

Diss. ETH Nr. 16'325

Kupfer im regionalen Ressourcenhaushalt

Ein methodischer Beitrag zur Exploration
urbaner Lagerstätten

Abhandlung

zur Erlangung des Titels

Doktor der technischen Wissenschaften

der

Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich

vorgelegt von

Dominic Marcus Alexander Günter Wittmer

Dipl.-Geol., Johannes Gutenberg-Universität Mainz

geboren am 18. August 1972

aus Deutschland

angenommen auf Antrag von

Prof. Dr. Hans-Rudolf Schalcher, Referent

Prof. Dr. Peter Baccini, Korreferent (Leiter der Dissertation)

Dr. Thomas Lichtensteiger, Korreferent

Prof. Dr. Niklaus Kohler, Korreferent

Zürich, 2006

ETH

Eidgenössische Technische Hochschule Zürich

Swiss Federal Institute of Technology Zurich

eawag
aquatic research 

vdf

vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich

Kupfer im regionalen Ressourcenhaushalt. Ein methodischer Beitrag zur Exploration urbaner Lagerstätten. Wittmer, Dominic (2006): Dissertation im Studiengang Umweltingenieurwissenschaften, Departement Bau, Umwelt und Geomatik (D-BAUG) an der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich. Diss. ETH Nr. 16'325.

Diese Dissertation entstand im Rahmen des interdisziplinären Projektes „ARK04 – Gebäude im Umbau urbaner Kulturlandschaften“ an der Professur für Stoffhaushalt und Entsorgungstechnik, ETH Zürich, sowie am gleichnamigen Forschungsbereich der Eawag. Das Projekt ARK04 beschäftigt sich hinsichtlich einer nachhaltigen Entwicklung auf regionaler Ebene mit den Umbauprozessen der gebauten Umwelt in künftige Siedlungsvarianten. Dabei wird eine verallgemeinerbare Methode erarbeitet, die so genannte ARK-Haus-Methode, mit Hilfe derer die bestehenden Bauwerke als künftige Ressourcenspender evaluiert werden können. Die Projektergebnisse sind unter dem Titel „Bauwerke als Ressourcennutzer und Ressourcenspender“ beim vdf Hochschulverlag publiziert (LICHTENSTEIGER (Ed.) 2006). Am Beispiel von Kupfer wird in der Dissertation das methodische Vorgehen für „Spurenstoffe“ ausführlich entwickelt und diskutiert. Der vorliegende Band ist somit eine Vertiefung der oben genannten vdf-Publikation.

Anschrift des Verfassers: dominic.wittmer@web.de

Titelbild: Rohstoff Kupferschrott. Das abgebildete Altkupfer stammt aus Immobilien und Mobilien: Elektrokabel, Roharmaturen, Bleche, Kühler, Rohre und andere kupferne bzw. kupferhaltige Produkte.

© 2005 vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich

ISBN 13: 978-3-7281-3047-1

ISBN 10: 3-7281-3047-8

Das Werk einschliesslich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung ausserhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Das gilt besonders für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

„Wer in der Zukunft lesen will,
muss in der Vergangenheit blättern“
André Malraux

Für meine Eltern

Dank

Diese Arbeit ist nur möglich gewesen mit der ausdauernden Unterstützung meiner Familie. Es waren meine Eltern, mit deren Hilfe ich überhaupt nach Zürich kommen und später den eingeschlagenen Weg begehen konnte: Dafür danke ich. Besonders bedeutend waren auch das grosse Verständnis und der Beistand, die meine Freundin Lina mir stets entgegenbrachte.

Während der gesamten Dauer der Dissertation wurde ich von Dr. Thomas Lichtensteiger, Initiant und Betreuer meiner Arbeit, mit wissenschaftlichem Rat in seiner herzlichen Art begleitet und mit frischen Ideen sowie grossen und kleinen Inputs unterstützt. Für die Leitung der Arbeit möchte ich Prof. Peter Baccini meinen Dank aussprechen, ebenso für den mir gewährten Freiraum – sowohl bei den Forschungsinhalten als auch der Projektorganisation. In entscheidenden Phasen markierte er die „Leitplanken“, die dem Dissertationsprojekt den gewünschten Verlauf gaben. Prof. Kohler danke ich für die wertvolle Kritik zur Prüfungsfassung und sein Korreferat, Prof. Schalcher für die Übernahme des Referates.

Für die dynamische Modellierung des Kupferhaushaltes konnte ich dank der intensiven Zusammenarbeit mit Dr. Hans-Peter Bader und Ruth Scheidegger eine leistungsfähige Modelliersoftware einsetzen (SIMBOX) und zugleich von ihren langjährigen Modellierungskenntnissen lernen. Bei der Datenbeschaffung unterstützte mich Georg Henseler. Es war zudem hilfreich, seinesgleichen in der Forschungsgruppe zu wissen: Meine Mitstreitenden Franziska Pfister, Florian Hug und Nikola Patzel ermöglichten einen fachlichen Ausgleich durch gemeinsame Lehrtätigkeiten und freundschaftliche Ratschläge.

Die Arbeit erhielt ihre jetzige Fassung durch diverse Phasen des Korrekturlesens, wobei mich Franziska Pfister, Christina Seyler und mein Bruder Frank unterstützten; den letzten Schliff erhielt sie durch das gründliche Lektorat von Herrn Dr. B. Knappmann vom vdf Hochschulverlag.

Nicht zuletzt möchte ich den zahlreichen Interviewpartnern, Architekten und Handwerkern danken, denn nur durch ihre Mithilfe waren die notwendigen Daten zu gewinnen. Die wichtigsten von Ihnen sind im Text zitiert. Für sie alle bedeutete die Erteilung der Auskünfte und die Bereitstellung der Daten eine unvergütete Mehrarbeit.

Allen, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben, möchte ich freundlich danken!



Zürich, im Frühling 2006

Zusammenfassung

Bisher sind die geogenen Lagerstätten in den Geowissenschaften systematisch untersucht worden, nicht aber die anthropogenen Lagerstätten. Letztere befinden sich im Wachstum, solange die Inputflüsse die Outputflüsse übersteigen. Es fehlen bis heute geeignete Werkzeuge, die eine umfassende Erfassung und Beurteilung dieser Lagerstätten ermöglichen. Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Entwicklung einer Methode zur Exploration von nicht-regenerierbaren Ressourcen im urbanen Raum am Beispiel des Kupfers, basierend auf umweltingenieur- und geowissenschaftlichen Ansätzen. Kupfer ist wegen seines starken technischen Profils ein essentielles Metall im Stoffhaushalt der Anthroposphäre. Es wird in zahlreichen Anwendungen in Gebäuden (Aussenbereich, Haustechnik), in der Infrastruktur (Strom- und Informationsübertragung) sowie in elektrischen und elektronischen Produkten und weiteren Mobilien in reiner Form oder in Legierungen eingesetzt. In der Schweiz sind die resultierenden urbanen Lagerstätten pro Kopf bereits grösser als die weltweit vorhandenen geogenen Lagerstätten. Hier setzt diese Arbeit an.

Für die Exploration im urbanen Raum wird die Methode der Stoffflussanalyse (BACCINI und BADER 1996) mit einer eigenständig entwickelten, geowissenschaftlich geprägten Methode zur Lagererfassung kombiniert. Dadurch ist eine differenziertere Betrachtung der Lagerstättenmengen und -qualitäten möglich.

