse ist die Inanspruchnahme der geologischen Ressourcen von Kupfer bis 2050. Das Foresight bezieht alle Kupferapplikationen ein, wobei der Elektromobilität besondere Beachtung geschenkt wird. Auf der Basis eines System Dynamic Models wird eine Prognose über den weltweiten Kupferverbrauch aller Kupferapplikationen durchgeführt und den Vorkommen einschließlich dem Kupferrücklauf aus Recycling gegenübergestellt. Hieraus erkennt man einen möglichen Engpass bei Kupfer und kann geeignete Strategien entwickeln. Eine vergleichbare Studie ist bereits zu Lithium durchgeführt worden (Angerer, Marscheider-Weidemann, Wendl, & Wietschel, 2009). Weitere Studien zu der Rohstoffbasis für die Elektromobilität werden in Kürze folgen.

Im nächsten Kapitel wird auf die chemischen und physikalischen Eigenschaften von Kupfer eingegangen sowie seine Vorkommen und seine Produktion dargestellt. Kapitel 3 befasst sich näher mit den Anwendungen von Kupfer. Die einzelnen Applikationen

sowie die Anteile am Gesamtkupferverbrauch werden näher vorgestellt. Kapitel 4 stellt die technischen Trends bei Kupferapplikationen vor. Dabei wird auf die Entwicklungen der einzelnen Anwendungen und auf mögliche Substitute eingegangen. Kapitel 5 erläutert den Aufbau des Simulationsmodells und die Annahmen, die zugrunde gelegt werden. Die Ergebnisse der Modellsimulation werden in Kapitel 6 vorgestellt. In diesem Kapitel wird auch die Frage nach der Verfügbarkeit des Rohstoffs Kupfer geklärt. Abschließend folgen Fazit und Ausblick im 7. Kapitel.

## 2 Eigenschaften, Vorkommen und Produktion

Die Dichte von Kupfer beträgt  $8,93 \text{ g/cm}^3$ , es schmilzt bei  $1083 \text{ °C}$ . Kupfer erreicht nach Silber mit  $58 \text{ MS/m}^1$  die beste elektrische Leitfähigkeit aller Metalle und ist mit  $394 \text{ W/m-K}$  auch ein ausgezeichneter Wärmeleiter. Diese Eigenschaften machen Kupfer zum bevorzugten Werkstoff für elektrische Leiter und den Wärmetransport. Da Verunreinigungen die elektrische Leitfähigkeit verschlechtern, wird es in Elektrotechnik und Elektronik in einer Reinheit von mindestens  $99,99 \%$  eingesetzt. Reines Kupfer ist sehr duktil, auch in kaltem Zustand gut formbar und einfach zu verarbeiten. Ideale Voraussetzungen für die Nutzung in der Sanitär- und Heizungsinstallation sowie für Dächer und Fassaden von Gebäuden.

Kupfer bildet in trockener Luft auf der Oberfläche einen Oxidfilm aus. In der freien Atmosphäre entsteht eine grünliche Patina, die aus einem komplexen Gemisch von Kupfercarbonat, -sulfat, -chlorid und -hydroxid besteht. Sie schützt das Metall vor weiterer Korrosion und macht es sehr beständig.

Kupfer wirkt antibakteriell. Dies behindert die Ansiedlung von Keimen auf Kupferoberflächen, beispielsweise auf Türgriffen aus Messing. Die biozide Eigenschaft ist wegen der möglichen Schädigung der Biozönose in Gewässern unerwünscht. Die Umweltpolitik bemüht sich deshalb, Applikationen von Kupfer zu beschränken, aus denen Kupferionen in Gewässer gelangen können. Darunter fallen in erster Linie Außenanwendungen wie Kupferdächer, Kupferfassaden, Regenrinnen und Regenfallrohre.

Kupfer ist in der Erdkruste mit  $60 \text{ ppm}$  enthalten. Als das 26.-häufigste Element ist es in der Erdkruste etwas seltener als Zink, Nickel und Chrom, aber häufiger als Kobalt und Lithium (Enhag, 2004). Die Kupferressourcen in der Erdkruste werden vom United States Geological Survey (USGS) auf 3 Milliarden Tonnen geschätzt. In Tiefseemanganknollen werden weitere 700 Millionen Tonnen vermutet, so dass die Gesamtres-

---

1  $1 \text{ MS/m} = 10^6 \text{ S/m} = 1 \text{ m}/\Omega \text{ mm}^2$



sources derzeit auf 3,7 Milliarden Tonnen Kupfer zu veranschlagen sind. Die Kupferreserven - das ist der mit dem derzeitigen Stand der Technik beim gegenwärtigen Preisniveau wirtschaftlich abbaubare Teil der Ressourcen - werden von der gleichen Quelle mit 540 Millionen Tonnen angegeben (USGS, 2010).

Mit 160 Millionen Tonnen verfügt Chile mit großem Abstand über die größten Kupferreserven der Erde, aber auch in Peru, Mexico, den USA, Indonesien und China liegen große **Kupfervorkommen**. Der Herfindahlindex von 0,13 zeigt eine gute Streuung der Kupferreserven an. Die drei Länder mit den größten Vorkommen, Chile, Peru und USA, halten zusammen 48 % der Weltreserven. Von den globalen Vorkommen sind 90 % sulfidische Erze, 9 % Oxide und 1 % elementares Kupfer (Enhag, 2004). Wirtschaftlich am bedeutsamsten sind die sulfidischen Kupfererze Chalkopyrit oder Kupferkies ( $\text{CuFeS}_2$ ) und Chalkosin oder Kupferglanz ( $\text{Cu}_2\text{S}$ ). Oxidische Erze sind Cuprit oder Rotkupfererz ( $\text{CuO}$ ) und Malachit ( $\text{Cu}(\text{CO}_3)_2 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$ ).

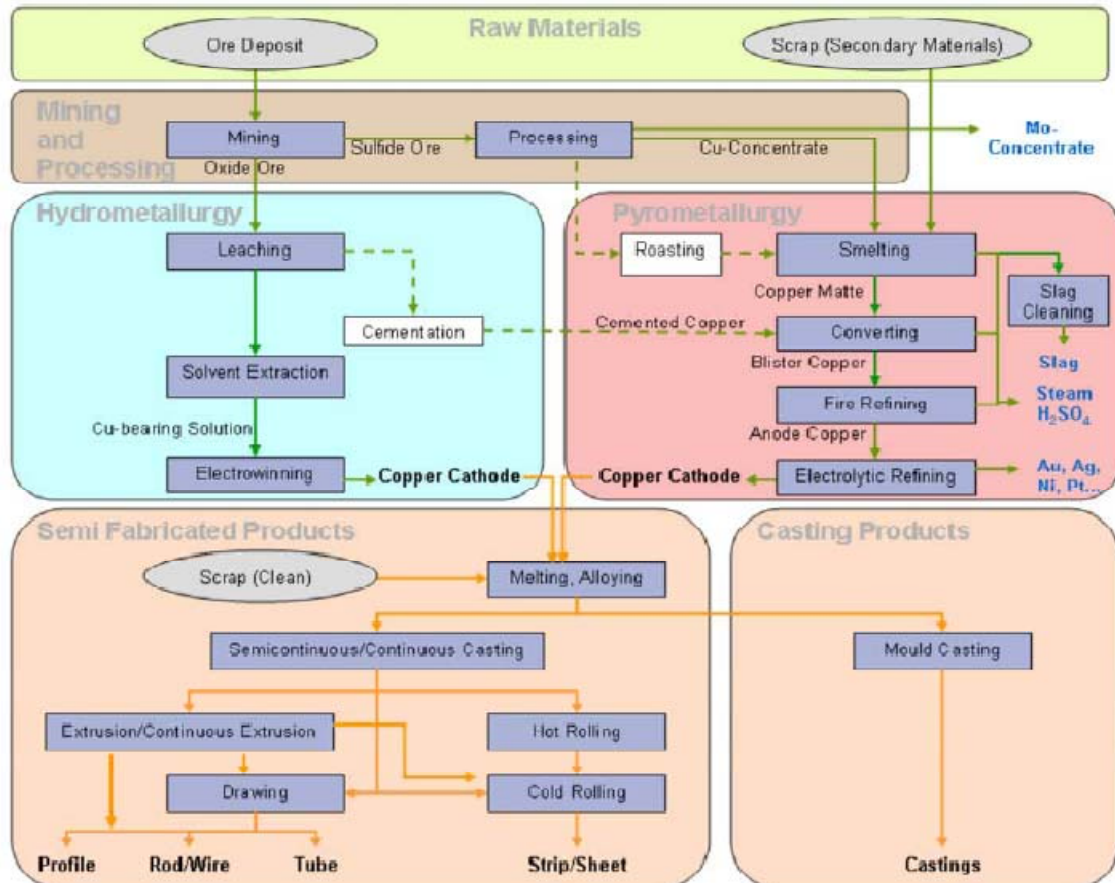
Chile lieferte 2008 mit 5,33 Millionen Tonnen Kupfer mit etwas mehr als 1/3 der globalen Minenproduktion von 15,4 Millionen Tonnen (USGS, 2010). Die globale Minenproduktion ist seit 2003 mit einer Wachstumsrate von 2,2 %/a nur moderat angestiegen (USGS, 2009). Das Konzentrationsmaß nach produzierenden Ländern ist mit einem Herfindahlindex von 0,16 ein wenig höher als die Verteilung der Ressourcen, zeigt aber immer noch eine wettbewerblich gute Streuung an. 42 % der globalen Minenproduktion von Kupfer wurde 2008 von den drei größten Produzenten Chile, USA und Peru erbracht.

Die **Herstellung** von metallischem Kupfer erfolgt auf zwei Wegen. Oxidische Kupfererze werden hydrometallurgisch aufgeschlossen, sulfidische Erze pyrometallurgisch. Die oxydischen Erze werden nach Durchlaufen der Konzentrationsstufe mit Schwefelsäure gelaugt. Aus der gewonnenen kupferreichen Lösung wird durch Lösemittelextraktion metallisches Kupfer gewonnen und anschließend elektrolytisch zum handelsfähigen Kathodenkupfer raffiniert (gereinigt).

Sulfidische Erze durchlaufen nach dem Brechen und Zerkleinern eine Flotationsstufe. Das gewonnene Konzentrat wird bei etwa 700 °C geröstet, anschließend aufgeschmolzen und der enthaltene Schwefel in einem Konverter durch Aufblasen von Sauerstoff verbrannt. Dem gewonnenen Konverterkupfer, das auch Blisterkupfer oder Schwarzkupfer genannt wird, wird anschließend in einer thermischen Raffinationsstufe der Restsauerstoff entzogen und das Vorprodukt zu Kupferanoden vergossen. Es enthält etwa 99,8 % Kupfer (Enhag, 2004). Anodenkupfer wird anschließend in der Elektrolyse zum reinen, handelsfähigen Kathodenkupfer mit einem Kupfergehalt von über 99,95 % raffi-

niert. 80 % der Weltkupferproduktion wird elektrolytisch raffiniert (Lossin, 2005). Ein Schema der Kupfergewinnung zeigt Abbildung 2-1.

Abbildung 2-1: Schema der Kupfergewinnung aus oxidischen und sulfidischen Erzen



Quelle: European Copper Institute

Der globale **Kupferverbrauch** entspricht bis auf wenige Prozent der Kupferproduktion. Der Kupferverbrauch hat zwischen 2003 und 2008 im Mittel um moderate 2,8 %/a zugenommen. Die Steigerungsrate liegt damit etwas über der Zunahme der Minenproduktion, was eine moderate Zunahme der globalen Sekundärkupfereinsatzquote anzeigt. Die zeitliche Entwicklung des Kupferverbrauchs ist in Tabelle 2-1 zusammengestellt (International Copper Study Group, 2009).

Tabelle 2-1: Entwicklung des globalen Kupferverbrauchs in Mio. t

	2003	2004	2005	2006	2007	2008
Kupferverbrauch	15,72	16,83	16,67	17,04	18,17	18,00

Quelle: International Copper Study Group

2008 wurden weltweit 18 Millionen Tonnen Kupfer an die weiterverarbeitenden Industrien abgesetzt. Mit einem Anteil von 29 % war China mit Abstand der größte Abnehmer. Sein Kupferverbrauch ist seit 2003 mit 11 % pro Jahr gestiegen. Zweitgrößter Abnehmer war die EU-15 mit 19 %, gefolgt von den USA mit 11 % und Japan mit 7 %. Deutschland hat im gleichen Jahr 690 t Kupfer verbraucht, das entspricht 3,8 % des Weltverbrauchs (WVM, 2009).

Kupferhaltige Schrotte sind bei der Kupfererzeugung eine begehrte Rohstoffquelle. Die Schrotte werden sowohl bei der Kupferproduktion aus Erzen zugesetzt als auch in ausschließlich auf die **Sekundärkupfererzeugung** spezialisierten Hütten verarbeitet. Sekundärkupfer aus Schrotten lässt sich mit erheblich geringerem Energieaufwand gewinnen. Der Primärenergieeinsatz für die Gewinnung von Sekundärkupfer aus Schrotten wird mit 20,5 GJ/t Kupfer angegeben. Für die Gewinnung von Primärkupfer müssen dagegen im Bergbau 35 GJ/t Kupfer und bei der Verarbeitung des Konzentrats in der Kupferhütte 21,8 GJ/t Kupfer, zusammen 56,8 GJ/t Kupfer, aufgewendet werden (Rombach, 2003).

Während Sekundärrohstoffe oft nicht die Qualität der aus Erz gewonnenen primären Rohstoffe erreichen, beispielsweise bei Aluminium, unterscheiden sich die Qualitäten von Sekundär- und Primärkupfer nach der Elektrolysestufe nicht. Dieser wichtige Vorteil hat dazu beigetragen, dass die Einsatzquote<sup>2</sup> von Sekundärkupfer in Deutschland 56 % erreicht (WVM, 2009). Die Sekundärkupfereinsatzquoten außerhalb Deutschlands sind mit großen Unsicherheiten behaftet. USGS (2009) gibt für 2007 die Quote in den USA mit 30 % an. Dies stimmt mit den Angaben von ICSG überein, die für Nordamerika (USA und Kanada) eine Quote von 32,7 % für das gleiche Jahr nennt. In Tabelle 2-2 sind die von ICSG genannten Sekundärkupfereinsatzquoten zusammengestellt und um die Quote in Deutschland ergänzt (WVM, 2009), (ICSG, 2009). Danach stammen 34,8 % des weltweit eingesetzten Kupfers aus Kupferschrott. Die gleiche Institution gibt in einer anderen Publikation die Quote bei der Raffination mit 14,8 % an (International Copper Study Group, 2009). Zählt man den angegebenen Sekundärmaterialeinsatz von 2,2456 Millionen Tonnen in den Schmelzstufen („smelter production“) hinzu (International Copper Study Group, 2009), ergibt sich eine globale Sekundärkup-

<sup>2</sup> Sekundärrohstoffeinsatzquote = Sekundärrohstoffverbrauch / Gesamtrohstoffverbrauch.

ereinsatzquote von 27 %. Enhag (2004) nennt für das Jahr 2000 eine globale Einsatzquote von Kupfer aus Schrott von 13 % (Enhag, 2004). In einer eigenen Abschätzung der weltweiten Sekundärkupfereinsatzquote unter Berücksichtigung von Sammelquoten und Ausbringungsquoten bei Zerlegung, Vorbehandlung, Materialgewinnung und der Lebensdauer von Kupferprodukten konnte die hohe Quote von 34,8 % nicht verifiziert werden. Eine globale Sekundärkupfereinsatzquote von 20 % oder darunter scheint eher wahrscheinlich.