Der Betrachtungsraum ist die Schweiz. Die urbanen Kupferlagerstätten werden in den drei Hauptlagern Gebäude, Infrastruktur und Mobilien modular erfasst. Zur Untersuchung der Lager hinsichtlich ihres Aufbaus und ihrer Rollen im regionalen Kupferhaushalt bedarf es eines geeigneten Instrumentariums. Der erste Teil der Arbeit zielt auf die Erfassung der relevanten Güter aus Kupfer bzw. Kupferlegierungen oder mit gewissen Anteilen davon. Der zweite Teil verifiziert den Aufbau der zugehörigen Lager in einem dynamischen Modell und schafft die Basis für die Entwicklung von Bewirtschaftungsszenarien. Die Ergebnisse der beiden Teile sind folgende:

Teil I Zur differenzierten Erfassung der Lager werden die Schlüsselgrössen ermittelt und quantitativ bestimmt. Neben den Güter- bzw. Produktmengen (inkl. Häufigkeit und Korrelationsfaktoren) sind dies die Güter-Dimensionen (inkl. Kupferkonzentration). In der Regel sind die Produktmengen nicht bedarfsgerecht dokumentiert und müssen indirekt bestimmt werden. Der Aufbau des Hauptlagers in den Gebäuden wird wegen seiner heterogenen Zusammensetzung gegenüber den anderen Hauptlagern vertieft untersucht, eingebettet in das Projekt ARK04 der Forschungsabteilung Stoffhaushalt und Entsorgungstechnik der Eawag und der ETH Zürich: Ein Projekt, das die Sekundärlager der Massenrohstoffe in den Gebäuden der Schweiz analysiert. Zur Bestimmung der Güter-Häufigkeiten und -Dimensionen werden Erhebungen an Gebäuden durchgeführt. Zudem werden Studien der Bautechnik oder der Technikgeschichte interpretiert, um Modellgebäude, so genannte ARK-Häuser, zu kreieren. Jedes ARK-Haus repräsentiert einen der vier Teilbestände, in die der Gebäudebestand nach Nutzungstypen unterteilt wurde, und unterscheidet sich demnach in Summe und Verteilmuster der Materialgehalte signifikant von den anderen ARK-Häusern.

Diese Dissertation fokussiert auf die methodischen Besonderheiten, die es bei der Untersuchung von „Spurenstoffen“ wie Kupfer zu berücksichtigen gilt. Kupfer liegt unter 1 Gew.% der Gebäudemasse und gilt somit als Spurenstoff. Die kupferführenden Gebäudebauteile werden zur Ermittlung der Kupfergehalte in 5 Funktionsbereiche und 14 Produktgruppen geordnet. Die wichtigsten Funktionsbereiche sind der Dachbereich (40 %), die Stromanlagen (30 %), gefolgt von den Heizungs- und Sanitäranlagen. Die dominierenden Produktgruppen sind im Dachbereich die Dachrinnen und Dachgaupen, in den Heizungsanlagen sind es die Flächenheizungen und in den Sanitäranlagen die Roharmaturen. Die Eigenschaften des Lagers in der Infrastruktur werden durch die Starkstromkabel der Nieder- und Mittelspannung bestimmt, da sie über $\frac{2}{3}$ des Lagers ausmachen. Nach der Berech-

nung betragen die Kupferlager insgesamt in den Gebäuden 80 ± 15 kg/capita, in der Infrastruktur 105 ± 25 kg/capita, in den Mobilien 35 ± 10 kg/capita und in den Deponien 50 ± 10 kg/capita.

Die Unsicherheiten wurden nach der Monte-Carlo-Methode berechnet. Ausgehend von den heutigen Lagern wird der Aufbauprozess grob rekonstruiert (Zeitintervall 25 a bzw. 10 a).

Teil II Im zweiten Teil wird das dynamische Kupferhaushaltsmodell *Cuprum* entwickelt, das den Aufbau der sekundären Lagerstätte in der Schweiz für den Zeitraum 1900 bis 2000 nachzeichnet. Dazu werden die Kenntnisse über die Zusammensetzung der Hauptlager aus *Teil I* genutzt. Die Datenreihen werden durch Wachstumskurven gefittet, welche durch Kombination logistischer und linearer Funktionen gebildet werden. Mit diesem Vorgehen können die Wachstumskurven mit Hilfe der Kurvenparameter miteinander verglichen und diskutiert werden, wodurch ihre Bedeutung anschaulich wird. Als Ergebnis der dynamischen Modellierung erhält man die Entwicklung des Kupferhaushaltes der Schweiz im 20. Jahrhundert. Die berechneten Lager und Flüsse sind mit den ermittelten Unsicherheiten gekennzeichnet. Das Modell zum regionalen Kupferhaushalt wird mit Datenreihen zum historischen Aussenhandel validiert. Mit Hilfe von gebildeten Bewertungskriterien wird die Entwicklung des Systems beurteilt. Sie verdeutlichen, welche Ressourcenverluste und Umwelteinträge zu erwarten sind, wenn keine Korrekturmassnahmen ergriffen werden. Auch der Einfluss der Lebensdauer-Verlängerung oder -verkürzung der Güter bzw. Produkte wird diskutiert.

In zwei Szenarien wird untersucht, welche Auswirkungen ein mittelfristiger Umbau der Produktionsgebäude in Mehrfamilienhäuser bzw. Dienstleistungsgebäude hinsichtlich der Lagerentwicklung und der zugehörigen Kupfernachfrage oder Emissionen bewirkt. Die Arbeit zeigt exemplarisch auf, wie das dynamische Modell für solche „Wenn-dann“-Szenarien künftig eingesetzt werden kann: Wenn die Umnutzung zugunsten der Dienstleistungsgebäude verläuft, dann wird entsprechend der gebäude-spezifischen Nutzungsmuster des Kupfers ein Rohstoffmehrbedarf erzeugt. Wenn bei dem Umbauprozess bei den neuen Dienstleistungsgebäuden konsequent auf Kupferbleche verzichtet wird, dann sinken die Emissionen um circa 20 %, obwohl das gesamte Kupferlager in den Gebäuden (einschliesslich des Kupfers in der Haustechnik) eine leichte Zunahme bewirkt.

Abstract

Geogenic deposits have been investigated in detail by diverse geological research methods and mining experience. However, anthropogenic material deposits have not experienced such a systematic investigation yet, in spite of their ongoing growth. Adequate methodical tools are missing for a comprehensive recording and evaluation of these deposits. This thesis contributes a method for the exploration of non-renewable resources in urban areas using copper as an example. The method developed is based on approaches of both environmental engineering and geosciences.

Due to its strong technical profile, copper is an essential metal in the metabolism of the anthroposphere. It is used in several building applications (cladding, in-house use), in infrastructure (transmission of current and information), and in electric and electronic products and further movables – both in pure and alloyed form. The per capita urban deposits in Switzerland already exceed the global per capita geogenic deposits.

The thesis prepares for the exploration of these stocks in urban areas by combining the method of “substance flow analysis” (BACCINI und BADER 1996) with an independently developed, geoscientifically based method for the recording and evaluation of the copper stocks. This procedure allows a more adequate inspection of both quantities and qualities of the stocks.

The area of examination is Switzerland. The urban copper deposits are recorded in the three main stocks buildings, infrastructure and movables in a modular way. For the examination of the stocks regarding both structure and importance in the copper budget, there is need for an appropriate “tool box”. In the first part of the thesis, the stocks of copper and of cuprous alloys are recorded in accordance with their size. The second part verifies the building-up of the affiliated stocks within a dynamic model and thus provides the basis for the development of material management scenarios. The findings from the two parts are as follows:

Part I For an adequate recording of the stocks, the key sizes are defined and quantitatively determined. These are the “amounts of goods and products” (including frequency and correlation factors) and the “goods dimensions” (including copper concentration). Generally, the amounts of products are not available ready-to-use, but have to be determined indirectly. Due to its heterogeneous assembly, the structure of the stock in the buildings is dealt with in greater detail than the other main stocks. This research is part of the project ARK04 of the research department “Resource and Waste Management” at Eawag and ETH Zürich (Switzerland): ARK04 analyses the secondary stocks of the bulk raw materials within the buildings of Switzerland. Surveys on selected buildings are carried out to determine the frequencies and dimensions of the goods-in-use. In addition, studies of construction technology and technical history are interpreted in order to create model buildings, so-called ARK-buildings. The buildings of Switzerland are subdivided into four partial stocks according to their utilisation, each of them represented by a specific ARK-building. Therefore, the ARK-buildings differ significantly from each other in material amount and distribution patterns of the substance contents.

Based on copper, this thesis focuses on the methodical particularities that are to be taken into consideration in the examination of “trace substances”. Copper is below 1 wt.% of the building mass and is taken for a trace substance. The copper-bearing building components are grouped into 5 “application ranges” and 14 “product groups” in order to investigate the copper contents. Regarding the copper amount, the most important application ranges are the roofs (40 %) and the power systems (30 %), followed by the heating systems and the water systems. For roofs, the gutters and the sheets on dormer windows are the dominant product groups. For heating systems, it is the panel heating, and in the water systems it is the raw armatures. The stock in the infrastructure consists mainly of low and middle voltage power-cables (about $\frac{2}{3}$ of the infrastructure stock). The results of the copper stock calculation total as follows: in the buildings 80 ± 15 kg/capita, in the infrastructure 105 ± 25 kg/capita,

in the movables 35 ± 10 kg/capita and in the landfills 50 ± 10 kg/capita. The uncertainties of the stocks were calculated according to the Monte Carlo method. Starting from the present stocks, the building-up process is roughly reconstructed (time interval 25 a or 10 a, respectively).