Tabelle 2-2: Sekundärkupfereinsatzquoten nach Regionen der Welt 2007

Region	Einsatzquote in %
Europa	41,0
Nordamerika (USA, Kanada, Mexiko)	32,8
Asien	33,7
Rest der Welt	19,7
Insgesamt Welt	34,8
Zum Vergleich Deutschland	56,4

Quellen: ICSG, WVM

Es darf nicht verwundern, dass bei den vergleichsweise geringen Recyclingquoten beträchtliche Mengen an Kupfer in den Deponien lagern. US-amerikanische Analysen kommen zu dem Ergebnis, dass in den Deponien der USA, Kanada und Mexiko (Nordamerika) zusammen insgesamt 56 Millionen Tonnen Kupfer mit gebrauchten Produkten abgelagert wurden (Gordon, 2006). Jüngere Untersuchungen kommen sogar auf einen Wert von 85 Millionen Tonnen Kupfer (Kapur & Gradel, 2006). Dies entspricht dem 4,7-fachen des Kupferverbrauchs der Welt im Jahr 2008. Auch in Europa und anderen Regionen der Welt lagern beträchtliche Mengen an Kupfer als stille Reserve in Deponien. Die gleiche Quelle schätzt den globalen Bestand an Kupfer in Deponien und Umwelt auf 400 Millionen Tonnen. Da Kupfer ein sehr korrosionsbeständiges Metall ist, kann ein Großteil dieser Vorräte wieder zurückgewonnen werden, wenn Preisniveau und Versorgungslage dies erfordern. Der Bestand an Kupfer in gegenwärtig genutzten Produkten wird weltweit auf 330 Millionen Tonnen geschätzt, der Bestand in nicht mehr genutzten Produkten in den Kellern und Speichern der Haushalte auf 24 Millionen Tonnen (Kapur & Gradel, 2006). Mit der in der zitierten Untersuchung genannten geologischen Reservenbasis<sup>3</sup> an Kupfer von 950 Millionen Tonnen ergibt sich ein globaler Gesamtbestand von 1,7 Milliarden Tonnen Kupfer. Legt man nicht die Reservenbasis,

<sup>3</sup> Die Reservenbasis enthält die heute bekannten und wirtschaftlich abbaubaren geologischen Vorkommen (Reserven) und die absehbar abbaubaren Vorkommen.

sondern die im Kapitel 2 genannte geologischen Ressourcen von 3,7 Milliarden Tonnen zugrunde, die auch identifizierte Vorkommen enthält, die absehbar noch nicht wirtschaftlich ausgebeutet werden können, ergibt sich ein globaler Kupferbestand von 4,45 Milliarden Tonnen Kupfer. Tabelle 2-3 stellt diese Ergebnisse zusammen. Sie lässt auch erkennen, dass bisher weltweit etwa 754 Millionen Tonnen Kupfer produziert wurden.

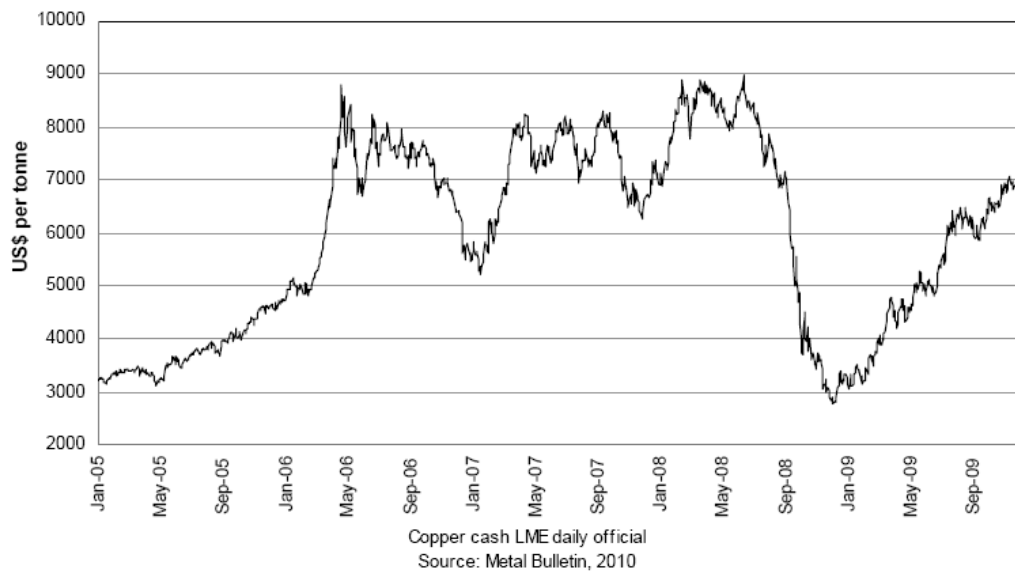
Tabelle 2-3: Weltweiter Kupferbestand

Bestandssegment	Menge in Mio. t Kupfer		
Erz-Reservenbasis	950		
Erz-Ressourcen nach USGS			3.700
Mit Produkten in Gebrauch		330	
In Deponien und Umwelt abgelagert		400	
In nicht mehr genutzten Produkten in Haushalten		24	
Gesamter Kupferbestand	1.704	754	4.454

Quelle: A. Kapur und T. E. Gradel; USGS

Der Preis für Kupfer hat, wie der für die meisten Rohstoffe, zwischen 2003 und 2008 stark angezogen. Mit der Pleite des Bankhauses Lehmann Brothers Inc. am 15. September 2008 und der ausgelösten globalen Finanzkrise sind sie auf das frühere Niveau abgestürzt (Abbildung 2-2). In der Zwischenzeit ziehen die Kupferpreise wieder steil an und haben beinahe das Niveau vor der Krise erreicht (BGS, 2010). Da der physische Kupferbedarf in der gegenwärtigen Lage der Weltwirtschaft stagniert, werden die Preise bereits wieder von renditeorientierten Finanzgeschäften getrieben.

Abbildung 2-2: Entwicklung des Kupferpreises an der London Metallbörse (LME)



Quelle: British Geological Survey

### 3 Applikationen von Kupfer

Die Verwendungen von Kupfer sind aufgrund der spezifischen Eigenschaften des Metalls überaus vielfältig. Entsprechend schwierig ist es, seine Verwendungen statistisch zu erfassen, und tatsächlich weisen die Statistiken unterschiedlicher Quellen beträchtliche Unterschiede auf. Die vorliegende Analyse stützt sich auf die Statistik der International Copper Association (CDA) in New York, eines Verbands der globalen Kupferproduzenten und Halbzeuhersteller.

Tabelle 3-1 gibt die CDA-Segmentierung der globalen Kupferapplikationen im Jahr 2006 wieder (ICA, 2007). Grundsätzlich lässt sich mit wenigen Ausnahmen das in den Produkten enthaltene Kupfer nach Gebrauch wieder zurückgewinnen, wenngleich mit unterschiedlichem Aufwand. So sind Geräte Kabel gut zugänglich, während die Erfassung von unter Putz verlegten Leitungen beim Gebäudeabriss bereits erheblichen logistischen Aufwand verursacht. Auch Kupfer in hochintegrierten Werkstoffverbänden, beispielsweise in Mikrochips, lässt sich nur mit beträchtlichem technischen und wirtschaftlichen Aufwand zurückgewinnen. Zu den dissipativen Nutzungen, die für das Recycling verloren sind, zählen beispielsweise Kupfer in Pflanzenschutzmitteln, Holzschutzmitteln und der Abrieb von Oberleitungsdrähten für Schienenfahrzeuge. Die durch Dissipation verlorene Menge ist im Vergleich zum Gesamtumsatz vernachlässigbar.

Tabelle 3-1: Globale Kupfermärkte im Jahr 2006

Verwendungssegment	Anteil	Technologie- und Produktbeispiele
Übertragung elektrischer Energie	26 %	Starkstromerkabel, Seekabel, Stromleitungen in Gebäuden, Transformatorwicklungen
Wasserversorgung	13 %	Rohre, Fittings, Messingarmaturen
Elektromotoren	12 %	Antrieb von Maschinen, Pumpen, Verdichter, Lüfter, Stellantriebe in Kfz und vielen anderen Produkten
Antriebsmotoren für Schienenfahrzeuge und Schiffe	9 %	Elektroloks, dieselektrische Schiffsantriebe
Wärmetauscher für Haushaltsgeräte	8 %	Kühlschränke, Gefrierschränke, Klima- und Lüftungsanlagen
Verbraucherprodukte	8 %	Türklinken, Beschläge, Herde und Öfen, Münzen, Schmuck, Uhren, Pflanzen- und Holzschutzmittel, Lote
Mechanische Bauteile	6 %	Messingventile, Lagerwerkstoffe, Bleche, Bänder, Rohre
Kfz-Verkabelung	5 %	Kabelbäume für Strom- und Datentransfer, Stecker, Relais
Daten- und Signalübertragung	5 %	Telefondrähte, Antennen- und Lautsprecherkabel
Elektronische Verbindungen und Wärmeabfuhr	3 %	Leadframes von Mikrochips, Leiterplatten, Stecker, Anschlussleisten, Kühlkörper, Wärmerohre
Architektur	2 %	Dächer, Fassaden, Regenrinnen und Regenfallrohre
Verschiedenes	3 %	Wärmetauscher in Kfz, Lüftungs-, Klima- und Heizanlagen in Gebäuden, Kfz-Antriebsmotoren, Brennstoffzellen, Batterien und Akkumulatoren, Medizintechnik, Wind- und Solarkraftwerke, photovoltaische Stromerzeugung, Kupferkäfige für Fischfarmen
Gesamt	100 %	

Quelle: Copper Development Association, ergänzt

Eine bedeutsame Applikation von Kupfer, dem hier besondere Aufmerksamkeit geschenkt wird, ist der **Fahrzeugbau**. In einem Pkw der Mittelklasse sind nach übereinstimmenden Quellen heute etwa 25 kg Kupfer verbaut (ICSG, 2004; DKI, 2010; IZT, 2004). Davon entfallen nach vorliegenden Erhebungen auf den Verbrennungsmotor und seine Hilfsaggregate etwa 12 kg, die restlichen 13 kg verteilen sich auf die übrigen Komponenten (Tabelle 3-2) (IZT, 2004). Mit der zunehmenden Nutzung von Hybrid- und Elektrofahrzeugen wird der Bedarf an Kupfer steigen.

Tabelle 3-2: Kupferinventar eines Pkw

Fahrzeugkomponente	Kupferinventar in kg
Kabelbaum	4,55
Elektronik	1,80
Verbrennungsmotor und Antriebsstrang	12,34
davon Lichtmaschine	3,03
Elektromotoren	1,52
Anlasser	4,55
Zündspule	1,21
Kühler	0,23
Getriebe und Kupplung	1,80
Aufbau (Karosserie)	4,63
Schaltung	0,03
Vorderachse	0,01
Lenkung	1,20
Bremsanlage	0,12
Kraftstoffanlage	0,35
Gesamtinventar	25,03

Quelle: Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung (korrigiert)

Das bevorzugte elektrische Antriebsaggregat für hybride Pkw und Elektrofahrzeuge ist der bürstenlose **permanentmagnetisch erregte Drehstrom-Synchronmotor**. Sein Rotor trägt leistungsfähige Permanentmagnete, die in Pole unterteilt sind. Der Stator ist mit der entsprechenden Anzahl von Kupferwicklungen ausgerüstet, die so geschaltet werden, dass sie den Rotor mit der gewünschten Drehzahl ziehen. Die Regelung von Drehzahl und Drehmoment erfolgt über einen Umrichter. Im Generatorbetrieb, beim Bremsen des Fahrzeugs, induziert das magnetische Feld der Permanentmagnete im Stator eine elektrische Spannung, und der erzeugte Strom wird in den Fahrzeugakkumulator eingespeist. Mit den heute verfügbaren Hochleistungs-Permanentmagneten aus Neodym-Eisen-Bor-Legierungen können solche Motoren 20–30 % kompakter und leichter gebaut werden als die konkurrierenden Asynchron-Käfigläufermotoren und die Reluktanzmotoren. Gewichtseinsparung ist für Elektrofahrzeuge, deren Reichweite auch mit den heute verfügbaren Hochleistungs-Lithium-Ionen-Akkumulatoren stark eingeschränkt bleibt, ein essentieller Erfolgsfaktor.

Das Motorkonzept des bürstenlosen permanentmagnetisch erregten Synchronmotors wurde aus dem klassischen Dynamoprinzip fortentwickelt. Beim Dynamo rotiert ein Rotor mit elektrisch erregten Spulen in einem Stator aus Permanentmagneten. Die Stromzuführung zum Rotor erfolgt über Kohlebürsten, die auf dem Kollektor schleifen. Bürsten und Kollektor nutzen sich durch den dauernden kraftschlüssigen Kontakt ab und sind Quellen für Motorstörungen und Ausfälle. Mit der Entwicklung der starken



Neodym-Eisen-Bor-Permanentmagnete wurde es in den neunziger Jahren möglich, die Magnete im Rotor unterzubringen und die elektrisch erregten Spulen in den Stator zu verlagern. Dieses Motorkonzept benötigt keine Stromzuführung zu beweglichen Motor-teilen, und es entsteht ein bürstenloses, robustes und wartungsarmes Motorkonzept. Bürstenlose permanentmagnetische Synchronmotoren werden heute in hohen Stückzahlen für Servomotoren (bspw. Kfz-Fensterheber) produziert und dringen in weitere Applikationen, beispielsweise Haushaltsgeräte, vor. Die Motoren zeichnen sich durch ein hohes Drehmoment und schnelles Ansprechverhalten beim Anfahren und bei der Drehzahlstellung aus.

Abbildung 3-1 zeigt einen permanentmagnetisch erregten Elektromotor für Hybridfahrzeuge von Bosch (Bosch, 2010). Gut zu erkennen sind die kupferfarbigen Wicklungen an den Statorpolen. Sichtbar sind auch die Segmente des äußeren Rotorumfangs, in denen die Pole der Permanentmagneten untergebracht sind. Der Motor sitzt als Zentralmotor auf der Kurbelwelle des Verbrennungsmotors, wird zugleich als Anlasser genutzt und wirkt im Schubbetrieb (beim Bremsen) als Generator, der aus der Bewegungsenergie elektrische Energie zurückgewinnt und in den Akkumulator einspeist.

Abbildung 3-1: Permanentmagnet-Elektromotor für Hybridfahrzeug



Quelle: Robert Bosch GmbH

Eine Variante, der insbesondere für reine Elektrofahrzeuge, seien sie mit Lithium-Ionen-Akkumulator oder Brennstoffzelle angetrieben, Zukunftschancen beigemessen werden, ist der Radnabenantrieb. Dabei werden die Elektromotoren in die Antriebsräder des Fahrzeugs integriert. Wegen des beschränkten Platzangebots kommt es dabei besonders auf eine kompakte Bauweise des Elektromotors an, wie sie mit Permanentmagnetmotoren realisierbar ist. Trotz der kleinen Abmessungen können solche Motoren leistungsstark ausgelegt werden. Im Fraunhofer Demonstrationsauto FrECC0

erreicht der Radnabenmotor bei einem Außendurchmesser von nur 364 mm eine Leistung von 40 kW und ein Drehmoment von 600 Nm (Tabelle 3-3).

Tabelle 3-3: Kennwerte der Radnabenmotoren im Fraunhofer Demonstrationsauto FrECC0

Kenngröße	Wert
Dauerleistung	40 kW
Nenn Drehmoment	600 Nm
Wirkungsgrad	> 95 %
Masse	34 kg
Außendurchmesser	364 mm
Bautiefe	88 mm

Quelle: Fraunhofer-Gesellschaft für angewandte Forschung e. V.

Eine Alternative zum Permanentmagnetmotor ist der so genannte **Reluktanzmotor**. Auch dessen Rotor enthält keine Kupferwicklungen, sondern besteht aus weichmagnetischen Polen, bevorzugt Eisen. Der Rotor wird durch die Reluktanzkraft (die Anziehungskraft, die ein Elektromagnet auf Eisen ausübt) bewegt. Die Zahl der weichmagnetischen Pole des Rotors ist geringer als die Zahl der elektrisch erregten Statorpole, um eine exakte Nordpol-Südpol-Stellung von Stator und Rotor zu vermeiden, bei der kein Drehmoment auf den Rotor ausgeübt werden kann. Die Statorwicklungen werden geschaltet um die gewünschte Drehbewegung des Rotors einzustellen. Reluktanzmotoren werden auch als SR-Motoren bezeichnet. Ihr Drehmoment erreicht nicht die Werte von Permanentmagnetmotoren, ihr Wirkungsgrad ist nach Herstellerangaben vergleichbar (MACCON GmbH, 2010).

Eine weitere Alternative zum Permanentmagnetmotor ist der **Induktionsmotor**. Er wird auch als Asynchronmotor oder Käfigläufermotor bezeichnet. Der Rotor des Standard-Asynchronmotors enthält keine Kupferwicklungen, sondern kurzgeschlossene Aluminiumstäbe, in denen durch das elektrisch erzeugte Magnetfeld des Stators ein Stromfluss induziert wird. Es gibt neuerdings auch Motoren mit Kupferrotoren, die höhere Wirkungsgrade erreichen (Angerer et al., 2009). Die Asynchronmotoren werden mit Drehstrom betrieben. Die Drehzahl des Motors wird durch die Polpaarzahl der Ständerwicklungen und die Frequenz des elektrischen Drehfelds bestimmt. Drehzahlregelbare Asynchronmotoren benötigen einen Umrichter, der die Frequenz des Drehstromfelds verändert. Der Drehstromasynchronmotor ist bürstenlos und durch seine Robustheit und Wartungsarmut das gebräuchlichste Antriebsaggregat in der Industrie geworden. Er wird in allen Leistungsklassen in hohen Stückzahlen für stationäre Antriebe von Pumpen, Verdichtern und anderen Aggregaten gebaut.

Die Alternativen zum Permanentmagnetmotor gewinnen als Rückfallposition dann an Bedeutung, wenn die Versorgung mit Neodym stocken sollte. 97 % der Metalle der Seltenen Erden, darunter Neodym, werden heute in China produziert. Um die Versorgung der eigenen, stark wachsenden Wirtschaft mit Seltenen Erden sicherzustellen fasst China Exportrestriktionen für diese Rohstoffe ins Auge. Zwar werden gegenwärtig mit Hochdruck Vorkommen außerhalb Chinas erschlossen, darunter in Australien und den USA; bis diese Minen jedoch nennenswert zur Versorgung der Welt beitragen, werden noch mehrere Jahre vergehen (Liedtke & Elsner, 2009).

## **4 Technische Trends bei den Kupferapplikationen**

### **Fahrzeugbau**

Im Fahrzeugbau hält der Trend zur Mechanisierung von Verstellvorgängen mit elektrischen Servomotoren (darunter Fensterheber, Schiebedach, Sitzverstellung, Türschließer, Scheinwerfer und andere Komponenten) an. Waren diese Komfortausstattung früher Oberklassefahrzeugen vorbehalten, dringen sie mehr und mehr auch in die Mittel- und Kompaktklasse vor. Mit der Zahl der eingebauten Elektromotoren steigt der Kupferbedarf. Aufgrund ihrer kompakten und leichten Bauweise und ihrer Robustheit sind die heute genutzten Servomotoren ausschließlich bürstenlose, permanentmagnetisch erregte Synchronmotoren.

Der zunehmende Bedarf an elektrischer Leistung erfordert auch größere Leiterquerschnitte im 12 V Bordstromnetz, das heute zum Standard zählt. Eine Anhebung der Spannungsebene (diskutiert wird seit Jahren 42 V) reduziert den Stromfluss, erlaubt kleinere Leitungsquerschnitte und senkt den Kupferbedarf. Eine künftige Anhebung der Spannungsebene wird unausweichlich sein.

Die Kabelbäume für Daten- und Signalleitungen werden mit zunehmender Sensorik in den Fahrzeugkomponenten komplexer. Hier bietet die Kupferindustrie neuentwickelte Kabel mit kleinerem Querschnitt an. Mit einem Leiterquerschnitt von  $0,06 \text{ mm}^2$  statt des heutigen Standards von  $0,13 \text{ mm}^2$  für die Kabelbäume im Boden und für das Armaturenbrett könnten nach Angaben der International Copper Association 12% Gewicht bei diesen Komponenten eingespart werden (ICA, 2007).

Die Politik versteht den Ausbau der Elektromobilität als Zukunftsaufgabe für eine ökologisch nachhaltige Verkehrsgestaltung und die Verringerung der Abhängigkeit von importierten Energieträgern. Soweit dieser Ausbau mit Hybridfahrzeugen erfolgt, entsteht zusätzlicher Bedarf für Kupfer in den elektrischen Antriebsmotoren. Bei rein mit Akkumulatoren oder Brennstoffzellen angetriebenen Fahrzeugen entfällt der Kupferbe-

darf für den Verbrennungsmotor. Der Kupferbedarf für den starken elektrischen Antriebsmotor überkompensiert diesen Wegfall jedoch, sodass auch bei reinen Elektrofahrzeugen der Kupferbedarf zunimmt. Ladestationen von elektrischen Batteriefahrzeugen und deren Versorgungsleitungen (Kabel) erhöhen den Kupferbedarf weiter.

Die Entwicklung elektrischer Antriebsmotoren für Fahrzeuge ist noch stark im Fluss. Die Zukunftschancen der einzelnen Motorkonzepte sind deshalb noch nicht sicher einschätzbar. Der permanentmagnetisch erregte bürstenlose Synchronmotor ist ein robustes, kompaktes und leichtes Aggregat. Seine Neodym-Eisen-Bor-Magnete enthalten etwa 33 % Neodym und 10 % Dysprosium. Der Dysprosiumzusatz verhindert die Entmagnetisierung der Permanentmagnete bei Arbeitstemperaturen über 80 °C und verschiebt die Einsatzgrenze auf über 200 °C. Neodym und Dysprosium sind Metalle der Seltenen Erden. Deren zukünftige Versorgung ist durch die Dominanz Chinas in diesem Rohstoffmarkt Risiken unterworfen.

Ein alternatives Antriebsaggregat ist der asynchrone Drehstrom-Käfigläufermotor, den Audi in Hybridfahrzeugen nutzt. Auch dies ist ein robuster Motor, dessen Baugröße und Gewicht allerdings um 20–30 % über dem des Permanentmagnetmotors liegt. Sein Kupferbedarf unterscheidet sich nicht wesentlich vom Permanentmagnetmotor, er benötigt allerdings keine dauermagnetischen Werkstoffe und damit keine Metalle der Seltenen Erden wie Neodym und Dysprosium.

Wenig Chancen werden im Fahrzeugbau dem hocheffizienten *Asynchron-Kupferläufermotor* eingeräumt. Zwar ist sein Wirkungsgrad um 1–2 Prozentpunkte besser, der dadurch erzielbare Gewinn an Reichweite jedoch marginal. Kupferläufermotoren haben ein höheres Kupferinventar und sind wegen der komplizierten Fertigung des Druckgusskupferläufers teurer (Angerer, Marscheider-Weidemann, Wendl, & Wietschel, 2009).

## **Übertragung elektrischer Energie**

Kupfer wird für Erdkabel, Seekabel und Stromleitungen in Gebäuden, Geräten und Maschinen genutzt. Hochspannungsfreileitungen dagegen sind aus Aluminiumlegierungen. Der Trend zur Anbindung an das Hochspannungsnetz von Gebäuden und Betrieben mit Erdkabel anstatt mit Freileitungen hält an. Die Verbesserung der Ausstattung der Wohnungen mit Elektrohaushaltsgeräten und die Mechanisierung von Stellvorgängen, darunter Rollläden, Fenster und Türen, erhöhen den Kupfereinsatz für die Gebäudeinstallation. In den Schwellen- und Entwicklungsländern besteht riesiger Nachholbedarf bei der Grundversorgung mit elektrischer Energie. Der Bau von Kraftwerken und leistungsfähigen Stromnetzen ist Voraussetzung für die Entwicklung dieser Staaten und die Hebung des Lebensstandards.

## **Daten- und Signalübertragung**

Die immer sicherer werdende lokale Nachrichtenübertragung per Funk, darunter WLAN, drängt Datenleitungen aus Kupfer zurück. Für hohe Raten oberhalb 1 Gbps bei der Fernübertragung von Daten verdrängen Glasfaserleitungen herkömmliche Kupferkabel. Gleichwohl sind dort, wo dies technisch möglich ist, Kupferdatenleitungen die kostengünstigere Alternative. Über Kupferleitungen ist es zudem möglich, neben Signalen auch elektrische Energie für die Geräteversorgung, beispielsweise von Telefonen, zu übertragen.

## **Aufbau und Verbindungstechnik bei elektronischen Bauteilen**

Die elektrische Verbindung zwischen integrierten Schaltungen (Chips) und den Schaltkreisen (Platinen), in die sie eingebunden sind, wird durch Leadframes hergestellt. Sie sind Teil des Chipgehäuses und übernehmen zugleich die Aufgabe der Wärmeabfuhr aus den Chips an die Umgebung oder, sofern vorhanden, an Kühlkörper oder Wärmerohre. Leadframes, Kühlkörper und Wärmerohre bestehen aus Kupfer (ICA, 2007; Bosch, 2010).

Die fortschreitende Miniaturisierung reduziert die geometrischen Abmessungen und damit den Kupferbedarf. Durch die steigende Verarbeitungsgeschwindigkeit steigt allerdings der Aufwand für die Wärmeabfuhr, so dass konkurrierende Trends auf den Kupferbedarf wirken.

## **Wasserversorgung**

Die Nutzung von Kupferrohren in der Trinkwasserinstallation von Gebäuden ist ein bedeutsames Segment der globalen Kupferverwendung. Hier kommt der Werkstoff Kupfer durch die stark verbesserten Kunststoffrohre und Kunststoffittings unter Druck. Sie sind zuverlässig geworden, kostengünstig und noch einfacher zu verlegen als Kupferrohre. Die Einträge von Kupferionen in die Gewässer, die aufgrund ihrer bioziden Wirkung Wasserorganismen schädigen können, sind umweltpolitisch unerwünscht. Technische, wirtschaftliche und ökologische Gründe sprechen für eine künftige Beendigung der KupfERNutzung für die Trinkwasserinstallation.

## **Architektonische Kupferanwendungen**

Die umweltoffenen Kupferanwendungen für Dächer, Fassaden, Regenrinnen und Regenfallrohre stehen unter der Beobachtung durch die Umweltpolitik. Die deutschen Behörden haben die Empfehlung ausgesprochen, auf den Einsatz von Kupferanwendungen im Bauwesen zu verzichten. In Bebauungsplänen wird die Nutzung von Kupfer

gelegentlich eingeschränkt. Auch die schweizer Behörden empfehlen den Einsatz von Werkstoffen mit besserem Abschwemmverhalten (UBA, 2005). Es ist zu erwarten, dass die umweltoffene Kupfernutzung künftig ausläuft.

### **Stationäre Elektromotoren**

Das mit Abstand häufigste elektrische Antriebsaggregat in Industrie und Gewerbe ist der asynchron laufende Kurzschlussläufermotor. Dieser Induktionsmotor ist in der Standardausführung mit einem Rotor aus kurzgeschlossenen Aluminiumstäben ausgerüstet. Aufgrund dieses konstruktiven Merkmals wird er auch als Käfigläufermotor bezeichnet. In der neuesten Technologie wird der Rotor als Kupferkäfig ausgeführt, wodurch eine weitere Effizienzsteigerung erzielt wird. Ein Standardmotor mit 7,5 kW Nennleistung beispielsweise erreicht in der höchsten Effizienzklasse Eff 1 einen Wirkungsgrad von 90,1 %. Mit Kupferläufer beträgt der Wirkungsgrad 92,4 % (Angerer et al., 2009). Solche Motoren weisen ein höheres Kupferinventar auf als Motoren mit Aluminiumrotoren. Sie sind aufgrund der aufwändigen Fertigung des Rotors im Kupferdruckguss teurer. Trotzdem ist davon auszugehen, dass mit dem Anstieg der Energiekosten ihre Verbreitung in stationären Applikationen allmählich das Nischendasein verlassen wird.

### **Regenerative Energien**

Der zunehmende Ausbau der regenerativen Energiegewinnung, sei es aus Wind, Solarenergie oder Biomasse, wird durch die damit verbundene Dezentralisierung der Anlagenstandorte den Kupferbedarf steigen lassen. Zum einen, weil mit kleineren Anlagen der spezifische Kupferbedarf (kg Kupfer/kW) für die Generatoren und Transformatoren steigt, zum anderen weil die Übertragungsnetzlänge zur Einbindung der dezentralen Anlagen zunimmt, die in der Regel über Erd- oder Seekabel erfolgt.

## **5 Simulationsmodell und Szenarioannahmen**

### **5.1 Einführung in das Modell**

Das vorliegende Kapitel dokumentiert das Modell Kupfernachfrage nach Zukunftstechnologien. In diesem Modell wird die Entwicklung des Kupferverbrauchs weltweit bis zum Jahre 2050 simuliert unter besonderer Berücksichtigung der Kupfernachfrage im Pkw-Bereich im Hinblick auf den geplanten Ausbau der Elektromobilität. Ziel des Modells ist es zu identifizieren, wie sich ein Wandel im Automobilbereich hin zur Elektromobilität auf die Verfügbarkeit des Rohstoffes Kupfer auswirkt. Das Modell ist Teil ei-

---

nes Modells, in dem weitere Rohstoffe wie Lithium und Neodym auf ihre Verfügbarkeit hin untersucht werden.

Zur Simulation der Rohstoffnachfragen wird der System Dynamics Ansatz gewählt. Mit dieser Methode können komplexe Sachverhalte graphisch modelliert, simuliert und analysiert werden. System Dynamics ist eine Methode zur Untersuchung komplexer, dynamischer Probleme. Sie bietet die Möglichkeit, aus einer Analyse der Problemstruktur und des von ihr verursachten Verhaltens Einsichten über langfristig wirksame Entscheidungsregeln abzuleiten (DGSD, 2010).

Die Modellierung und Simulation erfolgt mit Hilfe der Simulationssoftware Vensim. Diese verfügt über eine graphische Modellieroberfläche, mit der die Beziehungen zwischen den Modellvariablen leicht dargestellt werden können. Für die Simulation werden die Modellvariablen mit mathematischen Funktionen hinterlegt. Zur Analyse des Modells und der Ergebnisse stehen verschiedene Werkzeuge zur Verfügung mit deren Hilfe man die Ergebnisse z.B. in Schaubilder oder als Tabellen darstellen kann und verschiedene Variablen vergleichen kann.

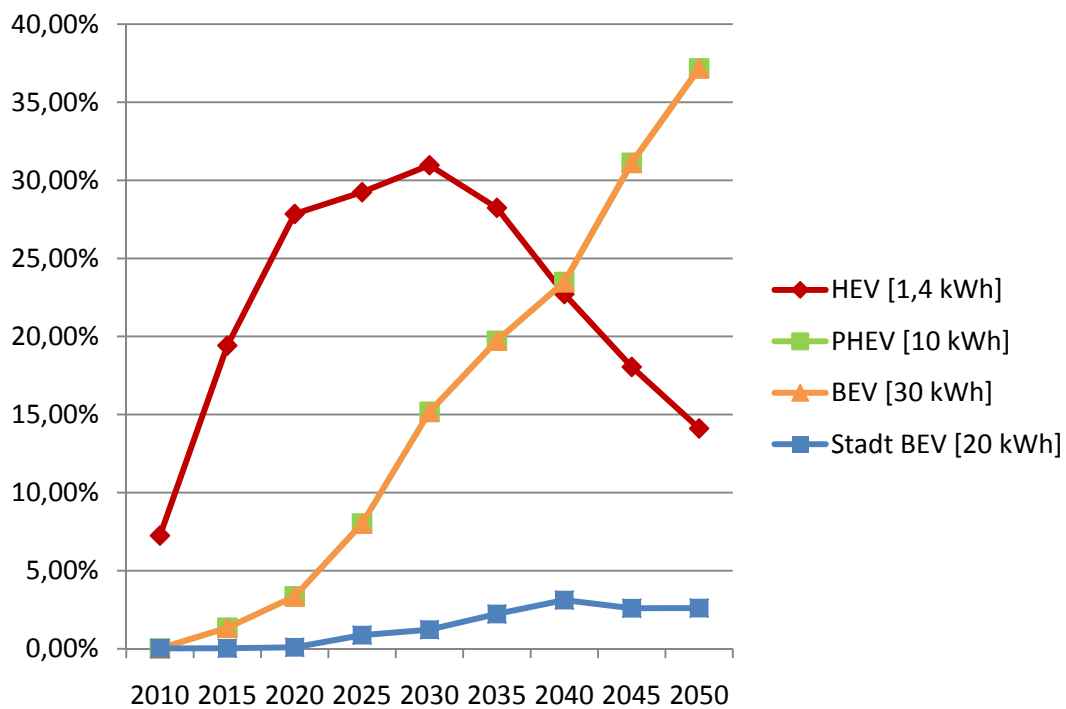
Da im Modell insbesondere der Einfluss des Pkw-Bereichs auf die Nachfrage nach verschiedenen Rohstoffen untersucht wird, kommt der Modellierung dieses Bereichs eine wichtige Bedeutung zu. Die Entwicklung des Fahrzeugmarkts in den kommenden Jahren bis 2050 wird durch zwei unterschiedliche Szenarien abgebildet. Diese wurden am Fraunhofer ISI zunächst für den europäischen Markt entwickelt (Wietschel & Dallinger, 2008) und in der Studie „Lithium für Zukunftstechnologien“ (Angerer, Marscheider-Weidemann, Wendl, & Wietschel, 2009) weiter für den Weltmarkt ausgebaut. Bei den Szenarien handelt es sich um ein sehr optimistisches Szenario bezüglich der schnellen Marktpenetration von Elektrofahrzeugen, dem so genannten Dominanz-Szenario und um ein moderates Szenario, dem Pluralismus-Szenario. Diese beiden Szenarien prognostizieren die Marktpenetrationszahlen reiner Elektrofahrzeuge (BEV), reiner Elektrofahrzeuge für den Stadt-Verkehr (Stadt-BEV), von Plugin-Hybriden und von Hybridfahrzeugen bis ins Jahre 2050 unter unterschiedlichen Annahmen. Brennstoffzellenfahrzeuge werden in den Szenarien nicht berücksichtigt. Allerdings hat ein Shift von Hybrid- und Elektrofahrzeugen hin zu Brennstoffzellenfahrzeuge auf die Kupfernachfrage im Pkw-Segment keinen großen Einfluss, da die Kupferinventare dieser Fahrzeugtypen ähnlich groß sind (vgl. Tabelle 5-3).