Part II In the second part, a dynamic model describes the building-up of the secondary deposits in Switzerland for the period from 1900 to 2000. It is based on the knowledge about the assembly of the main stocks in *part I* with the uncertainties. The data is fitted by growth curves that are determined by a combination of logistic and linear functions. This procedure enables the comparison of the growth curves with each other and their discussion by the use of curve parameters. The dynamic modelling results in the development of the copper budget including an uncertainty analysis. The model of the regional copper budget is validated with data of the historical foreign trade statistics. The development of the system is assessed by self-made assessment criteria. These show the amounts of copper expected as resource losses and environmental pollution, unless correction steps are taken. The influence of life time extension and reduction, respectively, of goods or products is also discussed.

An urban redesign affects the copper budget. Two scenarios dealing with the conversion of production buildings into multi-family buildings or service buildings focus on the consequences regarding copper stocks and related market issues or environmental impacts. The thesis shows by example, how the dynamic model may be used in future: If the conversion process develops in favour of the service buildings, this results in an additional demand for copper due to a different use pattern of copper. If this process is accompanied by a complete prevention from installing new copper sheets, then the emissions will decline by 20 %, although the overall copper stocks in buildings (including in-house use) will increase slightly.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	3
1.1 Ausgangslage und Motivation	3
1.2 Die Ressource Kupfer	6
1.3 Ziel und Forschungsfragen	8
1.4 Aufbau der Arbeit	8
2 Methoden	9
2.1 Methodisches Konzept	9
2.2 Stoffflussanalyse für den regionalen Kupferhaushalt	12
2.2.1 Systemgrenze	12
2.2.2 Systemwahl	12
2.2.3 Beschreibung der Prozesse, Lager und Flüsse	14
2.3 Charakterisierung der Lager im Gebäudebereich	18
2.3.1 Heterogenität des Gebäudebestandes	18
2.3.2 Bisherige Studien zur Zusammensetzung von Gebäuden	18
2.3.3 Aufbau von Gebäuden	20
2.4 Erfassung der Lager im Gebäudebereich	26
2.4.1 Das ARK-Haus-Konzept	26
2.4.2 Ermittlung der Kupfergehalte der ARK-Häuser	32
2.4.3 Datenerhebung	36
2.4.4 Datenqualität	39
2.5 Charakterisierung der Lager im Infrastrukturbereich	41
2.5.1 Aufbau von Infrastrukturnetzen	41
2.5.2 Die Leitungsnetze	42
2.6 Erfassung der Lager im Infrastrukturbereich	46
2.6.1 Starkstrom	47
2.6.2 Telekommunikation	51
2.6.3 Stromversorgung von Transportmitteln	52
2.7 Charakterisierung und Erfassung weiterer Lager	54
2.7.1 Mobilien	54
2.7.2 Deponien	54
2.8 Historische Entwicklung der anthropogenen Kupferlager	56
2.8.1 Gebäudebereich	56
2.8.2 Infrastrukturbereich	59
2.8.3 Mobilien	60
2.8.4 Bedeutung des Aussenhandels	60
3 Resultate	61
3.1 Die historische Aussenhandelsbilanz	61
3.2 Kupferlager im Gebäudebereich	64
3.2.1 Potentielle Kupfergehalte	64
3.2.2 Kupfergehalte der ARK-Häuser	72
3.2.3 Gesamtmengen an Kupfer in Gebäuden	75
3.3 Kupferlager im Infrastrukturbereich	78
3.3.1 Starkstrom	78
3.3.2 Telekommunikation	84
3.3.3 Stromversorgung von Transportmitteln	85
3.3.4 Gesamtmengen an Kupfer in der Infrastruktur	85
3.4 Weitere Kupferlager	86
3.4.1 Mobilien	86
3.4.2 Deponien	86
3.5 Historische Entwicklung der anthropogenen Kupferlager	88
3.5.1 Gebäudebereich	88
3.5.2 Infrastrukturbereich	95
3.5.3 Mobilien	96

4 Diskussion	97
4.1 Aufbau der urbanen Kupferlagerstätten der Schweiz	97
4.2 Qualitative Ursachen für den Aufbau eines Teillagers	106
4.3 Unsicherheiten der Kupferlager	108
4.3.1 Methode	108
4.3.2 Resultate	109
4.4 Vergleich mit anderen Stoffen	113
4.4.1 Haupt- und Spurenstoffe	113
4.4.2 Übertragbarkeit des Vorgehens auf andere Stoffe	114
4.5 Regionale Unterschiede urbaner Kupferlagerstätten	115
4.6 Evaluation von Abrieb- und Abschwemmpotentialen	118
5 Dynamisches Modell Cuprum	121
5.1 Einleitung	121
5.2 Mathematische Beschreibung	123
5.2.1 Konfiguration des Systems	123
5.2.2 Systemvariablen	124
5.2.3 Systemgleichungen	126
5.2.4 Bewertungskriterien	133
5.3 Kalibrierung	134
5.3.1 Direkte Kalibrierung	134
5.3.2 Indirekte Kalibrierung	136
5.4 Resultate	140
5.4.1 Dynamik der Lager	146
5.4.2 Induzierte Flüsse	147
5.4.3 Bewertung	148
5.4.4 Diskussion des dynamischen Modells	150
5.5 Szenarien zum Umbau des Gebäudebestandes	155
5.5.1 Szenario I	155
5.5.2 Szenario II	158
5.5.3 Diskussion der Szenarien	160
5.5.4 Ausblick zur dynamischen Modellierung	162
6 Schlussfolgerungen und Ausblick	163
6.1 Zur Methode der Exploration urbaner Lagerstätten	163
6.2 Zum Entwurf einer Bewirtschaftungsstrategie	165
7 Abkürzungen	167
8 Glossar	169
9 Literaturverzeichnis	175
Anhang	189

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage und Motivation

Limitierte Rohstoffe

Weltweit wächst mit fortschreitender Technisierung und Urbanisierung der Materialeinsatz in der Anthroposphäre an. Die steigende globale Nachfrage nach Rohstoffen bzw. Waren bewirkt einen beschleunigten Ressourcenabbau in der Geosphäre – absolut und pro Kopf. So hat der Mensch nach dem Zweiten Weltkrieg mehr mineralische Rohstoffe abgebaut als in der vorherigen Menschheitsgeschichte (WELLMER und BECKER-PLATEN 1999). Eine wichtige Ursache für den grossmassstäblichen Ressourcenabbau liegt darin, dass mineralische Rohstoffe im Güterhandel als materialisierte „Träger“ des wertsteigerungsfähigen Vorganges vom Ausgangsstoff zum Produkt dienen (ADRIAANSE *et al.* 1998). Doch die „Prämisse“, Wirtschaftswachstum zu erlangen, hat ihren Preis: Bereits in den frühen siebziger Jahren wurde mit dem Erscheinen des Berichts des *Club of Rome* „Die Grenzen des Wachstums“ die Entwicklung des Ressourcenverbrauchs als nicht nachhaltig eingestuft, und nach aktueller Beurteilung hat sich an dieser Aussage nichts Grundlegendes geändert (MEADOWS, D. 1972; MEADOWS, D.H. *et al.* 2004). Der in den vergangenen Jahren rasche Aufstieg von Wirtschaften in Fernost deutet an, wie sprunghaft sich der Bedarf in Zukunft entwickeln kann. Eine Fortführung dieser Entwicklung – ein unbegrenztes Wachstum – ist jedoch aufgrund der Rahmenbedingungen auf der Erde per se nicht möglich, da die Ressourcen limitiert sind. Dies gilt insbesondere für die nicht-erneuerbaren Ressourcen¹, wozu sowohl die fossilen Energierohstoffe als auch die metallischen Rohstoffe gehören. Ressourcenverknappung wird in den nächsten Jahrzehnten voraussichtlich an Intensität gewinnen, auch wenn zunehmende Rezyklierungsaktivität diese Entwicklung dämpft.

Neben dieser direkten Limitierung durch die Knappheit der Ressource existiert auch eine indirekte Limitierung. Mit zunehmendem Fortschritt des Primärressourcenabbaus treten sukzessive mehrere physische und ökologische Beschränkungen auf. Wichtige Beschränkungen sind der „ökologische Rucksack“ inklusive der „grauen Energie“ der Rohstoff- und Güterproduktion (Knappheit der Energie, CO₂-Äquivalente), die diffusen Emissionen während und nach der Nutzung (Human- und Ökotoxizität), der Deponieraum (anfallende Menge) und das Deponieverhalten (Toxizität).

Da die fortschreitende Urbanisierung langfristig zu Verknappungsproblemen in verschiedenen Bereichen (Güter, Landnutzung, Energie) führt, ist eine nachhaltige Ressourcenbewirtschaftung anzustreben. Eine Entwicklung wird „nachhaltig“ genannt, wenn sie eine Deckung der gegenwärtigen Bedürfnisse gewährleistet, ohne gleichzeitig den späteren Generationen die Möglichkeit zur Deckung der ihren zu verbauen („Agenda 21“)(UNCED 1992). Zur langfristigen Wahrung der Existenzgrundlagen fordert das *Kapitalstockmodell* der Weltbank die Fähigkeit, von den „Zinsen des Kapitals“ zu leben, wobei Kapital nicht nur das wirtschaftliche, sondern auch das ökologische und das soziale Kapital als Wert erfasst, den es zu wahren oder zu mehren gilt (IDARIO 2001). Nach der Enquete-Kommission des Deutschen Bundestages *Schutz des Menschen und der Umwelt* sind nicht-erneuerbare Ressourcen nur in dem Umfang zu nutzen, in dem ein physisch und funktionell gleichwertiger Ersatz in Form erneuerbarer Ressourcen oder ein Ausgleich durch eine höhere Produktivität der erneuerbaren und nicht-erneuerbaren Ressourcen geschaffen wird (ENQUETE-KOMMISSION DES DT. BUNDESTAGS 1993).

¹ Man unterscheidet erneuerbare von nicht-erneuerbaren Ressourcen hinsichtlich der Regenerationszeiten. Tatsächlich bilden sich auch nicht-erneuerbare Ressourcen rezent, jedoch sehr langsam.

Urbane Lagerstätten

Durch Retention in der Nutzungsphase haben sich beträchtliche Materialmengen abbauwürdiger Metalle und anderer mineralischer Rohstoffe in den Gütern der Anthroposphäre angehäuft (BACCINI und BRUNNER 1991). Die Abbauwürdigkeit als Sekundärressource ist insbesondere bei hochwertigen Rohstoffen festzustellen, deren Beschaffungsaufwand grösser ist als die Kosten der Aufarbeitung im Ressourcenkreislauf. Man bezeichnet diese als „Sekundärressourcen“² im Gegensatz zu den „Primärressourcen“ in der Geosphäre. Die Transformation von geogenen zu anthropogenen Lagerstätten bewirkt, dass die Wiedernutzung bzw. Förderung aus der gebauten Welt („urban mining“) für viele Sekundärressourcen zunehmend an Bedeutung gewinnt (BACCINI und BRUNNER 1991; EIDG. KOMMISSION FÜR ABFALLWIRTSCHAFT 1986). Zur höheren Produktivität im Sinne der Enquete-Kommission (siehe Zitat im vorherigen Abschnitt) gehört somit auch die vermehrte Nutzbarmachung der Sekundärressourcen.

In den entwickelten Regionen wurden und werden besonders viele Ressourcen verbraucht. Daher ist dort heute auch ein Grossteil des anthropogenen Materiallagers (Masse pro Kopf) konzentriert (BACCINI und BADER 1996). Die Lagerstätten in diesen Regionen, welche durch die urbane Lebensform dominiert sind, werden in dieser Arbeit als „urbane Lagerstätten“³ bezeichnet. Relevante Teile davon sind heute in den Immobilien zu erwarten, also in den Gebäuden und der Infrastruktur (BACCINI und BRUNNER 1991). Diese Bauwerke werden in bestimmten Zeitabständen durch Sanierung und Renovation modifiziert und durch Neubauten erweitert oder ersetzt. Der Gebäudebestand der meisten Länder wächst, auch jener mit stagnierender Bevölkerung. Mit dem Rückbau nach der Nutzung werden die Sekundärressourcen wieder verfügbar und können gegebenenfalls erneut eingesetzt werden. Auf diese Weise sind die Bauwerke heute Ressourcenlager und morgen Ressourcenspender (LICHTENSTEIGER 2006).

Die Sekundärressourcen in der Anthroposphäre gewinnen nicht nur quantitativ an Relevanz. Denn zur Nutzung von Ressourcen werden meist Mindestanforderungen an ihre Reinheit gestellt, deren Qualitäten hoch sind und in Zukunft aufgrund steigender Anforderungen eher noch wachsen. Gleichzeitig nimmt die Qualität (hier: Metallgehalt) der abbauwürdigen Erze in der Erdkruste kontinuierlich ab (Kap. 1.2). So sind die urbanen Lagerstätten überwiegend und in zunehmendem Masse potentielle qualitativ hochwertige Lagerstätten.

Exploration urbaner Lagerstätten

Für eine nachhaltige Ressourcenbewirtschaftung sind umfassende Kenntnisse über die Lebensstadien der Materialien notwendig. Es gilt, den Zusammenhang zwischen den eingesetzten Primär- und Sekundärressourcen herzustellen, aber auch jenen Zusammenhang zwischen den in Nutzung befindlichen und rückgeführten Sekundärressourcen. Bisher konzentrierten sich die Arbeiten zur Untersuchung des regionalen Ressourcenhaushalts auf Güter- und Stoffflüsse. Der Aufbau und die Entwicklungsweise der urbanen Lagerstätten sind nur rudimentär erforscht, und es existieren auch keine etablierten Methoden zur Erforschung der Sekundärressourcen in ihrer regionalen Bedeutung. Der regionale Bezug erlaubt es, die urbanen Lagerstätten zu quantifizieren und zugleich auch bezüglich des Austauschs mit dem Hinterland einzuordnen.

Die Erforschung der urbanen Lagerstätten befindet sich noch in den Anfängen. Der regionale Bezug erlaubt eine Quantifizierung auf handlungsrelevanter Skala.

² Die Sekundärressourcen umfassen die Stoffe bzw. Güter *in* und *nach* der Nutzungsphase (inklusive Depo-nien).

³ Der Ausdruck „urbane Lagerstätte“ ist zu bevorzugen, da „sekundäre Lagerstätte“ in der klassischen Lagerstättengeologie die durch sekundäre Umbildungen (z.B. Verwitterung, Diagenese oder Metamorphose) entstandenen Lagerstätten zusammenfasst (Sedimentlagerstätten und metamorphe Lagerstätten) und von den primären bzw. juvenilen (liquid-magmatischen) Lagerstätten unterscheidet (SCHNEIDERHÖHN 1955).

Zur Erkundung künftiger Lagerstätten werden folglich neben den klassischen geologischen Kenntnissen der Lagerstättenkunde primärer Lagerstätten zunehmend auch Kenntnisse über den Aufbau sekundärer Lagerstätten erforderlich. Dieser Erkundungsvorgang lässt sich in Analogie zur Geologie als „urbane Exploration“ umschreiben (LICHTENSTEIGER 2006).

Die Erforschung künftiger Lagerstätten erfordert neben klassischen geologischen Methoden zunehmend auch neuartige Explorationsmethoden, die auf die urbanen Lagerstätten im regionalen Kontext zugeschnitten sind.

Die Kenntnisse über das anthropogene Lager lassen sich auch zur langfristigen Evaluation lagerabhängiger Schadstoffpotentiale einsetzen (OBERNOSTERER und BRUNNER 1999; OBERNOSTERER 2002). Dadurch erhält man eine Diskussionsgrundlage für Emissionseinschränkungen, um künftige Altlasten oder diffuse Belastungen zu vermeiden.

In der vorliegenden Arbeit wird die Exploration am Beispiel von Kupfer angegangen. Kupfer steht für eine Gruppe von nicht erneuerbaren Ressourcen, die absehbar knapp werden und grosse urbane Lagerstätten zeigen, deren Zusammensetzung jedoch nicht differenziert bekannt ist. Kupfer wird aufgrund seiner Eigenschaften in ausgeprägt diversen Anwendungsbereichen mit unterschiedlichen Lebensdauern eingesetzt (besonders in Gebäuden) und ist zudem in vielen Anwendungen problemlos substituierbar. Kupfer ist daher hinsichtlich der Übertragbarkeit des Vorgehens auf vergleichbare Sekundärressourcen besonders geeignet.