Im Dominanz-Szenario werden im Jahre 2050 die Hybrid- und Elektrofahrzeuge den Markt stark dominieren und zusammen einen Marktanteil von 90 % erreichen. Im Pluralismus-Szenario existiert eine Vielzahl von Antriebskonzepten nebeneinander. Hyb-

rid- und Elektrofahrzeuge erzielen im Jahre 2050 in diesem Szenario einen Marktanteil von ca. 50 %.

Abbildung 5-1 und Abbildung 5-2 zeigen die Entwicklung der Neuzulassungsanteile der einzelnen Fahrzeugtypen (Angerer, Marscheider-Weidemann, Wendl, & Wietschel, 2009).

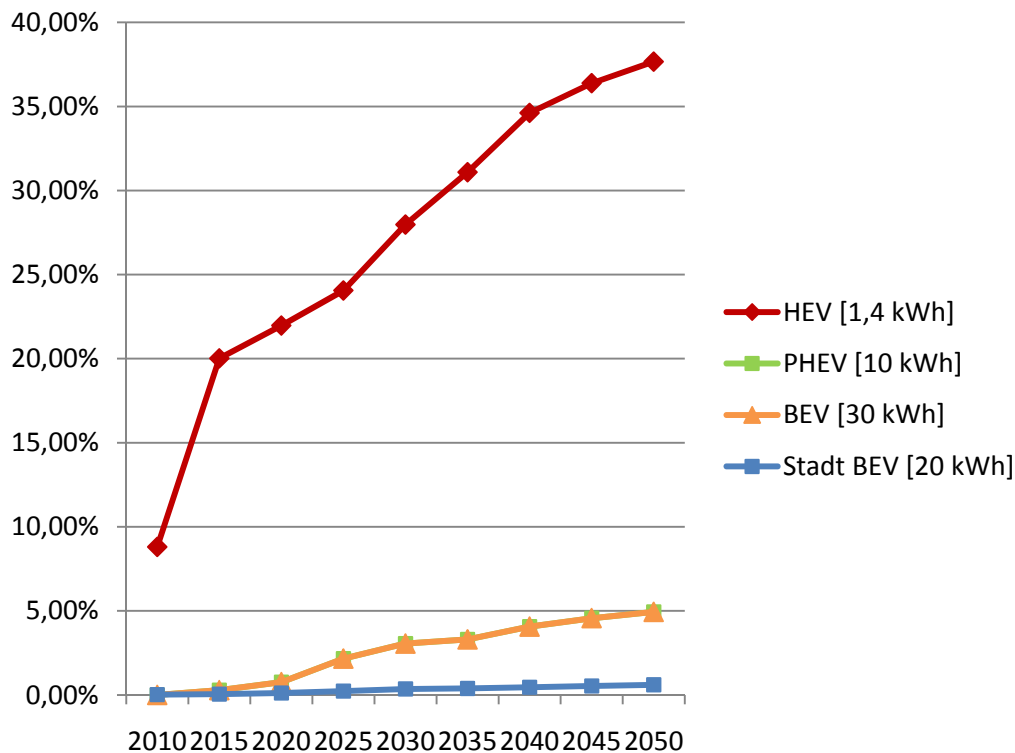
Abbildung 5-1: Neuzulassungsanteile Welt – Dominanz



Quelle: Fraunhofer ISI



Abbildung 5-2: Neuzulassungsanteile Welt – Pluralismus



Quelle: Fraunhofer ISI

Als Ausgangspunkt für das Simulationsmodell des Rohstoffs Kupfer dient das Simulationsmodell des Rohstoffs Lithium, das in der Studie „Lithium-Nachfrage für Zukunftstechnologien“ erläutert wird (Angerer, Marscheider-Weidemann, Wendl, & Wietschel, 2009). Dieses wurde weiterentwickelt und um den Rohstoff Kupfer und weitere Rohstoffe wie Neodym ergänzt. Die Modellierung des Verbrauchs der Rohstoffe erfolgt nach einem ähnlichen Schema. Für jeden Rohstoff werden die Anwendungen identifiziert und sinnvoll zu Segmenten gruppiert. Für die einzelnen Anwendungssegmente wird dann der Anteil am Rohstoffverbrauch und der jeweilige Verbrauch im Jahr 2008, dem Startjahr der Simulation, ermittelt. Anschließend erfolgt mit Hilfe von Wachstumsprognosen die Simulation des Verbrauchs bis 2050.

In einem weiteren Schritt wird die Sekundärrohstoffmenge berechnet, die aus dem Recyclingprozess gewonnen werden kann. Zunächst wird für die einzelnen Anwendungsbereiche überprüft, was nach der Nutzungsdauer der Produkte geschieht. Ein Recycling ist nicht für alle Anwendungen wirtschaftlich durchführbar. Diese Produkte werden dann entsorgt bzw. deponiert. Andere Produkte können wirtschaftlich recycelt werden und gelangen am Ende ihrer Nutzungsdauer in den Recyclingprozess. Eine weitere Gruppe bilden die Segmente, bei denen eine dissipative Nutzung des Rohstoffs erfolgt

und somit kein Recycling mehr möglich ist. Aus der Materialmenge, die in den Recyclingprozess gelangt, kann über Sammelquoten und Recyclingquoten die anfallende Menge an Sekundärrohstoff ermittelt werden.

Das Modell gibt schließlich Auskunft über die Entwicklung der Verbräuche in den einzelnen Anwendungssegmenten, über die Entwicklung des Gesamtrohstoffverbrauchs und der Sekundärrohstoffmengen. Die Ergebnisse der Simulation geben Aufschluss über den Einfluss des geplanten Ausbaus der Elektromobilität auf die Rohstoffnachfragen weltweit und über die zukünftigen Verfügbarkeiten der Rohstoffe.

## **5.2 Das Simulationsmodell für den Rohstoff Kupfer**

Im Folgenden wird das Modell des Rohstoffes Kupfer genauer betrachtet. Wenn in den nachfolgenden Abschnitten die Rede vom Kupferverbrauch ist, ist damit immer der Verbrauch von Raffinade-Kupfer gemeint. Als Raffinade-Kupfer bezeichnet man das Metall, das einen Kupferanteil von mindestens 99,85 Gewichtsprozent oder einen Anteil von mindestens 97,5 Gewichtsprozent besitzt, wobei die Anteile der anderen Elemente jeweils ein bestimmtes Limit nicht überschreiten dürfen. Neben der elektrolytischen Raffination, der elektrolytischen Extraktion und der chemischen Raffination gibt es noch die Feuerraffination, um Raffinade-Kupfer herzustellen (ICSG, 2008).

Für Kupfer existiert eine Vielzahl unterschiedlicher Anwendungen. Es wird versucht, diese Anwendungen zusammenzufassen und zu gruppieren mit dem Ziel, einheitliche Gruppen zu bilden. Es erfolgt eine Aufteilung der Anwendungen auf die folgenden sechs Segmente (vgl. Tabelle 5-1). Aus dieser Tabelle sind auch die Anteile der einzelnen Segmente am Gesamtverbrauch sowie die Wachstumsannahmen ersichtlich.

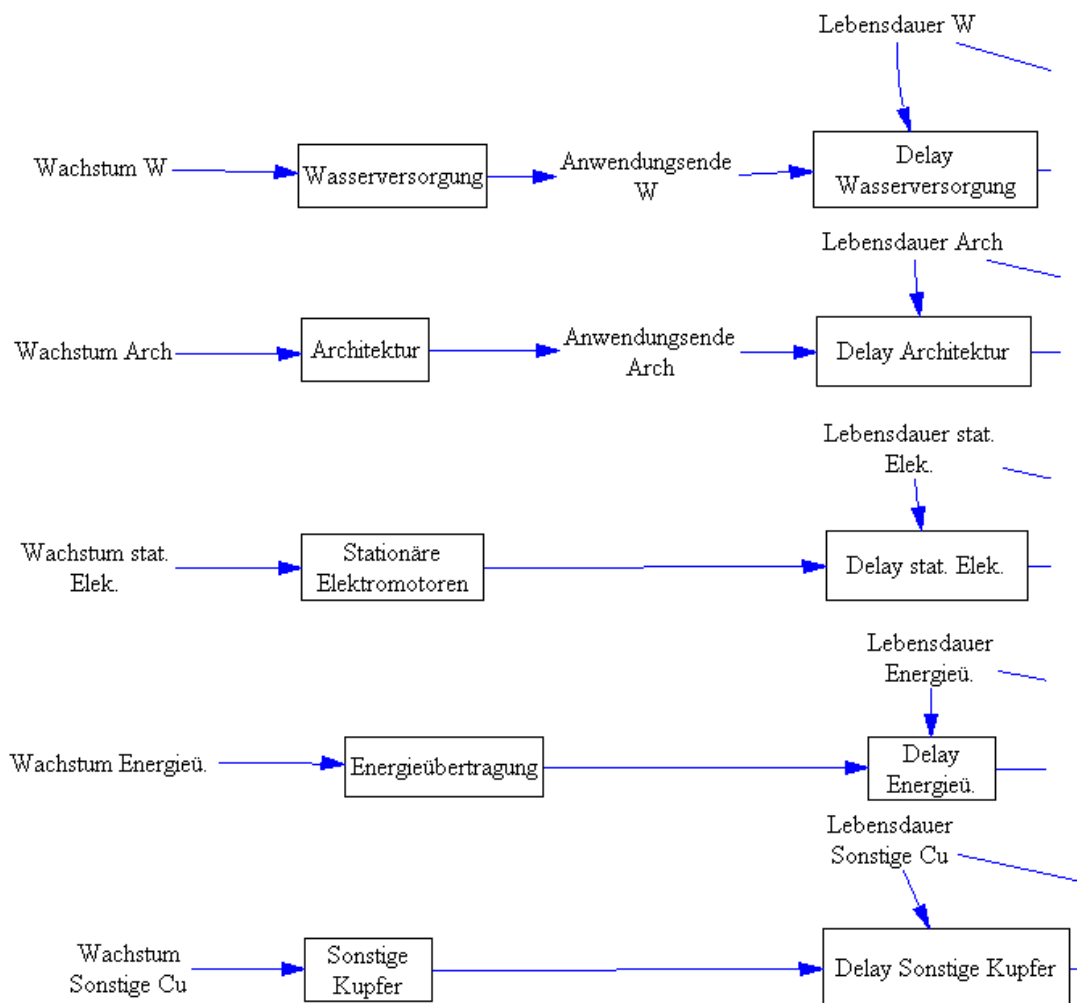
Tabelle 5-1: Segmente der Kupferapplikationen

Teil %	Kupferapplikation	Produktbeispiele	Wachstumsannahme
12	Pkw inkl. Transporter, SUV, Minivans	el. Traktionsmotoren, el. Servomotoren, Verbrennungsmotoren, Lichtmaschine, Anlasser, Kühler, Kabelbäume, ECU, Sensoren, Aktuatoren, Stecker, Relais, Batterien	2,26 %/a
13	Wasserversorgung	Rohre, Fittings, Messingarmaturen	2018 auslaufend
2	Architektur	Dächer, Fassaden, Regenrinnen, -fallrohre	2018 auslaufend
12	Stationäre Elektromotoren	Antrieb von Maschinen, Pumpen, Verdichter, Lüfter, Rührern, Förderbänder, Aufzüge	3,8 %/a
26	Energieübertragung	Kraftwerke, Wind- und Solaranlagen, Transformatoren, Hochspannungserd- und -seekabel, Drosseln, Spulen, Strom- und Datenleitungen in Gebäuden	3,8 %/a
35	Sonstige	Lkw, Krafträder, Elektroloks, Schiffsantriebe, Medizintechnik, Haushaltsgeräte, Kühlschränke, Gefrierschränke, Herde, Öfen, Klima- und Lüftungsanlagen, Beschläge, Lote, Messingventile, Lagerwerkstoffe, Bleche, Bänder, Rohre, Mikrochips, Leiterplatten, Stecker, Anschlussleisten, Kühlkörper, Wärmerohre, Türklinken, Münzen, Uhren, Schmuck, Pflanzen- und Holzschutzmittel,	2,26 %/a

Quelle: verändert nach International Copper Association

Die Segmente Wasserversorgung, Architektur, Stationäre Elektromotoren, Energieübertragung und Sonstiges werden mit ihren Verbräuchen im Startjahr 2008 modelliert. Mit Hilfe der Wachstumsraten, die aus einem Excel-Datenblatt ausgelesen werden, und den Verbräuchen im Jahr 2008 werden dann die Verbräuche pro Jahr bis 2050 hochgerechnet. Die graphische Modellierung ist in Abbildung 5-3 zu sehen.

Abbildung 5-3: Graphische Modellierung des Wachstums



Die Wachstumsraten resultieren aus unterschiedlichen Überlegungen, die im Folgenden näher erläutert werden. Die ersten fünf Gruppen aus Tabelle 5-1 sind relativ homogen. Die letzte Gruppe der Sonstigen Anwendungen fasst die übrigen Produkte zusammen. Diese Gruppe enthält sowohl Konsumgüter als auch Investitionsgüter und ist relativ inhomogen. Da der Anteil der Konsumgüter aber überwiegt, wird für die Wachstumsquote in diesem Segment die Wachstumsprognose des World Business Council for Sustainable Development (WBCSD) für den Konsumgüter-Bereich Pkw mit 2,26% übernommen (WBCSD, 2004).

Bei den Segmenten Architektur und Wasserversorgung wird von einem negativen Wachstum ausgegangen, da diese Anwendungen aus Umweltschutzgründen auslaufen werden (UBA, 2005). Das Wachstum wird im Modell auf -20% gesetzt und das Auslaufjahr auf 2030. Ab 2030 gibt es im Modell keinen Verbrauch des Rohstoffs Kup-

fer dieser Segmente mehr. Es fallen jedoch noch Sekundärkupfermengen aus diesen Bereichen an.

Ermittelt man den Korrelationskoeffizienten zwischen Weltwirtschaftswachstum und dem Wachstum des Kupferverbrauchs bis 1980 zurück, beträgt dieser 0,6. Dies weist auf eine mittlere Korrelation von Weltwirtschaftswachstum und Wachstum des Kupferverbrauchs hin (vgl. Tabelle 5-2) (Fahrmeir, Künstler, Pigeot, & Tutz, 2004) und zeigt, dass das Weltwirtschaftswachstum zur Abschätzung des Wachstums des Kupferverbrauchs verwendet werden kann.

Tabelle 5-2: Korrelationskoeffizient r

$ r  < 0,5$	Schwache Korrelation
$0,5 \leq  r  < 0,8$	Mittlere Korrelation
$0,8 \leq  r $	Starke Korrelation

Quelle: Fahrmeir, Künstler, Pigeot, & Tutz, 2004

Dieses Vorgehen wird für die Segmente Stationäre Elektromotoren und Energieübertragung gewählt. Diese beiden Segmente enthalten Investitionsgüter und werden daher mit einer Wachstumsrate von 3,8 % modelliert, was dem durchschnittlichen Wirtschaftswachstum der letzten 20 Jahre entspricht (IMF, 2006; IMF, 2007). Die Entwicklung der Wachstumsquoten, die zu einem Korrelationskoeffizient von 0,6 führen, wird in Tabelle 8-2 dargestellt. Das durchschnittliche Wachstum des Kupferverbrauchs der letzten 20 Jahre betrug 2,7 %, d.h. es liegt unter dem durchschnittlichen Wachstum des Wirtschaftswachstums, und daher können die 3,8 % als obere Abschätzung betrachtet werden.