1.2 Die Ressource Kupfer

Historisches

Kupfer als möglicherweise ältestes Gebrauchsmetall der Menschen wird schon seit Tausenden von Jahren aufgrund seiner guten Verformbarkeit verwendet (HENSELING 1981; SUHLING 1983). Die Bedeutung des Kupfers bei der technisch-kulturellen Entwicklung vom Neolithikum zur ersten Metallzeit spiegelt sich in der Bezeichnung „Kupferzeit“⁴ wider (SUHLING 1990). Etymologisch leitet sich Kupfer aus dem spätlateinischen „cuprum“ ab und kennzeichnet damit seine Herkunft von *aes cyprium* (lat. für „Erz von der Insel Cypern“), da Zypern in dieser Zeit die reichhaltigste Fundstätte war (HERMANN 1982).

Eigenschaften

Kupfer ist ein so genanntes halbedles Metall mit hohem elektrochemischem Potential, daher ist Kupfer metallurgisch problemlos von den meisten anderen Metallen zu trennen. Dies erklärt die frühgeschichtliche Bedeutung und gewährleistet eine hervorragende Rezyklierbarkeit.

Neben dem Einsatz als reines Metall wird Kupfer auch in verschiedenen Kupferlegierungen eingesetzt. Die wichtigsten davon sind Messing (Kupfer + Zink), Rotguss und Bronze (Kupfer + Zinn), zunehmend auch Argentan (Neusilber)(Kupfer + Nickel + Zink) und Konstantan (Kupfer + Nickel) (DKI 1982).

Seiner Materialdichte nach ist Kupfer ein Schwermetall (8.93 kg/dm³)(HÄRIG *et al.* 1996). Es hat wie kaum ein anderes Metall Vorzüge bei der elektrischen Leitfähigkeit, thermischen Leitfähigkeit, Verformbarkeit und Korrosionsbeständigkeit, weist also ein ausgesprochen starkes technisches Profil auf (DKI 1982). Daneben besitzt Kupfer eine hohe ästhetische Qualität, da sein Farbton häufig als warm empfunden wird (KLEINE-ALLEKOTTE und GRESSMANN 1999). Diese Kombination günstiger Eigenschaften und die gegenüber dem ähnlich ausgestatteten Silber wesentlich höhere Verfügbarkeit (mit entsprechend günstigerem Marktpreis) geben dem Kupfer eine Sonderstellung unter den Metallen hinsichtlich der heutigen vielfältigen Einsatzfelder.

Primärressource Kupfer

Kupfer wird durch den Abbau von geogenen Erzlagerstätten gewonnen⁵. In der kontinentalen Erdkruste kommt Kupfer in einer Konzentration von durchschnittlich 50 bis 75 mg/kg vor, in der oberen kontinentalen Kruste von 25 bis 30 mg/kg (REICHERT und DE HAAR 1982; TUCHSCHMID *et al.* 1995). Dabei schwankt der übliche Kupfergehalt der verschiedenen Gesteinstypen zwischen weniger als 1 mg/kg (Evaporite) und über 100 bis 200 mg/kg (Tonsteine). Durch sedimentäre und magmatische Anreicherungsprozesse entstehen die Lagerstätten. Bauwürdige Lagerstätten erfordern heute einen Mindestgehalt (engl.: *cut-off grade*) an Kupfer von ca. 0.5 Gew.%, was einem Anreicherungsfaktor von über 100 entspricht⁶.

Das Erz wird gemahlen und durch Flotation aufkonzentriert, bevor es in Röstofen und Konverter zu Rohkupfer verarbeitet wird. Schliesslich erreicht man den gewünschten Reinheitsgrad durch Feuerrefinanzierung oder Elektrolyse. Der energetische Aufwand für diese Prozesskette zur Gewinnung von

⁴ Spätphase der Jungsteinzeit, in Mitteleuropa zwischen 3500 v.Chr. und 2200 v.Chr.

⁵ Voraussetzung für die Durchführbarkeit des Abbaus geogener Lagerstätten ist eine geologische Exploration, das ist das traditionelle Aufspüren und Untersuchen der Lagerstätte. Die Lagerstätten werden auf klassische Weise in einer Kombination von Geländearbeit, Laborarbeit und Schlussfolgerungen untersucht. In der Geländearbeit ermittelt man durch Kartierung, Schürfung und Bohrungen die Grösse, Form und Beschaffenheit der geologischen Körper, inklusive der Nebengesteine und der Tektonik. Zur Bestimmung des Mineralinhaltes werden nach der Grobbestimmung im Feld mikroskopische und chemische Laboranalysen durchgeführt.

⁶ Minimale Anreicherungsfaktoren werden aufgrund der Wertebereiche in der Literatur unterschiedlich, aber in der gleichen Grössenordnung angegeben.

Metallrohstoffen aus Primärressourcen hängt stark von der Kupferkonzentration und vom Erztyp ab (ca. 20 bis 60 GJ/t Cu im Konzentrat)(BRUCH *et al.* 1995).

Der durchschnittliche Kupfergehalt der gewinnbaren Erze hat – wie bei anderen Schwermetallerzen – seit über einem Jahrhundert ständig abgenommen, so dass der Aufwand bei Förderung, Aufbereitung und Verhüttung trotz technischer Verbesserungen angestiegen ist, sowohl in ökonomischer Hinsicht (SCHNEIDERHÖHN 1955) als auch mit Blick auf die Umweltbelastungen. Hierunter fallen immer grössere Mengen an Gangart, Abraum, Schlacken und Schwefelsäure (bei sulfidischen Erzen), ebenso steigt der energetische Aufwand pro Tonne Kupfer an. Beim Erzabbau sind die grossen zu deponierenden Abraumengen eine wesentliche Umweltbelastung, denn bei sich verknappendem Deponieraum spielt der Entsorgungsaufwand eine zunehmende Rolle, der durch Volumen (Deponie) und Masse (Transport), aber auch stark durch die Toxizität (fachgerechte Entsorgung) beeinflusst wird (AYRES *et al.* 2002).

Sekundärressource Kupfer

Die bedeutendsten Einsatzfelder für Kupfer sind heutzutage die Elektrotechnik, die Bauindustrie, die Fahrzeugindustrie und die Landwirtschaft (JOSEPH 1999). Kupfer ist der bevorzugte Leiterwerkstoff für elektrische Ströme. Die Einsatzfelder in der Bauindustrie lassen sich unterteilen in den Aussenbereich (Dach, Fassade) und den Innenbereich (Haustechnik, Schlosserarbeiten). Seine thermische Leitfähigkeit wird in Kühlapparaturen eingesetzt (z.B. Kühler von Motorfahrzeugen). Daneben wird Kupfer auch als Pflanzenschutzmittel (Herbizid, Fungizid) oder in speziellen Düngern eingesetzt, dort jedoch in chemisch gebundener Form. Die Nutzungszeiten reichen also von kurzlebigen technischen Artikeln bis hin zu sehr langfristigen Einsätzen im Bau.

Die quantitative Nutzung von Kupfer geschieht vorwiegend in Gebrauchsgütern (z.B. elektrische Anlagen, Bauinstallationen) und nur in kleinen Anteilen in Verbrauchsgütern (z.B. Pflanzenschutzmittel, Kleinbatterien, Korrosionsprodukte). In den Gebrauchsgütern bleibt die metallische Form erhalten und erlaubt eine Rezyklierung auf qualitativ hohem Niveau. Für eine Rückführbarkeit ist jedoch die Einsatzform beim Endverbraucher entscheidend. Die Verluste beschränken sich auf Deponieablagerungen, Abriebe und Abschwemmungen in die Umwelt sowie dissipative Einträge als Pflanzenschutzmittel und Dünger in die Landwirtschaft.

Erste Skizze zum globalen Kupferhaushalt

Ausgangsmaterial für die Primärkupfergewinnung sind die abbauwürdigen Kupferreserven. Diese werden auf über 300 Megatonnen geschätzt (1996)(WELLMER und BECKER-PLATEN 1999). Mit Beginn des 20. Jahrhunderts ging mit einem starken Zuwachs in der industriellen Produktion ein starker Bedarfsanstieg an Nichteisenmetallen einher (SCHNEIDERHÖHN 1955), der durch den 2. Weltkrieg und seine Kriegsfolgen nur vorübergehend aussetzte. Die Erzeugung von Kupfer wuchs von 0.5 Megatonnen pro Jahr in 1900 auf fast 2.8 Megatonnen pro Jahr in 1953 stark an (SCHNEIDERHÖHN 1955). Aktuell ist der jährliche Kupferbergbau auf mehr als 13 Megatonnen pro Jahr angestiegen – mit einem ungebrochenen Aufwärtstrend (DKI 1999a). Bezogen auf diese Abbaurate erhält man für Kupfer eine statische Reichweite von ca. 25 Jahren, also weniger als eine Generation.

Mit der Extraktion des Kupfererzes tritt das abgebaute Kupfer in die Anthroposphäre ein. Es wird dort bis zur nutzbaren Ware aufbereitet und zum grössten Teil akkumuliert. Umgekehrt kann man also die Gesamtmenge des globalen Sekundärkupfers (das Kupfer in Immobilien, Mobilien und Deponien) in erster Näherung durch die kumulative abgebaute Kupfermenge von ca. 420 Megatonnen abschätzen (nach (CRAIG *et al.* 2001; BLACK und LYMAN 1990). Auf globaler Ebene werden die sekundären Kupferressourcen auf ungefähr 50 kg/capita geschätzt (LICHTENSTEIGER 2002). In den USA und der Schweiz werden sie zu 200 bis 300 kg/capita veranschlagt, was ein Vielfaches gegenüber dem in Entwicklungsländern ist. Die Menge des Kupferlagers in der Nutzungsphase („Konsum“) übertrifft damit also bereits die heute abbauwürdigen Reserven in primären Erzlagerstätten. Aufgrund dieses Transfers in die urbanen Lagerstätten gewinnt ein *urban mining* zunehmend an Bedeutung.

1.3 Ziel und Forschungsfragen

Das Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung einer Methode zur Bemessung und Bewertung von Sekundärressourcen in urbanen Lagerstätten im regionalen Zusammenhang („urbane Exploration“). Die Thematik wird empirisch am Beispiel Kupfer angegangen. Als Region wird die Schweiz gewählt. Die vorliegende Arbeit will folgende Fragen beantworten:

- Wie können urbane Lagerstätten im regionalen Rahmen exploriert werden?
Frage nach der Methode
- Welches sind die wichtigsten Lagerstätten von Kupfer und wie sind sie materiell beschaffen?
Frage nach den Eigenschaften

Darauf aufbauend eröffnet sich die Frage:

- Welches sind die Schlüsselvariablen bei der Genese urbaner Kupferlagerstätten?
Frage nach den Gesetzmässigkeiten der Entstehung, deren Beantwortung man möglicherweise für künftige Bewirtschaftungsstrategien nutzen kann

1.4 Aufbau der Arbeit

Diese Arbeit entwirft eine Methode zur Bewertung und Erfassung von Sekundärressourcen am Beispiel des Kupfers (mit Schwerpunkt auf den Immobilien). Hierfür wird die Methode der Stoffflussanalyse mit eigenständig komponierten Arbeitsschritten ergänzt.

Die Arbeit besteht aus zwei Teilen:

- | | | |
|----------|---|-----------------|
| Teil I: | Die Untersuchung der Kupferlagerstätten | Kap. 2 – Kap. 4 |
| Teil II: | Das dynamische Stoffhaushaltsmodell <i>Cuprum</i> | Kap. 5 |

Im ersten Teil werden die Hauptlagerstätten des Kupfers identifiziert, deren Aufbau charakterisiert und das Kupfer in seiner Struktur mittels Hilfsgrössen erfasst. Sodann wird die historische Entwicklung eruiert. Im zweiten Teil werden die Kenntnisse über die Lager zur direkten Kalibrierung eines dynamischen Kupferhaushaltsmodells benutzt. Mittels ausgewählter Kenngrössen wird das dynamische Modell zur Bewertung von Szenarien eingesetzt.

2 Methoden

Die in dieser Arbeit entwickelte Methode zur Exploration urbaner Lagerstätten basiert auf der Methode der Stoffflussanalyse (SFA) (BACCINI und BRUNNER 1991; BACCINI und BADER 1996), mit besonderem Fokus auf den Lagerstätten⁷. Die SFA wird zur Exploration mit einer eigenständig entwickelten, geowissenschaftlich geprägten Methode bezüglich der Lagerstätten komplementär ergänzt.

In diesem Kapitel wird das methodische Vorgehen zur Untersuchung der Kupferlager (Teil I) bis zur Übernahme in das dynamische Kupferhaushaltsmodell (Teil II) dargelegt. Das Konzept der Explorationsmethode wird in Kap. 2.1 vorgestellt. In Kap. 2.2 wird eine SFA für den Kupferhaushalt der Schweiz entwickelt. Es folgt die Charakterisierung sowie die Beschreibung der Erfassung der Lagerstätten im Gebäudebereich (Kap. 2.3-2.4), im Infrastrukturbereich (Kap. 2.5-2.6) sowie in den Mobilien und den Deponien (Kap. 2.7). Schliesslich wird das Vorgehen zur Bestimmung der historischen Entwicklung der Lagerstätten im Gebäudebereich, im Infrastrukturbereich und den Mobilien erläutert (Kap. 2.8).

2.1 Methodisches Konzept

Die Exploration urbaner Kupferlagerstätten (im Folgenden – wie in der Methode der SFA – als „Kupferlager“ oder „Lager“ bezeichnet) wird in einem iterativen Verfahren durchgeführt. Dabei werden drei Eigenschaften der Lager erfasst:

- a) Quantität: Grösse, in Masseneinheiten
- b) Qualität: Beschaffenheit, nach materiellen und funktionalen Kriterien
- c) Genese: zeitliche Entwicklung von Quantität und Qualität

Zu diesem Zweck umfasst die Exploration eine Abfolge von vier Schritten (Abb. 2-1).

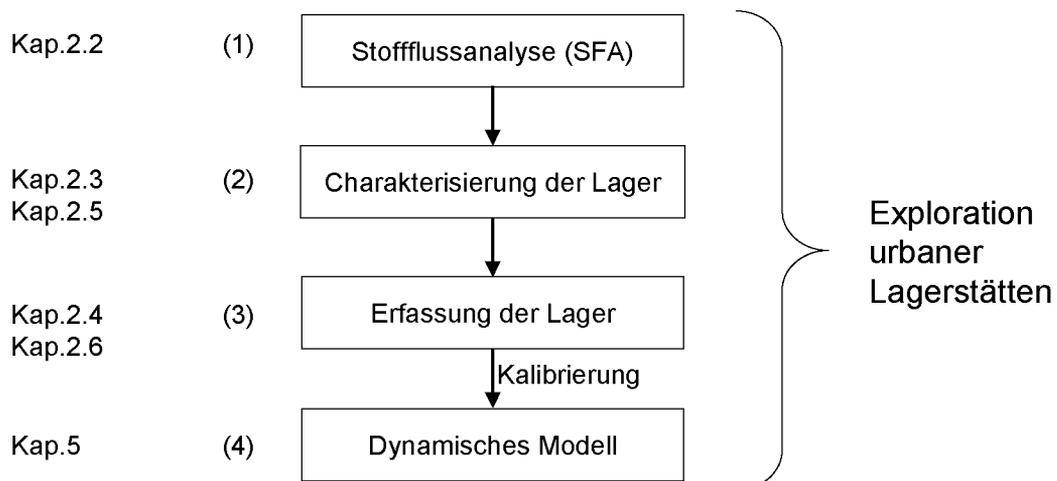


Abb. 2-1: Vorgehen zur Exploration urbaner Lagerstätten mit Angabe der Kapitelnummer (links).

⁷ Bisherige Stoffflussanalysen fokussierten auf die Stoffflüsse, und berücksichtigte Lager wurden als Ergebnis der Stoffflüsse angesehen. In dieser Arbeit werden primär die Lager untersucht, und die Flüsse werden als Folge der Lageränderung und des Lagerumsatzes betrachtet.

Die vier Schritte bedeuten Folgendes:

(1) Stoffflussanalyse (SFA)

Mit der SFA werden jene relevanten Güter und Prozesse ausgewählt, mit denen die Lager in erster Näherung beschrieben werden.