Das Pkw-Segment bildet eine Ausnahme gegenüber den anderen Segmenten in der Modellierung des zukünftigen Verbrauchs des Rohstoffs Kupfer. Dies resultiert aus der Fragestellung, die gezielt die Auswirkung der Zunahme der Elektromobilität auf die Kupfernachfrage untersuchen will. Beim Pkw-Segment erfolgt die Modellierung des zukünftigen Kupferverbrauchs nicht direkt über die Wachstumsquote, sondern über Entwicklung der Neuzulassungszahlen an Fahrzeugen. Die unterschiedlichen Anteile der Fahrzeugtypen an den Gesamtneuzulassungszahlen bis 2050 stammen aus den Berechnungen des Dominanz- bzw. Pluralismus-Szenarios (Angerer, Marscheider-Weidemann, Wendl, & Wietschel, 2009). Die Entwicklung der Anteile der Hybrid-, Plugin-Hybrid und Batteriefahrzeuge werden über ein Excel-Datenblatt eingelesen. Für die Berechnung der Verbräuche werden die Kupferanteile je Fahrzeugtyp hinzugezo-

gen. Diese werden ebenfalls für das Excel-Datenblatt eingelesen. Abbildung 5-4 und Abbildung 5-5 zeigen die graphische Modellierung des Pkw-Segments mit Vensim.

Abbildung 5-4: Allgemeines Fahrzeugmodell

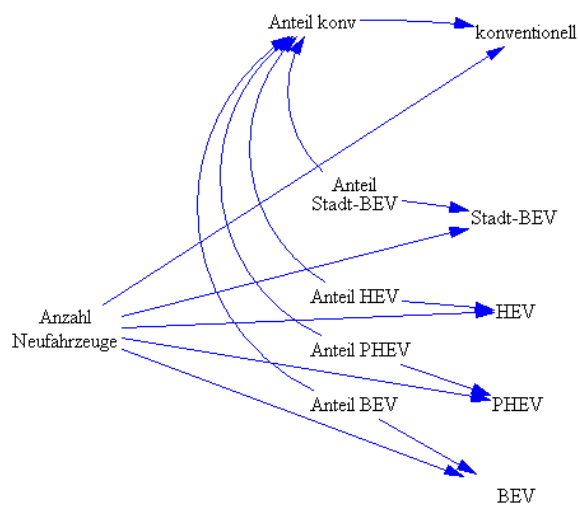
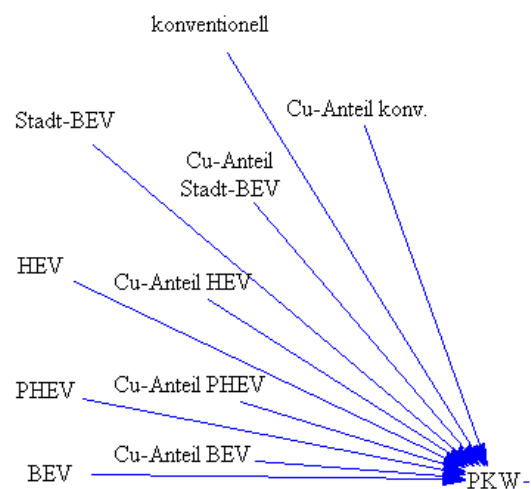


Abbildung 5-5: Graphische Modellierung der Kupfermenge im Pkw-Segment



Zum Kupferinventar der Fahrzeuge, der Verbrennungsmotoren und der elektrischen Traktionsmotoren wurden bei Herstellern Informationen eingeholt, so dass hier belastbare Daten zur Verfügung stehen. Da es sich zum Teil um vertrauliche Informationen handelt, können nicht alle Quellen offengelegt werden. Die Kupferinventare elektrischer Antriebsmotoren für Fahrzeuge (d.h. permanentmagnetisch erregter Motor, Asynchronmotor mit Aluminiumläufer und Reluktanzmotor) unterscheiden sich nicht wesentlich. Es wird ein Wert von 0,9 kg Cu/kW zugrunde gelegt. Der Asynchronmotor enthält mehr Kupfer, wenn dieser mit einem Kupferläufer ausgerüstet ist. Dieser teuren Lösung, die nur wenig Gewinn an Reichweite bringt, werden im Fahrzeugbau keine Chancen eingeräumt.

Das Kupferinventar von Lithium-Ionen-Akkumulatoren wird vom Institut für Metallurgische Prozesstechnik IME der RWTH Aachen mit 3,6 % angegeben (Vest, Weyhe, & Friedrich, 2010). Bei einem spezifischen Akkugewicht von 10 kg/kWh errechnet sich das Kupferinventar zu 0,36 kg Cu pro kWh. Das Kupferinventar von Brennstoffzellen für Fahrzeuge ist vernachlässigbar.

Mit dem Kupferinventar eines Pkw der Mittelklasse aus Tabelle 3-2 ergeben sich aus den getroffenen Annahmen die in Tabelle 5-3 zusammengestellten Kupferinventare der unterschiedlichen Fahrzeugkonzepte.

Tabelle 5-3: Kupferinventare der Fahrzeugkonzepte

		ICE	HEV	PHEV	BEV	Stadt- BEV	FCEV
Elektrische Motorleistung	kW	0	20	50	50	50	50
Akkukapazität	kWh	0	1,4	10,0	30,0	20,0	1,4
<b>Kupferinventare</b>	<b>kg Cu</b>	<b>25,0</b>	<b>43,5</b>	<b>73,6</b>	<b>68,8</b>	<b>65,20</b>	<b>58,5</b>
Elektromotor	kg Cu	0	18,0	45,0	45,0	45,0	45,0
Verbrennungsmotor	kg Cu	12,0	12,0	12,0	0		0
Li-Ion-Akku	kg Cu	0	0,5	3,6	10,8	7,2	0,5
Übrige Komponenten	kg Cu	13,0	13,0	13,0	13,0	13,0	13,0

Quelle: Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung (korrigiert)

Das Kupfermaterial in den einzelnen Segmenten geht nach Ende der Nutzungsdauer in den Recyclingprozess. Um die anfallende Menge an Kupfer, die nach der Nutzung zurückbleibt und gegebenenfalls recycelt werden kann oder beseitigt werden muss, ermitteln zu können, wird die Lebensdauer bzw. Nutzungsdauer mit einbezogen. Die Lebensdauern für die einzelnen Kupferanwendungen unterscheiden sich erheblich. Die Spanne reicht von acht Jahre für stationäre Elektromotoren bis 80 Jahre für die Wasserversorgung und Anwendungen in der Architektur. Tabelle 5-4 gibt einen Überblick über die unterschiedlichen Nutzungsdauern in den verschiedenen Segmenten.

Tabelle 5-4: Lebensdauer, Sammel- und Recyclingquoten in den Kupferapplikationen

	Nutzung in Jahren	Sammel- quote	Zerlegen	Vorbe- handeln	Material- gewinn	Reuse
Pkw	10	0,80	0,90	0,80	0,95	0,547
Wasserinstallation	80	0,30	0,90	0,90	0,95	0,231
Architektur	80	0,80	0,90	0,90	0,95	0,616
Elektromotoren	8	0,70	0,90	0,80	0,95	0,479
Energieübertragung	50	0,80	0,90	0,80	0,95	0,547
Sonstige	10	0,50	0,90	0,80	0,95	0,342

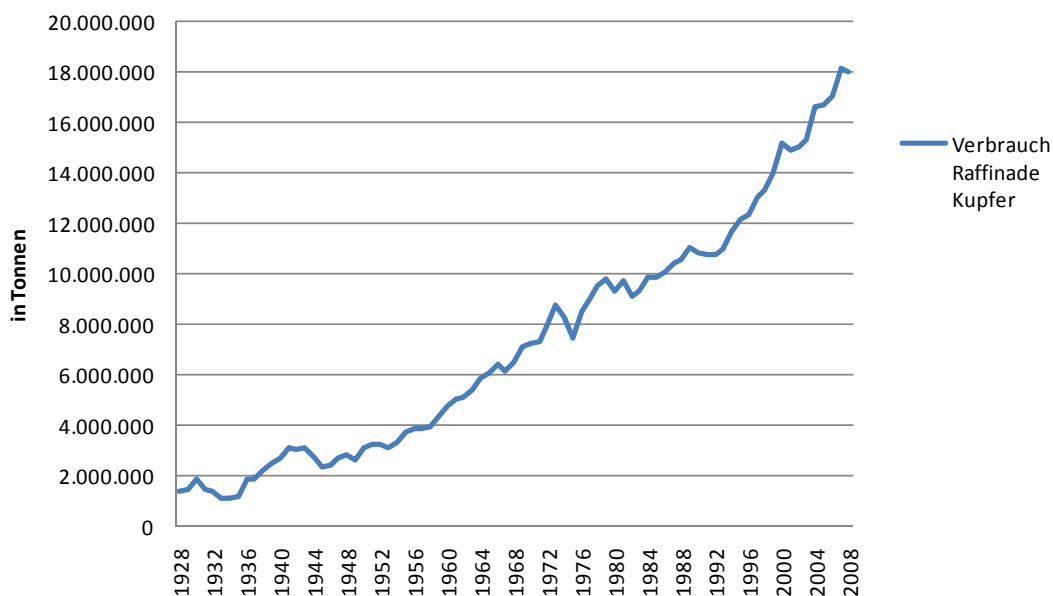
Die langen Lebensdauern führen zu einem umfangreicheren Modellierungsansatz für die Rücklaufmengen an Kupfer nach der Nutzung als beim Lithium-Modell. Der große Unterschied besteht in der Verwendung von historischen Daten des Kupferverbrauchs neben dem Gebrauch der Material-Delay-Funktion zur Abschätzung der Mengen, die ins Recycling gelangen. Die Material-Delay-Funktion in Vensim verzögert einen Wert um eine vorgegebene Zeit. In diesem Modell wird der Startwert (Verbrauch 2008) um die Lebensdauer des Produkts verzögert. Da die Nutzungsdauern aber zum Teil länger sind als die Laufzeit des Modells, ist diese Funktion für Produkte mit langer Lebensdauer ungeeignet. Daher wird in der Modellierung auf historische Daten zurückgegriffen. Bei einer Lebensdauer von 80 Jahren erreichen im Jahr 2008 Produkte ihr Ende, die 1928 in die Nutzung gingen, deshalb werden Daten zum Kupferverbrauch bis 1928 benötigt.

Die Gesamtmenge des Kupferverbrauchs bis ins Jahr 1928 stammt aus den Metallstatistiken des World Metal Bureau (World Bureau of Metal Statistics, 2006)<sup>4</sup>, die jährlich erscheinen. Diese Bände enthalten die Daten von 1938 bis 2005. Die übrigen Daten stammen aus dem World Copper Factbook (ICSG, 2009) und dem Jahresbericht von Cochilco (Comisión Chilena del Cobre (Cochilco), 2008). Die Daten befinden sich im Anhang (Tabelle 8-1). Abbildung 5-6 zeigt graphisch den Verlauf des Verbrauchs von Raffinade-Kupfer der letzten Jahre.

<sup>4</sup> Weitere Daten aus (Metallgesellschaft, 1953), (Metallgesellschaft, 1959), (Metallgesellschaft AG, 1967), (Metallgesellschaft AG, 1975), (Metallgesellschaft AG, 1986), (Metallgesellschaft AG, 1987), (Metallgesellschaft AG, 1992), (World Bureau of Metal Statistics, 2002).



Abbildung 5-6: Verbrauch Raffinade-Kupfer weltweit 1928–2008



Quelle: World Bureau of Metal Statistics, ICSG, Cochilco

Für die Aufteilung der Gesamtmenge auf die einzelnen Anwendungssegmente in den einzelnen Jahren wird eine leicht veränderte Aufteilung des Mineral Yearbooks aus dem Jahr 1933 verwendet (Kiessling, 1933). Diese Aufteilung wird in Fünfjahresschritten inear interpoliert, bis sie der Aufteilung im Startjahr des Modells entspricht (vgl. Tabelle 5-5). Eine Variation der Aufteilung auf die einzelnen Segmente zeigt, dass die Aufteilung keine große Rolle für die anfallende Sekundärmenge 2050 spielt.

Tabelle 5-5: Anteil am Gesamtkupferverbrauch in %

Anwendung	Jahr 1928	Jahr 2008
Pkw inkl. Transporter, SUV, Minivans	0,1	0,12
Wasserversorgung	0,15	0,13
Architektur	0,07	0,02
Stationäre Elektromotoren	0,05	0,12
Energieübertragung	0,5	0,26
Sonstiges	0,13	0,35

Quelle: verändert nach Kiessling (1933) und ICA (2007)

Die Mengen, die pro Jahr verbraucht werden, werden zunächst mit der Lebensdauer über die Material-Delay-Funktion verzögert. Die wichtige Variable, die die Menge an Kupfer bestimmt, die in den Recyclingprozess pro Jahr kommt, ist die Stackvariable der einzelnen Segmente. Diese überprüft, ob die aktuelle Zeit des Modells – die Startzeit (in unserem Modell 2008) - kleiner ist als die Lebensdauer. Ist diese Bedingung erfüllt, gibt die Variable die historischen Daten zurück. Ist die Bedingung nicht erfüllt, greift sie auf die verzögerten Werte der Delay-Variablen zurück, d.h. solange das Ende der Lebensdauer von Produkten, die 2008 in die Nutzung gingen, noch nicht erreicht ist, werden die historischen Werte eingelesen. Dies bedeutet z.B. für das Segment Wasserversorgung mit einer Lebensdauer von 80 Jahren, dass die Kupfermenge, die 2008 in die Anwendung ging, erst 2088 in den Recyclingprozess gelangt. Bei diesem Segment werden dann nur die historischen Werte eingelesen. Anders ist dies bei dem Segment Stationäre Elektromotoren. Hier liegt die Lebensdauer bei 8 Jahren, d.h. bis 2016 werden die historischen Werte eingelesen, ab dann erfolgt die Verzögerung des Verbrauchs aus dem Startjahr 2008. Abbildung 5-7 zeigt die graphische Modellierung.

Abbildung 5-7: Modellierung der Menge, die in den Recycling-Prozess geht

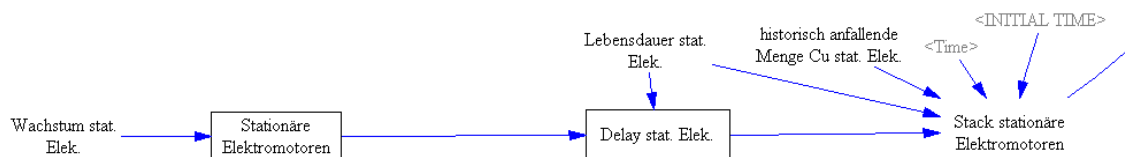
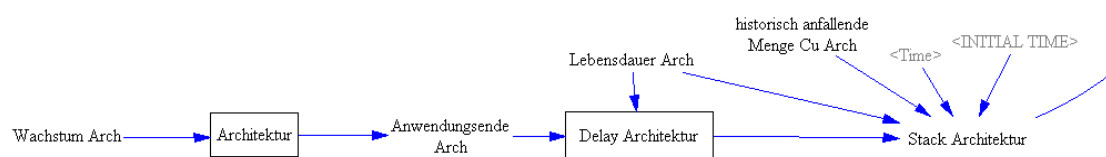


Abbildung 5-8: Modellierung Anwendungsende im Segment Architektur

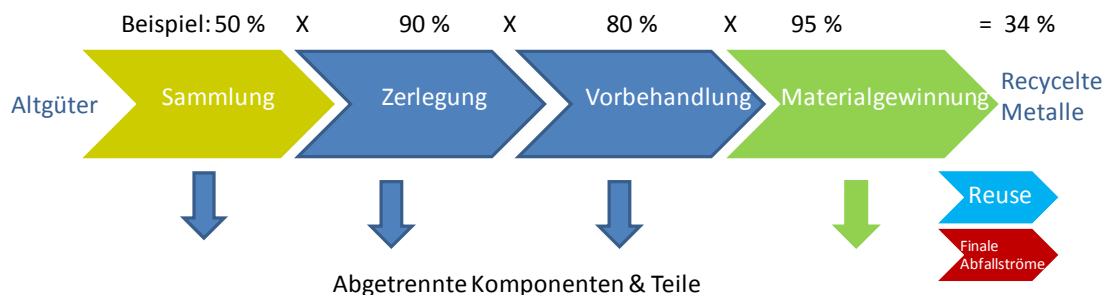


Eine weitere Besonderheit im Vergleich zum Lithium-Modell besteht darin, dass wegen ökologischer Gründe zwei Verwendungen, Architektur und Wasserversorgung, bis 2030 auslaufen. Dies wird durch eine zusätzliche Variable in der Modellierung berücksichtigt (vgl. Abbildung 5-7). Diese Variable gibt ab 2030 nur noch Null aus.