(2) Charakterisierung der Lager

Ressourcen mit unterschiedlicher Nutzung weisen unterschiedliche Verteilmuster in der Anthroposphäre auf. Daher sind die konkreten geeigneten Erfassungsgrößen (Messgrößen) ressourcenspezifisch zu wählen. Hierfür werden qualitative Kenntnisse über den Aufbau der Kupferlager benötigt, die so genannte Charakterisierung der Lager.

Die Anwendungsbereiche des Kupfers werden hinsichtlich des Kupferinhaltes charakterisiert, um die zur Erfassung erforderlichen Arbeitsschritte wählen zu können. Dabei wird aufgrund von Grösse, Heterogenität und Kenntnisstand der erforderliche Untersuchungsbedarf identifiziert. In dieser Arbeit werden die urbanen Kupferlagerstätten bezüglich der Nutzungsphase in drei Hauptlager mit jeweils mehreren Teillagern unterteilt (Abb. 2-2).

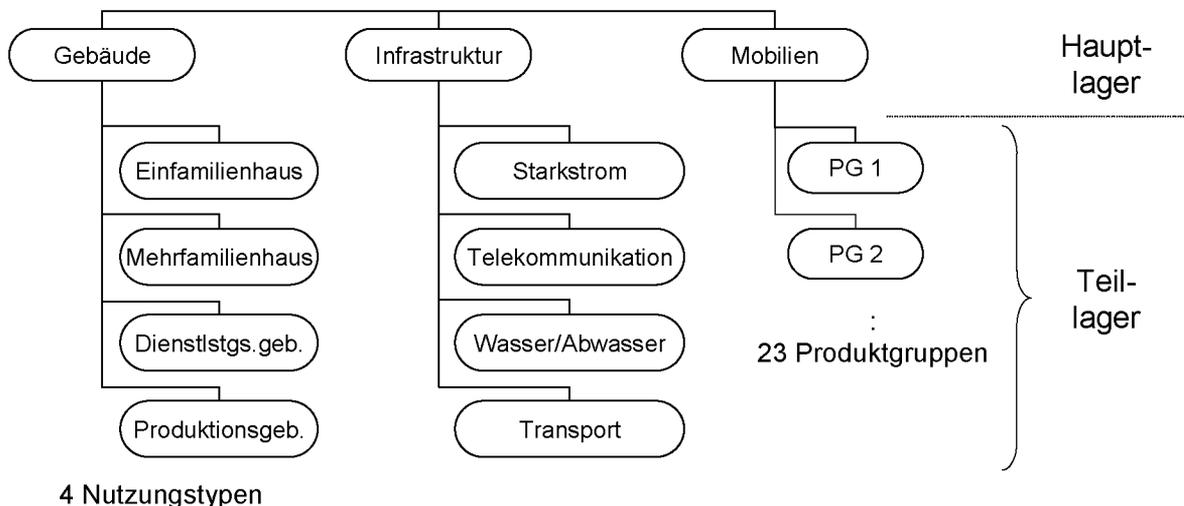


Abb. 2-2: Unterteilung der urbanen Kupferlagerstätten in drei Hauptlager mit jeweils mehreren Teillagern. Die aus einer ersten Abschätzung ermittelten Hauptlager werden in relativ homogene Teillager gegliedert. Das dargestellte Schema ist prinzipiell kupferspezifisch, so dass die Auswahl der Teillager für andere Stoffe abweichen kann.

(3) Erfassung der Lager

Es sind in dieser Arbeit die *direkte Erfassung* (am Lager selbst) und die *indirekte Erfassung* (über Flüsse) zu unterscheiden. Die direkte Erfassung und Analyse der Lager ergibt eine relativ hohe Genauigkeit zu Quantität und Qualität, da die Wahl der Erfassungsgrößen jeweils eigens dem Aufbau der drei Hauptlager angepasst wird; diese methodische Anpassung an die Hauptlager ist im Allgemeinen für jeden zu explorierenden Stoff separat erforderlich.

Ebenso wird – ausgehend von den heutigen Lagergrößen – die Genese der Hauptlager durch eine retrospektive Untersuchung (a) auf Basis abgeschätzter historischer Angelpunkte und begründeter Annahmen⁸ *direkt* rekonstruiert – teilweise mit Hilfe der Erfassungsgrößen – und (b) *indirekt* über kumulierte Kupferimporte und -exporte. Die Analyseergebnisse zu den Lagereigenschaften werden in die SFA aus Schritt (1) integriert, und anschliessend aus beiden Modulen, *Quantität/Qualität* und *Genese*, in ein dynamisches SFA-Modell⁹ überführt.

⁸ Diese Annahmen beruhen unter anderem auf Angaben technik- und sozialhistorischer Diskurse.

⁹ Dynamische SFA-Modelle beschreiben zeitabhängige Stoffhaushaltssysteme. Im allgemeinen Fall sind die Variablen (Flüsse und Lager) und Parameter nichttrivial abhängig von der Zeit.

(4) Dynamisches Modell

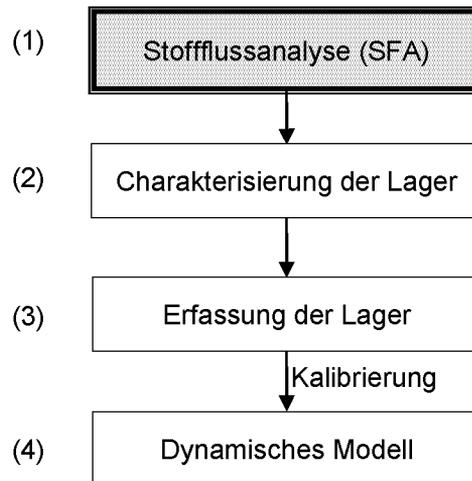
Die historischen Lagerentwicklungen aus Schritt (3) werden zur *direkten Kalibrierung* des dynamischen Modells genutzt. Erst auf Basis dieser Kenntnisse über die Lagereigenschaften (Quantität, Qualität und Genese der urbanen Lagerstätten) ist eine Bewertung des Entwicklungspotentials der Ressource bzw. des Handlungsspielraums durchführbar. Die Genese des Lagers wird im dynamischen Modell mit Hilfe von Aussenhandelszeitreihen und weiteren Vergleichsvariablen auf Konsistenz geprüft (indirekte Kalibrierung). Mittels Annahmen zu den Lebensdauern werden Kenntnisse erlangt, wann und in welcher Quantität und Qualität die Sekundärressource Kupfer voraussichtlich verfügbar wird. Das dynamische Modell verhilft zu einem hinsichtlich des Langzeitverhaltens vertieften Systemverständnis des Kupferhaushaltes.

Die vorrangige Eigenleistung dieser Arbeit liegt in der Erfassung (3) mit einem Schwerpunkt auf den Hauptlagern in den Gebäuden und der Infrastruktur. Wegen des heterogenen Aufbaus der Gesamtheit kupferhaltiger Güter ist ein universelles lagerübergreifendes Vorgehen nicht für die Erfassung geeignet, sondern den Haupt- bzw. Teillagern entsprechend anzupassen (z.B. ist das Lager im Infrastrukturbereich anders zu erfassen als jenes im Gebäudebereich). Bei grösserer Heterogenität der Teillager ist die Untersuchung tieferer Aggregationsstufen erforderlich, um ausreichend homogene Teilbestände für die Hochrechnung zu erlangen. Demnach ist die Auswahl der jeweiligen Erfassungsgrössen, aus denen die Grösse der Teillager errechnet wird (z.B. Längen, Durchmesser usw.), allein durch die stofflichen bzw. technischen Eigenschaften der Teillager festgelegt (und nicht im Vorhinein durch die Methode).

Den Teillagern ist gemein, dass zur Erfassung der Lagerquantität und -qualität ein so genannter *bottom-up*-Ansatz verwendet wird; das ist ein Ansatz, bei dem von Einzelobjekten auf Eigenschaften einer Grundgesamtheit geschlossen wird. Sofern hierfür keine ausreichenden Daten vorliegen oder die Teillager zu heterogen sind, ist die Erhebung an Einzelobjekten (Individuen) notwendig, um über gewichtete Mittelwerte der Einzelerhebungen und über eine anschliessende Hochrechnung auf die Gesamtheit heterogener Lager zu schliessen.