Der Recycling-Prozess (vgl. Abbildung 5-8) wird zur besseren Übersichtlichkeit in einem Extraview modelliert. Die Menge an Kupfer, die prinzipiell für den Recyclingprozess einschließlich Sammlung zur Verfügung steht, wird durch die Stackvariable des jeweiligen Anwendungssegments modelliert. Zunächst wird diese Menge über die

Sammelquote verringert, da nicht alles prinzipiell zur Verfügung stehende recycelbare Material eingesammelt wird. Die Sammelquote bestimmt den Anteil an Kupfer nach der Nutzung, der in den Recyclingprozess gelangt. Die Menge, die eingesammelt wird, gelangt im nächsten Schritt in den Zerlegungsprozess, der eine bestimmte Zerlegungsquote aufweist. Diese ermittelt, wie viel Kupfer aus der Zerlegung gewonnen wird. Nach der Zerlegung folgt die Vorbehandlung. Auch dieser Prozess ist durch eine gewisse Effizienz gekennzeichnet. Die Menge, die nach der Vorbehandlung zur Verfügung steht gelangt schließlich in den eigentlichen Recyclingprozess, der wiederum durch eine Quote gekennzeichnet ist, die bestimmt, wie viel Material nach diesem Prozess zur Verfügung steht. Multipliziert man die einzelnen Quoten miteinander, bekommt man die Gesamtrecyclingquote. Abbildung 5-9 zeigt den Recyclingprozess schematisch. Sammelquoten, Zerlegungsquoten, Vorbehandlungseffizienz der einzelnen Anwendungssegmente und die Materialgewinnungsquoten am Ende des Prozesses werden über das Excel-Datenblatt eingelesen. Die Werte für die Quoten befinden sich in Tabelle 5-4.

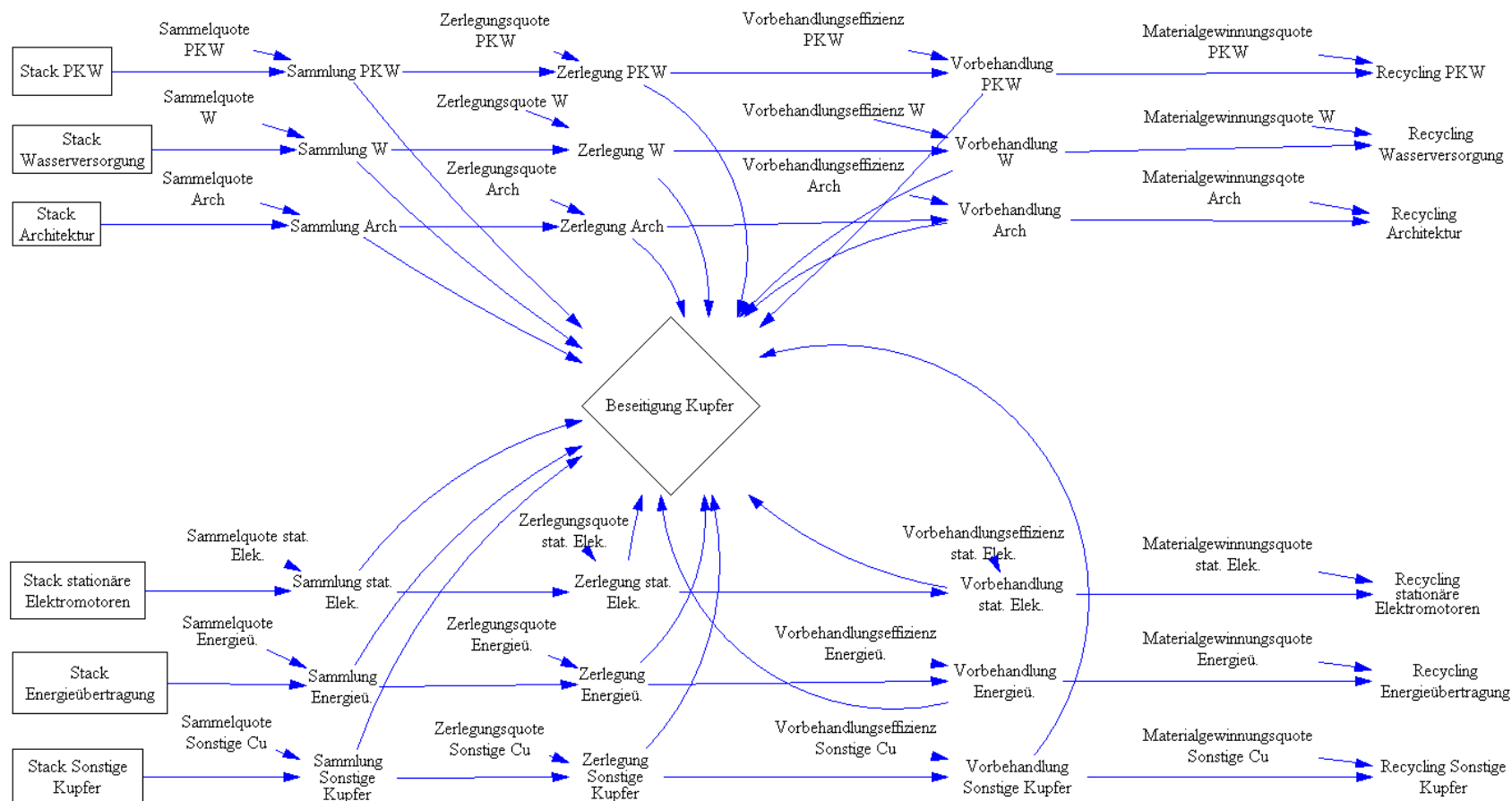
Abbildung 5-9: Recyclingprozess schematisch



Quelle: verändert nach Hagelücken (2009)

Das so ermittelte Sekundärkupfer erweitert die Reservenbasis. Für den Gesamtkupferverbrauch und die anfallende Menge an Sekundärkupfer werden die Mengen aus den einzelnen Anwendungssegmenten aufsummiert.

Abbildung 5-10: Graphische Modellierung des Recyclingprozesses in Vensim

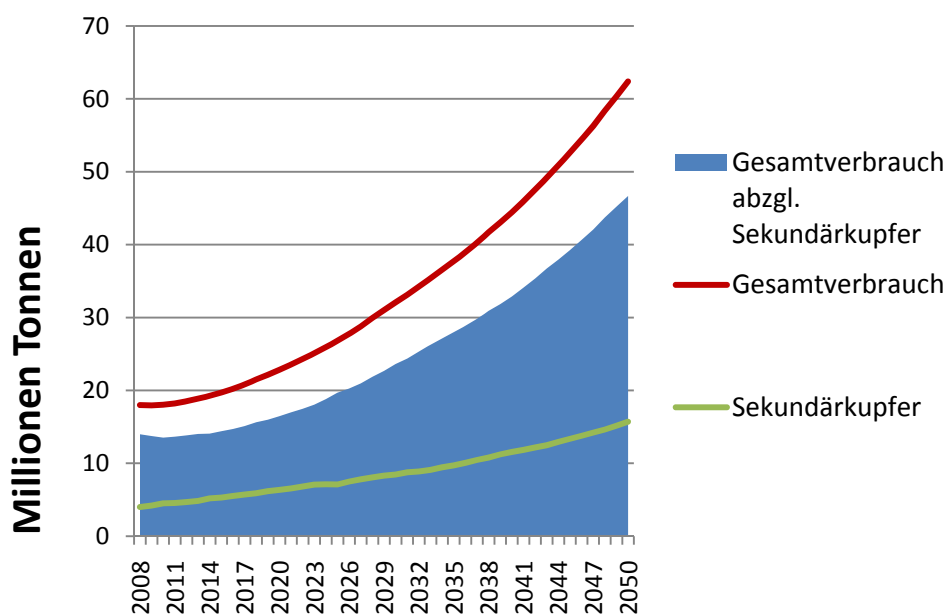


## 6 Foresight von Kupferangebot und Nachfrage

### 6.1 Ergebnisse des Kupfermodells

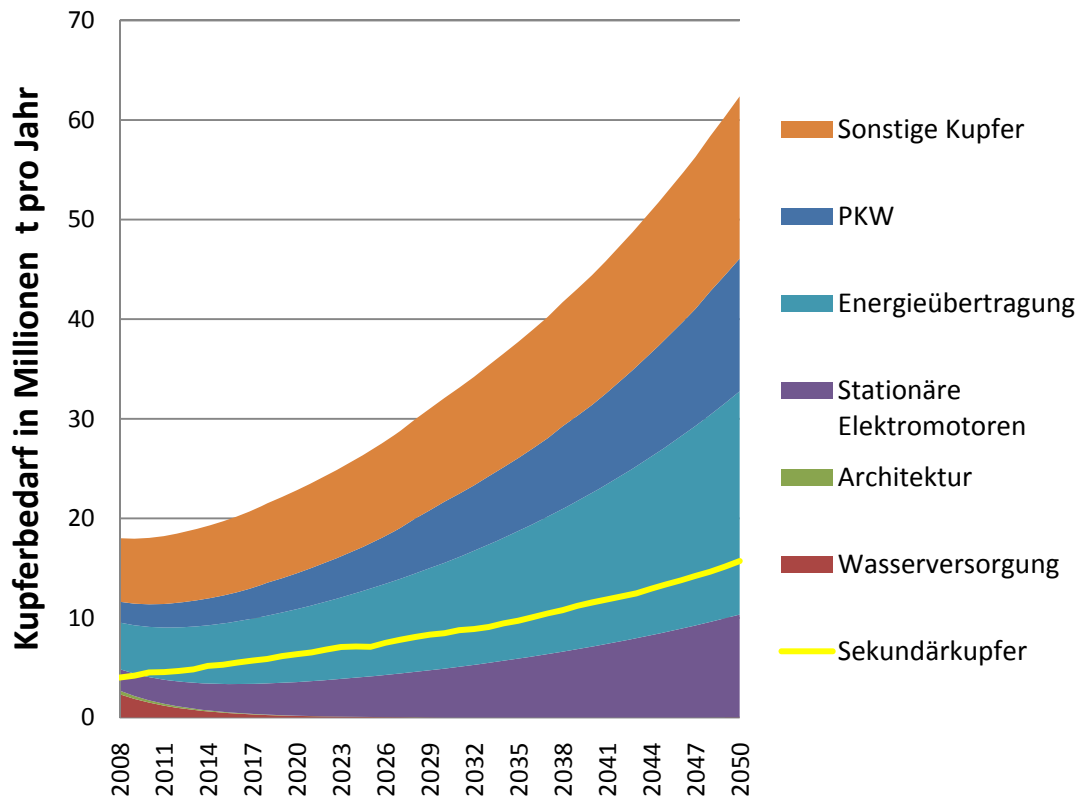
Im folgenden Abschnitt werden die Ergebnisse der Modellsimulation erläutert. Die Simulation wurde mit den oben genannten Szenarien Dominanz und Pluralismus durchgeführt. Die beiden Szenarien im Rohstoffmodell unterscheiden sich nur in der unterschiedlichen Entwicklung des Fahrzeugmarkts. Im Dominanz-Szenario beläuft sich der Kupferverbrauch im Jahre 2050 auf 62,38 Millionen Tonnen. Die anfallende Sekundärmenge im Jahre 2050 beläuft sich auf 15,71 Millionen Tonnen. Dies entspricht einer Sekundäreinsatzquote von 25,18 %. Abbildung 6-1 zeigt den Gesamtkupferverbrauch und die Entwicklung der Sekundärkupfermengen bis ins Jahr 2050.

Abbildung 6-1: Gesamtkupferverbrauch Dominanz-Szenario bis 2050



Der Kupferverbrauch, aufgeteilt auf die einzelnen Segmente, ist aus Abbildung 6-2 ersichtlich. Man kann deutlich erkennen, dass der größte Treiber des Verbrauchs das Segment Energieübertragung ist. Im Jahr 2018 ist das Auslaufen der Anwendung im Wasserversorgungssegment und im Architektursegment durch ein leichtes Abknicken der Kurve zu sehen.

Abbildung 6-2: Kupferverbrauch Dominanz-Szenario aufgeschlüsselt nach Segmenten



Das Pluralismus-Szenario prognostiziert für das Jahr 2050 einen Gesamtkupferverbrauch von 56,83 Millionen Tonnen. Die Sekundärkupfermenge beträgt im gleichen Jahr 14,15 Millionen Tonnen. Dies entspricht einer Sekundäreinsatzquote von 24,9 %. Die graphische Veranschaulichung zeigt Abbildung 6-3. Im Gegensatz zum Lithium-Modell weisen die beiden Szenarien für den Kupferverbrauch nicht so große Unterschiede auf. Dies liegt vor allem daran, dass das Pkw-Segment nicht der Haupttreiber der Nachfrage nach Kupfer ist, sondern das Segment Energieübertragung. Die Aufteilung des Verbrauchs auf die einzelnen Segmente im Pluralismus-Szenario ist aus Abbildung 6-4 ersichtlich.

Abbildung 6-3: Gesamtkupferverbrauch Pluralismus-Szenario bis 2050

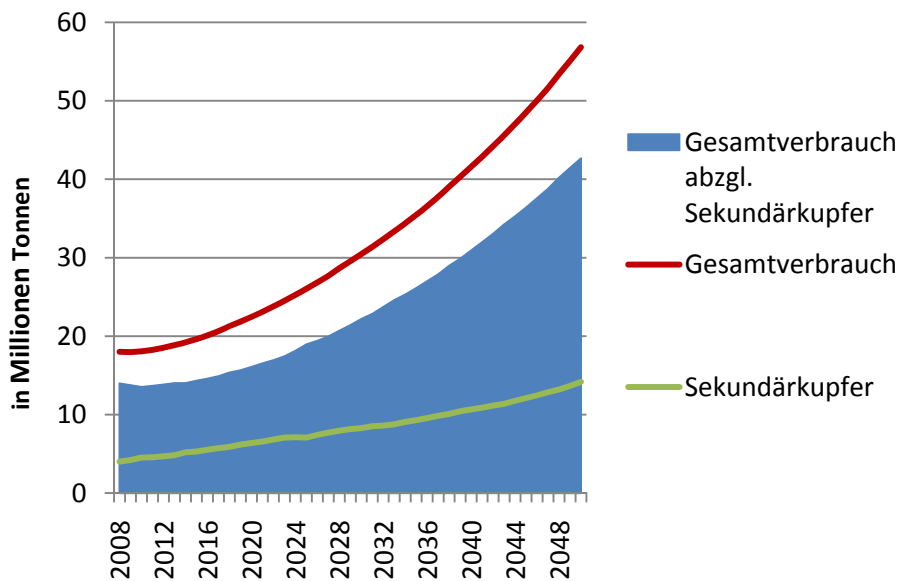
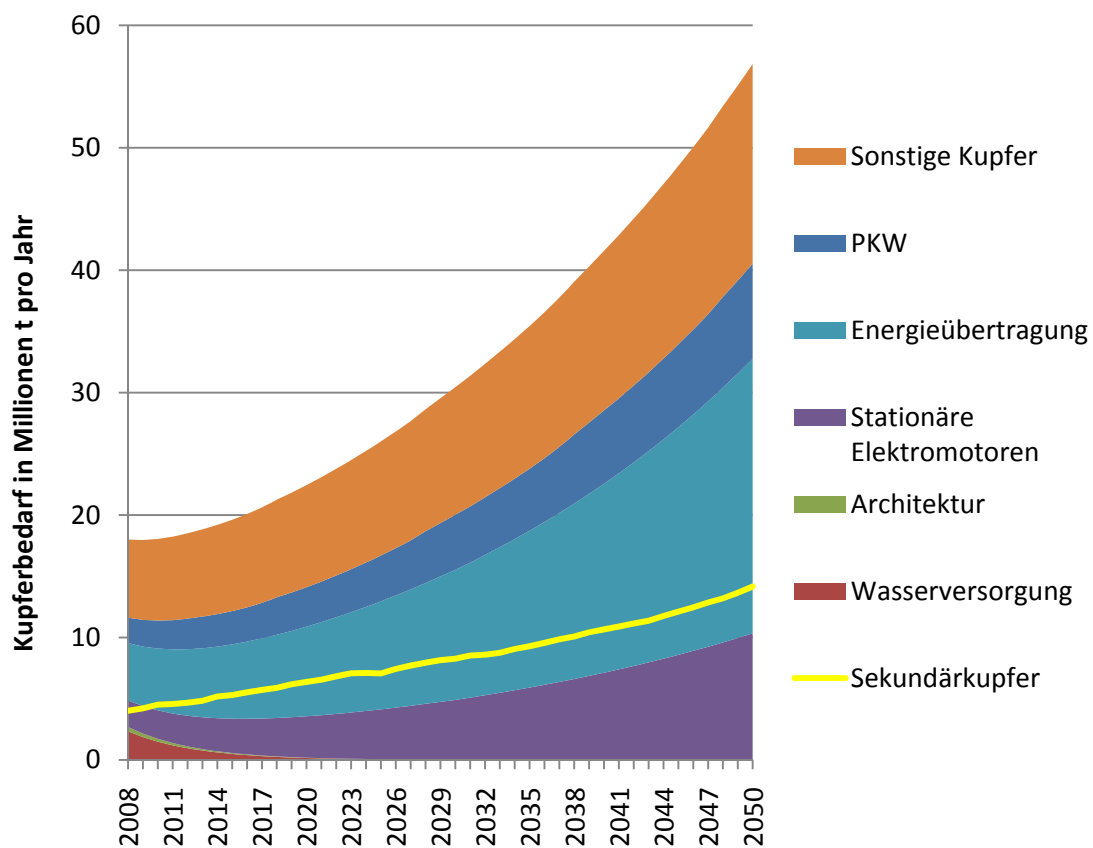


Abbildung 6-4: Kupferverbrauch Pluralismus-Szenario aufgeschlüsselt nach Segmenten



Die Ergebnisse für die Jahre 2010, 2025 und 2050 sind zur Vergleichbarkeit zwischen Dominanz- und Pluralismus-Szenario in Tabelle 6-1 dargestellt.

Tabelle 6-1: Vergleich Ergebnisse Dominanz-Szenario und Pluralismus-Szenario

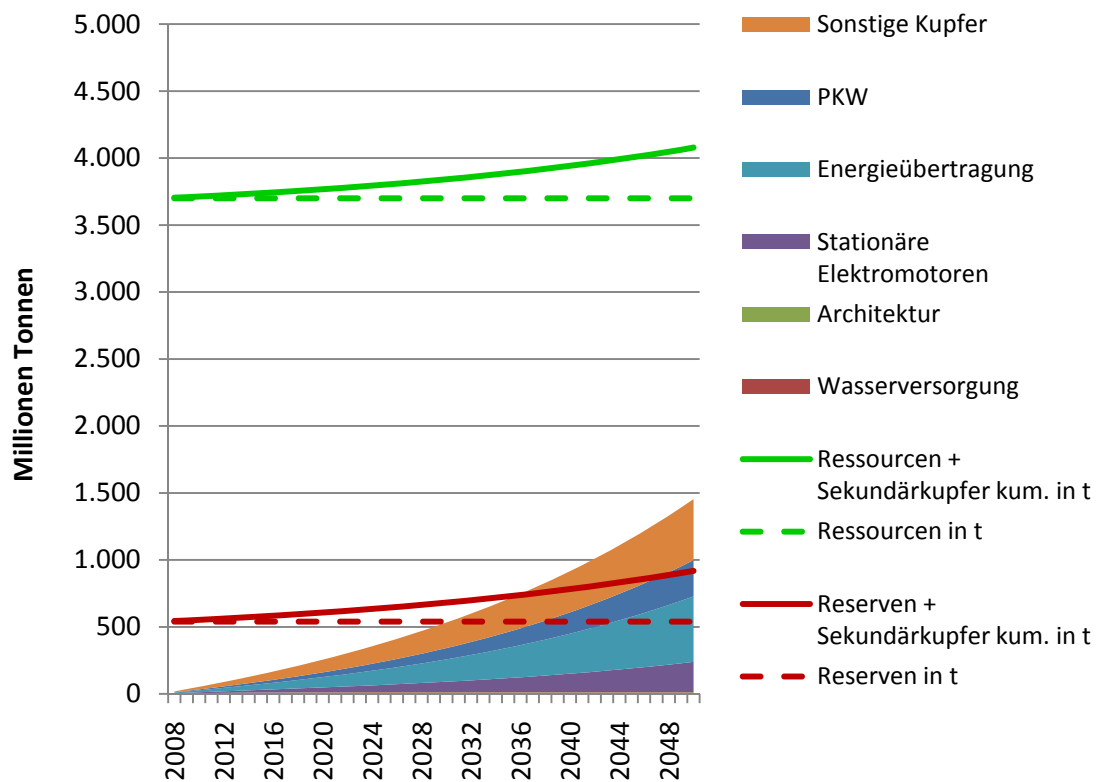
Jahr	2010	2025	2050
Kupferverbrauch Dominanz in Mio. t	18,49	26,73	62,38
Kupferverbrauch Pluralismus in Mio. t	18,51	25,95	56,83

## 6.2 Kupferverbrauch und Angebot

Von 2008 bis 2050 ergibt sich beim Rohstoff Kupfer nach den Modellberechnungen eine Nachfragesteigerung um den Faktor 3,5 im Dominanz-Szenario und eine Nachfragesteigerung um den Faktor 3 im Pluralismus-Szenario. Die entscheidende Frage ist, ob die Reserven und Ressourcen ausreichen, um diese Nachfrage zu decken. Hierzu wird der Kupferverbrauch von 2008 bis ins Jahr 2050 kumuliert und mit den Ressourcen und Reserven verglichen. Zwischen 2008 und 2050 werden im Dominanz-Szenario insgesamt 1,46 Milliarden Tonnen Kupfer verbraucht und im Pluralismus-Szenario 1,38 Milliarden Tonnen. Das durch Recycling zurückgewonnene Sekundärkupfer schont die geologischen Vorkommen und wird in der Berechnung berücksichtigt. Zwischen 2008 und 2050 kumuliert werden im Dominanzszenarium 378 Mio. t Sekundärkupfer gewonnen und im Pluralismusszenarium 359 Mio. t. Die weltweiten Kupferreserven im Jahr 2008 betragen laut USGS auf 540 Milliarden Tonnen. Die Ressourcen werden von der gleichen Quelle in 2008 auf 3,7 Milliarden Tonnen inklusive Kupfer in Tiefseemanganknollen geschätzt (USGS, 2010) (vgl. Kapitel 2). Abbildung 6-5 zeigt die Entwicklung des kumulierten Kupferverbrauchs im Dominanz-Szenario. Ein Vergleich mit den *Reserven* zeigt, dass diese ohne die Gewinnung von Sekundärkupfer 2030 vollständig verbraucht sein würden. Das Kupferrecycling zögert diesen Zeitpunkt um ca. fünf bis sechs Jahre hinaus. *Kupferressourcen* dagegen sind ausreichend vorhanden: Im Jahre 2050 wird der im Dominanzszenarium zugrunde Bedarfsentwicklung 29 % der 2008 bekannten Ressourcen aufgebracht haben.

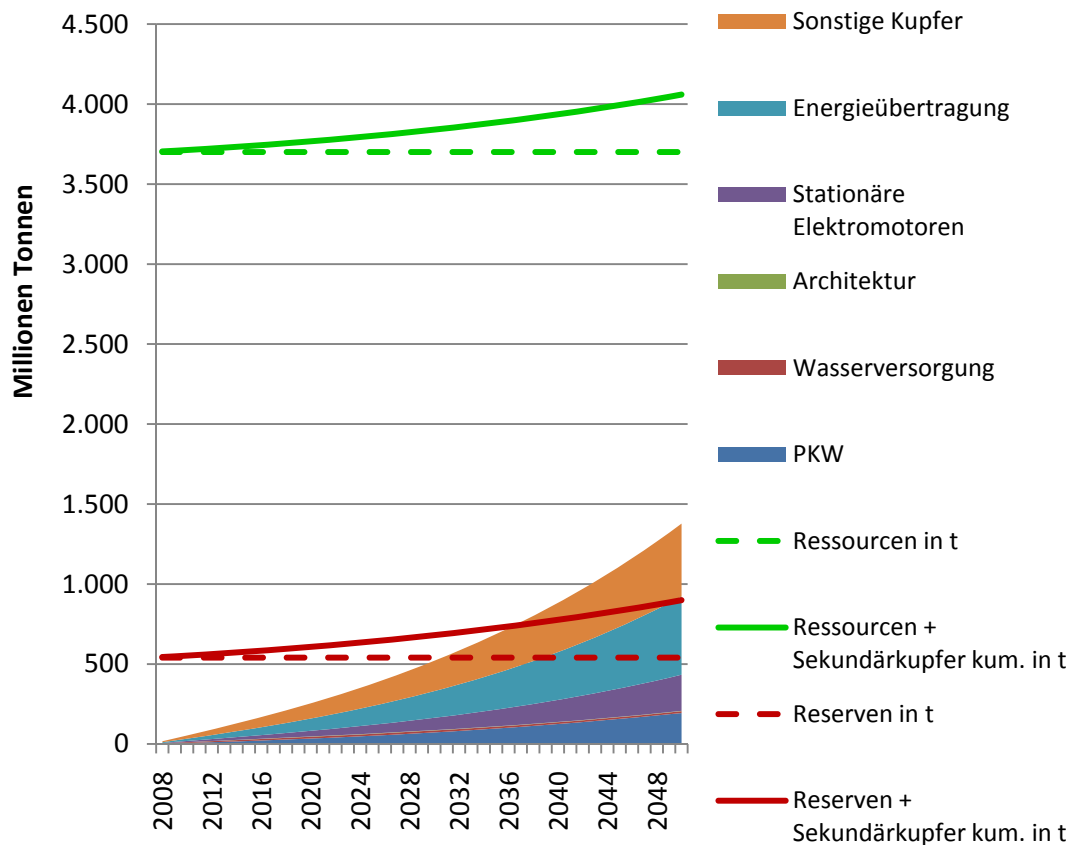


Abbildung 6-5: Dominanz-Szenario Vergleich Kupferverbrauch kumuliert und Ressourcen + Reserven



Auch das Pluralismus-Szenario liefert ein ähnliches Bild (vgl. Abbildung 6-6) wie das Dominanz-Szenario, weil sich der Kupferbedarf beider Szenarien nur wenig unterscheidet. Auch in diesem Szenario werden Anfang der 2030er Jahre die Reserven aufgebraucht sein. Der kumulierte Verbrauch beansprucht bis 2050 27,5 % der 2008 bekannten Ressourcen.

Abbildung 6-6: Pluralismus-Szenario Vergleich Kupferverbrauch kumuliert und Ressourcen + Reserven



### 6.3 Vergleich mit langfristigen Prognosen anderer Forschungseinrichtungen

Im Rahmen eines Projektes des International Institute for Environment and Development (IIED) wurde ein Modell des Kupferkreislaufs von der Förderung bis hin zum Recycling bzw. zur Endlagerung entwickelt. Dabei werden sechs Prozesse und acht Bestände modelliert. Der Zeitraum des Modells reicht von 1900 bis 2100. Es werden dabei acht unterschiedliche Szenarien gerechnet, denen unterschiedliche Annahmen zum Wirtschaftswachstum, der Nutzungsintensitäts-Kurve und der Recyclingeffizienz zugrunde liegen (Ayres, Ayres, & Rade, 2002). Die Ergebnisse für den Verbrauch von Raffinade-Kupfer weltweit im Jahre 2010, 2025, 2050 ist aus Tabelle 6-2 ersichtlich. Zur Vergleichbarkeit befinden sich auch die Ergebnisse aus dem ISI-Kupfermodell in der Tabelle. Für die Jahre 2010 und 2025 liegen die Ergebnisse unter denen des Glo-

balmodells des IIED. Für das Jahr 2050 liegen die Ergebnisse des ISI-Modells in der Mitte der verschiedenen Szenarien des IIED-Modells.

Tabelle 6-2: Szenario-Ergebnisse des weltweiten Raffinade-Kupferverbrauchs aus dem Globalmodell des IIED und des ISI-Kupfermodells in t

Szenario	2010	2025	2050
ConSc1	22.232.000	35.061.000	60.230.000
ConSc2	20.794.000	36.510.000	66.520.000
ConSc3	21.574.000	32.770.000	52.879.000
ConSc4	20.178.000	34.124.000	58.401.000
ISI Dominanz	18.494.295	26.735.027	62.387.961
ISI Pluralismus	18.517.479	25.950.817	56.839.986

Quelle: verändert nach Ayres, Ayres, & Rade (2002)

## 7 Fazit und Ausblick

Die Kupfernachfrage wird durch die Entwicklung der Elektromobilität nur wenig beeinflusst. Selbst wenn man ein starkes Wachstum an Elektrofahrzeugen unterstellt, beansprucht dieser Sektor im Jahre 2050 nicht mehr als 21 % der Kupfernachfrage. Bei moderateren Wachstumsannahmen sogar nur 14 %. Andere Kupferapplikationen, darunter die Energieübertragung und Elektromotoren, dominieren die Bedarfsentwicklung.

Die Analysen der Kupfernachfrageentwicklung über alle Nachfragesektoren zeigen, dass die geologischen Vorräte an Kupfer ausreichend sind, die Nachfrage zu decken. Auch sind die Vorkommen auf verschiedene Länder verteilt, was das geopolitische Risiko begrenzt. Deshalb wird das Kupfervorkommen den Ausbau der Elektromobilität und die Entwicklung der Weltwirtschaft auf absehbare Zeit nicht behindern. Im Jahre 2050 werden nur 39 % der Ressourcen verbraucht sein. Anders als für Rohstoffspezialitäten wie beispielsweise Lithium nimmt der Kupferbedarf unter den getroffenen Annahmen im gleichen Zeitraum um das 3,5-Fache vergleichsweise moderat zu.

Die heute wirtschaftlich ausbeutbaren Kupferreserven werden Mitte der 30er Jahre des 21. Jahrhunderts erschöpft sein. Die Reserven sind jener Teil der Ressourcen, die mit der gegenwärtig verfügbaren Technik wirtschaftlich abgebaut werden können. Zur Deckung des Bedarfs müssen deshalb neue Ressourcen erschlossen werden, deren Ausbeutung höhere Kosten verursacht. Dies wird nicht ohne Auswirkungen auf den

Kupferpreis bleiben. Die Lead time für die Erschließung neuer Minen beträgt etwa 10 Jahre. Es entsteht also Bedarf, in den kommenden 10 bis 15 Jahren mit der Prospektion und Erschließung neuer Lagerstätten zu beginnen. Dies ist entscheidend für eine störungsfreie Kupferversorgung der Weltwirtschaft zu angemessenen Preisen.

Es gibt eine Reihe von Möglichkeiten, das Angebot an Kupfer in Zukunft auszubauen und die geologischen Vorkommen zu schonen. Die wichtigste Möglichkeit liegt im Ausbau des weltweiten Recyclings und der Erhöhung der Sekundärkupfermenge. Während einige Länder der Welt ein gut ausgebautes Recyclingsystem aufweisen können, fehlt dies in anderen Ländern (Lucas, Röhr, Scharp, & Bleischwitz, 2007). Dies spiegelt sich in der niedrigen weltweiten Sekundäreinsatzquote wider (vgl. Kapitel 2). Nach der hier durchgeführten Berechnung beträgt 2050 im Dominanz-Szenario die weltweite Sekundäreinsatzquote 25 %. Dies ist zwar eine Steigerung gegenüber 13 %, die von Enghag (2004) genannt wird, aber es besteht noch ein erhebliches Ausbaupotential, wenn man dies mit der Quote von 56,4 % in Deutschland vergleicht (WVM, 2009). Der Know-how-Transfer von den Industrieländern zu den Schwellenländern kann das Recycling unterstützen (Lucas, Röhr, Scharp, & Bleischwitz, 2007).

Eine weitere Möglichkeit das Angebot an Kupfer zu erhöhen, liegt in der bergmännischen Erschließung der Materiallager, die sich im Laufe der Zeit weltweit in Deponien und Umwelt angesammelt haben. Sie werden auf über 400 Millionen Tonnen Kupfer geschätzt (Tabelle 2-3). Das ist mehr als das 20-Fache der heutigen Weltproduktion. Ihre Ausbeutung wird als Urban Mining bezeichnet. Es ist eine noch offene Frage, ab welchem Kupferpreis die Nutzung dieses Rohstoffinventars wirtschaftlich wird (Mocker, Löh, Franke, Stenzel, & Faulstich, 2009).

Eine weitere Möglichkeit, auf Versorgungsstörungen zu reagieren, ist die Substitution von Kupfer durch andere Rohstoffe. So könnte Kupfer in elektrischen Anwendungen, beispielsweise in Elektromotoren und Kabel, durch Aluminium ersetzt werden, was allerdings mit einer gravierenden Verschlechterung der Energieeffizienz verbunden ist. In der Telekommunikation bietet sich als Substitut für Datenleitungen das Glasfaserkabel oder die drahtlose Übertragung an. In der Wasserversorgung kann Kupfer durch Kunststoff- oder verzinkte Stahlrohre, in Wärmetauschern je nach Anwendung durch Edelstahl, Titan oder Aluminium ersetzt werden (BGS, 2007).

Die hier vorgelegten Ergebnisse stützen die Einschätzung der Europäischen Kommission in der jüngst veröffentlichten Studie "Critical raw materials for the EU", nach der Kupfer nicht als kritischer Rohstoff einzustufen ist (European Commission Enterprise and Industry, 2010). Als kritisch werden danach Rohstoffe klassifiziert, die zugleich eine hohe wirtschaftliche Bedeutung für die Sektoren der Volkswirtschaft haben, bei

denen erhebliche Versorgungsrisiken vorhanden sind und die in zentralen Applikationen nicht oder nur schwer substituiert werden können.

Im Rahmen des Forschungsprojektes *Fraunhofer Systemforschung Elektromobilität* werden demnächst weitere wichtige Rohstoffe für die Elektromobilität wie Neodym für den Einsatz bei Magneten in Elektromotoren analysiert. Im Rahmen des Forschungsprojektes *Innovationsallianz - Lithium-Ionen-Batterie (LIB2015)* werden kritische Rohstoffe für die Batterien wie Kobalt und Mangan näher betrachtet.

## 8 Literaturverzeichnis

- Angerer, G., Erdmann, L., Marscheider-Weidemann, F., Scharp, M., Lüllmann, A., Handke, V., et al. (2009). *Rohstoffe für Zukunftstechnologien*. Stuttgart: Fraunhofer Verlag.
- Angerer, G., Marscheider-Weidemann, F., Wendl, M., & Wietschel, M. (2009). *Lithium für Zukunftstechnologien*. Karlsruhe: Fraunhofer ISI.
- Ayres, R. U., Ayres, L. W., & Rade, I. (2002). *The Life Cycle of Copper, its Co-Products and By-Products*. Fontainebleau Cedex: International Institute for Environment and Development.
- BERR. (2008). *Material Security- Ensuring resource availability for the UK economy*. Chester, UK: Department for Business Enterprise & Regulatory Reform.
- BGS . (2010). *World Mineral Production 2004-08*. Nottingham, UK: British Geological Survey.
- BGS. (2007). *Commodity Profile - Copper*. British Geological Survey .
- Bosch. (2010). *Systemkomponenten Hybrid-Fahrzeug E-Maschine*. Abgerufen am April 2010 von Website der Robert Bosch GmbH: [http://www.bosch-kraftfahrzeugtechnik.de/de/antriebssysteme/hybridantrieb\\_2/emaschine\\_11/emaschine.asp](http://www.bosch-kraftfahrzeugtechnik.de/de/antriebssysteme/hybridantrieb_2/emaschine_11/emaschine.asp)
- Comisión Chilena del Cobre (Cochilco). (2008). *Anuario Estadísticas del cobre y Otros Minerales 1989-2008*. Abgerufen am 26. Mai 2010 von Website von Cochilco: <http://www.cochilco.cl/productos/anuario.asp>
- DGSD. (2010). *Home*. Abgerufen am 4. Juni 2010 von Homepage der Deutschen Gesellschaft für System Dynamics: [http://134.169.76.130/dgssystemdynamics/index.php?option=com\\_frontpage&Itemid=1](http://134.169.76.130/dgssystemdynamics/index.php?option=com_frontpage&Itemid=1)
- DKI. (2010). *Vorwärts kommen sie nur mit Kupfer*. Düsseldorf: Deutsches Kupferinstitut.
- Enhag, P. (2004). *Encyclopedia of the Elements*. Weinheim : Wiley-VCH Verlag.
- European Commission Enterprise and Industry. (Juni 2010). *Critical raw materials for the EU - Report of the Ad-hoc Working Group on defining critical raw materials*. Abgerufen am 30. Juni 2010 von Website der European Commission Enterprise and Industry: [http://ec.europa.eu/enterprise/policies/raw-materials/critical/index\\_de.htm](http://ec.europa.eu/enterprise/policies/raw-materials/critical/index_de.htm)

- 
- Fahrmeir, L., Künstler, R., Pigeot, I., & Tutz, G. (2004). *Statistik*. Berlin: Springer Verlag.
- Gordon, R. (31. Januar 2006). Metal stocks and sustainability. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA (PNAS)*, 103 (5), S. 1209-1214.
- Hagelücken, C. (5. Februar 2009). *Rohstoff- und Umweltrelevanz de Eschrott-Recyclings*. Abgerufen am 21. Juni 2010 von Website von Umicore Precious Metal Refining: <http://www.preciousmetals.umicore.com/publications/publications.html#ABU>
- ICA. (2007). *Roadmap Technologie der Kupferanwendungen*. New York, USA: International Copper Association, Ltd.
- ICSG. (2008). *Definitions*. Abgerufen am 21. Juni 2010 von Website der International Copper Study Group: [http://www.icsg.org/index.php?option=com\\_content&task=view&id=23&Itemid=64](http://www.icsg.org/index.php?option=com_content&task=view&id=23&Itemid=64)
- ICSG. (2004). *End-of-Life Vehicles (ELV)*. Lissabon: International Copper Study Group.
- ICSG. (10. Mai 2009). *The World Copper Factbook*. Abgerufen am 10. Mai 2010 von Website der International Copper Study Group: [http://www.icsg.org/index.php?option=com\\_frontpage&Itemid=1](http://www.icsg.org/index.php?option=com_frontpage&Itemid=1)
- IMF. (Oktober 2007). *World Economic Outlook Database October 2007*. Abgerufen am 2. Juni 2010 von International Monetary Fund: <http://www.imf.org/external/ns/cs.aspx?id=28>
- IMF. (September 2006). *World Economic Outlook Database September 2006*. Abgerufen am 2. Juni 2010 von International Monetary Fund: <http://www.imf.org/external/ns/cs.aspx?id=28>
- International Copper Study Group. (2009). *Statistical Yearbook 1999-2008*. Lissabon: International Copper Study Group.
- IZT. (2004). *Nachhaltige Bestandsbewirtschaftung nicht erneuerbarer knapper Ressourcen*. Berlin: Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung.
- Kapur, A., & Gradel, T. (15. Mai 2006). Copper Mines Above and Below the Ground. *Environmental Science & Technology*, S. 3135-3141.
- Kiessling, O. E. (1933). *Minerals yearbook 1932-33 Copper*. Washington: United States Government Printing Office.
- Liedtke, M., & Elsner, H. (2009). *Commodity Top News 31 - Seltene Erden*. Hannover: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe.

- 
- Lossin, A. (2005). *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry Copper*. Von Website Wiley Interscience: <http://mrw.interscience.wiley.com/emrw/9783527306732/home/> abgerufen
- Lucas, R., Röhr, A., Scharp, M., & Bleischwitz, R. (2007). *Das Rohstoffstoffsystem Kupfer - Status Quo, Perspektiven, und Handlungsbedarf aus Sicht einer nachhaltigen Ressourcenpolitik*. Wuppertal: Wuppertaler Institut für Klima, Umwelt und Energie GmbH.
- MACCON GmbH. (2010). *SR-Motoren*. Abgerufen am April 2010 von Website von Maccon: <http://www.maccon.de/?id=91>
- Metallgesellschaft AG. (1967). *Metallstatistik 1957 - 1966* (Bd. 54). Frankfurt am Main: Metallgesellschaft AG.
- Metallgesellschaft AG. (1975). *Metallstatistik 1964 - 1974* (Bd. 62). Frankfurt am Main: Metallgesellschaft AG.
- Metallgesellschaft AG. (1986). *Metallstatistik 1975 - 1985* (Bd. 73). Frankfurt am Main: Metallgesellschaft AG.
- Metallgesellschaft AG. (1987). *Metallstatistik 1976 - 1986* (Bd. 74). Frankfurt am Main: Metallgesellschaft AG.
- Metallgesellschaft AG. (1992). *Metallstatistik 1981 - 1991* (Bd. 79). Frankfurt am Main: Metallgesellschaft AG.
- Metallgesellschaft. (1953). *Statistische Zusammenstellungen über Aluminium, Blei, Kupfer, Zink, Zinn, Kadmium, Magnesium, Nickel, Quecksilber und Silber* (Bd. 41). Frankfurt am Main: Metallgesellschaft.
- Metallgesellschaft. (1959). *Statistische Zusammenstellungen über Aluminium, Blei, Kupfer, Zink, Zinn, Kadmium, Magnesium, Nickel, Quecksilber und Silber* (Bd. 46). Frankfurt am Main: Metallgesellschaft.
- Mocker, M., Löh, I., Franke, M., Stenzel, F., & Faulstich, M. (2009). Urban Mining - Rohstoffe der Zukunft. In M. Faulstich, & M. Mocker, *Verfahren und Werkstoffe für die Energietechnik: Biomasse & Abfall- Emissionen mindern und Rückstände nutzen* (S. 184-195). ATZ Entwicklungszentrum Sulzbach-Rosenberg: Verlag Dorner Print.
- Rombach, G. (2003). *Grenzen des Recycling*. Aachen: Shaker Verlag.



- UBA. (2005). *Einträge von Kupfer, Zink und Blei in Gewässer und Böden 19/05*. Berlin : Umweltbundesamt.
- USGS. (2010). *Mineral Commodity Summaries*. Reston,VA, USA: United States Geological Survey.
- USGS. (2009). *Minerals Yearbook 2007*. Reston, VA, USA: United States Geological Survey.
- Vest, M., Weyhe, R., & Friedrich, B. (2010). LIB2015- Entwicklung eines Recycling-konzepts für Li-Ionen basierte Automobil-Batterien. *Symposium Rohstoffeffizienz und Rohstoffinnovationen 04./05.02.2010*. Ettlingen: IME Metallurgische Prozesstechnik und Metallrecycling RWTH Aachen.
- WBCSD. (2004). *Mobilität 2030: Die Herausforderungen der Nachhaltigkeit meistern*. Genf: World Business Council for Sustainable Development.
- Wietschel, M., & Dallinger, D. (2008). Quo vadis Elektromobilität? *Energie-wirtschaftliche Tagesfragen* , S. 8-15.
- World Bureau of Metal Statistics. (2002). *Metallstatistik 1991 - 2002* (Bd. 89). Ware Hertfordshire: World Bureau of Metal Statistics.
- World Bureau of Metal Statistics. (2006). *Metallstatistik 1995 - 2005* (Bd. 93). Ware Hertfordshire: World Bureau of Metal Statistics.
- WVM. (2009). *Metallstatistik 2008*. Berlin: Wirtschaftsvereinigung Metalle.

## A.1 Anhang

Tabelle 8-1: Entwicklung des Verbrauchs von Raffinade-Kupfer von 1928 bis 2008

Jahr	1928	1929	1930	1931	1932	1933	1934	1935	1936
Verbrauch Raffinade-Kupfer <sup>5</sup>	1.400.000	1.500.000	1.875.000	1.460.000	1.400.000	1.150.000	1.160.000	1.170.000	1.875.000
Jahr	1937	1938	1939	1940	1941	1942	1943	1944	1945
Verbrauch Raffinade-Kupfer <sup>6</sup>	1.900.000	2.230.400	2.529.200	2.711.100	3.159.700	3.066.500	3.139.800	2.792.300	2.382.800
Jahr	1946	1947	1948	1949	1950	1951	1952	1953	1954
Verbrauch Raffinade-Kupfer	2.414.300	2.707.200	2.828.500	2.614.500	3.117.600	3.269.000	3.301.800	3.144.500	3.365.500
Jahr	1955	1956	1957	1958	1959	1960	1961	1962	1963
Verbrauch Raffinade-Kupfer	3.764.700	3.888.300	3.901.300	3.975.600	4.376.300	4.755.800	5.069.100	5.154.800	5.432.400
Jahr	1964	1965	1966	1967	1968	1969	1970	1971	1972
Verbrauch Raffinade-Kupfer	5.920.500	6.119.700	6.415.300	6.194.800	6.523.300	7.148.000	7.283.400	7.309.900	7.944.500
Jahr	1973	1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981
Verbrauch Raffinade-Kupfer	8.791.600	8.325.400	7.444.200	8.522.100	9.047.400	9.524.600	9.825.500	9.364.300	9.750.300

<sup>5</sup> Daten für Jahre 1928 bis 1937 geschätzt bzw. abgelesen aus Diagramm (ICSG, 2009).

<sup>6</sup> Daten für Jahre 1937 - 2005 aus (Metallgesellschaft, 1953), (Metallgesellschaft, 1959), (Metallgesellschaft AG, 1967), (Metallgesellschaft AG, 1975), (Metallgesellschaft AG, 1986) (Metallgesellschaft AG, 1987), (World Bureau of Metal Statistics, 2002), (World Bureau of Metal Statistics, 2006).

---

Jahr	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990
Verbrauch Raffinade-Kupfer	9.118.600	9.309.600	9.854.400	9.858.000	10.082.800	10.421.100	10.548.600	11.032.400	10.824.700

Jahr	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999
Verbrauch Raffinade-Kupfer	10.754.600	10.791.000	10.978.600	11.665.700	12.152.700	12.398.900	13.024.800	13.348.000	14.033.900

Jahr	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008
Verbrauch Raffinade-Kupfer <sup>7, 8</sup>	15.176.600	14.886.500	15.038.000	15.305.300	16.641.200	16.699.200	17.043.000	18.168.000	18.024.200

---

<sup>7</sup> Daten für Jahre 2006-2007 aus ICSG (2009).

<sup>8</sup> Daten für Jahr 2008 aus Comisión Chilena del Cobre (Cochilco) (2008).

Tabelle 8-2: Entwicklung Wachstumsrate Weltwirtschaft und Wachstumsrate Raffinade-Kupfer Verbrauch

Jahr	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987
Wachstumsrate Weltwirtschaft in % <sup>9</sup>	2,2	2,2	1,2	3,1	4,8	3,8	3,7	3,9
Wachstumsrate Verbrauch Raffinade-Kupfer in % <sup>10</sup>	-4,6939	4,1220	-6,4788	2,0946	5,8520	0,0365	2,2804	3,3552

Jahr	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995
Wachstumsrate Weltwirtschaft in %	4,8	3,8	3	1,7	2,4	2,5	3,9	3,7
Wachstumsrate Verbrauch Raffinade-Kupfer in %	1,2235	4,5864	-1,8826	-0,6476	0,3385	1,7385	6,2585	4,1746

Jahr	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003
Wachstumsrate Weltwirtschaft in %	4,1	4,2	2,8	3,8	4,8	2,5	3,1	4
Wachstumsrate Verbrauch Raffinade-Kupfer in %	2,0259	5,0480	2,4814	5,1386	8,1424	-1,9115	1,0177	1,7775

Jahr	2004	2005	2006	2007	2008
Wachstumsrate Weltwirtschaft in %	5,3	4,8	5,4	5,2	4,8
Wachstumsrate Verbrauch Raffinade-Kupfer in %	8,7283	0,3485	2,0588	6,6010	-0,7915

<sup>9</sup> Daten für Jahre 1980-1998 (IMF, 2006), Daten ab 1998 (IMF, 2007).

<sup>10</sup> Berechnet aus Daten (Metallgesellschaft AG, 1987), (Metallgesellschaft AG, 1992), (World Bureau of Metal Statistics, 2002), (World Bureau of Metal Statistics, 2006).