Generell wäre zwar mit einer zehnfachen bis hundertfachen Objektzahl eine Verallgemeinerung der Kupfergehalte „auf allen Ebenen“ (Gebäude, Infrastruktur, Mobilien) besser zu begründen. Jedoch wäre der Messaufwand im Vergleich zum möglichen Ertrag nur in gezielten Fällen zu rechtfertigen, denn ab einem gewissen Punkt erfordert die Verkleinerung der Unsicherheiten einen ungerechtfertigten Aufwand in der Rohdatenbeschaffung. Daher kombiniert diese Arbeit Wissen aus der Literatur mit Expertenwissen und schliesst die verbliebenen Wissenslücken mit eigenen Erhebungen.

2.2 Stoffflussanalyse für den regionalen Kupferhaushalt



Die Stoffflussanalyse (SFA) untersucht den Stoff- und Energiehaushalt von Systemen der Anthroposphäre und ihrer Umwelt, z.B. den Stoffhaushalt eines Betriebes oder einer Region, mit Schwerpunkt auf dem Einfluss der Prozesse auf die Stoffverteilung im System. Auf der Basis des Gesetzes der Massen- und Energieerhaltung werden die Flüsse verschiedener Stoffe¹⁰ oder Materialien durch einen definierten Raum in einer bestimmten Zeitspanne festgestellt (Einzelheiten zum Vorgehen: siehe BACCINI und BRUNNER (1991), BACCINI und BADER (1996) und (BRUNNER, P.H. und RECHBERGER 2004)).

2.2.1 Systemgrenze

Als Untersuchungsraum wird in der vorliegenden Arbeit die Schweiz gewählt, deren geographisch definierte Grenze damit die Systemgrenze bildet. Für diese Wahl sprechen folgende Gründe. Der flächenhafte Wohlstand und die dichte Besiedlung der Schweiz bieten eine gute Ausgangslage, den Ressourceneinsatz in Kombination mit urbanem Wachstum zu untersuchen, denn sie weist heute ein „reifes Bauwerk“ an Gebäuden und Infrastruktur auf. Zudem erleichtert die physische Unversehrtheit aus den beiden Weltkriegen mit dem stetigen Bauwerkswachstum eine Nachzeichnung der Entwicklung (im Gegensatz zu kriegsversehrten Nachbarstaaten). Methodisch spricht für die Wahl der Schweiz die relativ gute Verfügbarkeit von Daten auf nationaler Ebene.

2.2.2 Systemwahl

Für die Wahl des Stoffhaushaltssystems werden die verschiedenen „Zustände“ des metallischen Kupfers zu wesentlichen Prozessen zusammengefasst. Sieben „Prozesse“ und vierzehn ‚Flüsse‘ werden für das Ausgangssystem gewählt (Abb. 2-3). Gemäss dem Schwerpunkt der Untersuchung auf den Lagern wird dabei die Nutzungsphase segmentiert.

¹⁰ Nach BACCINI und BRUNNER (1991) sind Stoffe definiert als chemische Elemente oder Verbindungen.

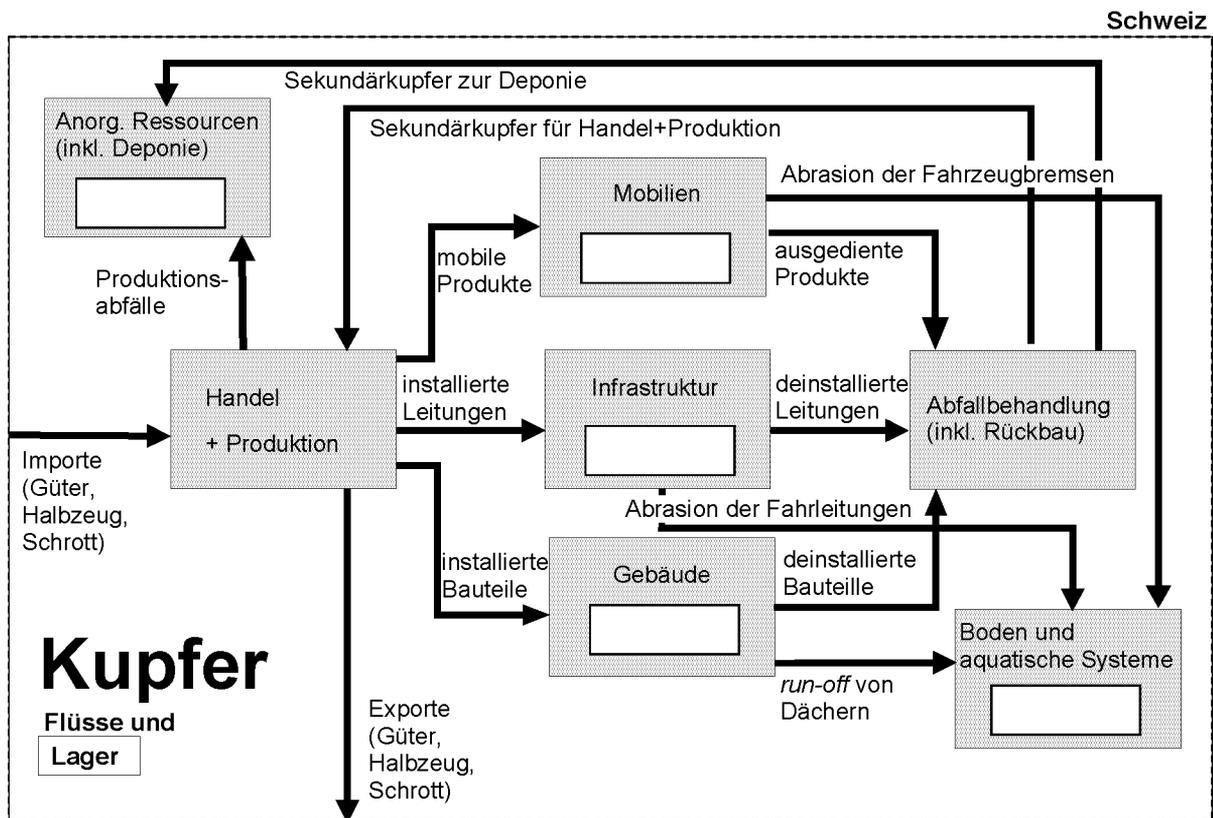


Abb. 2-3: Kupferhaushaltssystem der Schweiz. Die sieben Prozesse (graue Kästen) – fünf davon mit Lagern (weisse Kästen) – sind durch vierzehn Stoffflüsse miteinander verbunden (Pfeile).

Mangels bedeutender primärer Kupfervorkommen in der Schweiz gelangen die kupferhaltigen Güter ausschliesslich über den Prozess „Handel+Produktion“ in das System. Aufgrund des Schwerpunkts auf den Lagern werden zur Beschreibung der eigentlichen Nutzungsphase der Güter gemäss Abb. 2-2 die drei Prozesse „Mobilien“, „Infrastruktur“ und „Gebäude“ ausgewählt. Bei den beiden letztgenannten sind ausdrücklich Erstellung und Betrieb eingeschlossen. Aus dem Prozess „Handel+Produktion“ gehen der Fluss ‚mobile Produkte‘ in die „Mobilien“, ‚installierte Leitungen‘ in die „Infrastruktur“ sowie der Fluss ‚installierte Bauteile‘ in die „Gebäude“ (beide letztgenannten im Wesentlichen über das Handwerk). Jeder Prozess der Nutzungsphase hat zwei Outputflüsse: einen unbeabsichtigten, dissipativen **während** der Nutzungsphase in die Umweltkompartimente „Boden und aquatische Systeme“ und einen beabsichtigten **nach** der Nutzungsphase in die „Abfallbehandlung“. Während der Nutzungsphase gelangt die ‚Abrasion der Fahrzeugbremsen‘ aus den „Mobilien“ in die Umweltkompartimente, aus der „Infrastruktur“ ist dies die ‚Abrasion der Fahrleitungen‘ und aus den „Gebäuden“ der ‚run-off von Dächern‘. Analog werden nach ihrer jeweiligen Verweilzeit die ‚ausgedienten Produkte‘ der Mobilien, die ‚deinstallierten Leitungen‘ aus der „Infrastruktur“ sowie die ‚deinstallierten Bauteile‘ aus den „Gebäuden“ im Prozess „Abfallbehandlung“ gesammelt. Aus der „Abfallbehandlung“ gelangt der Rezyklierfluss ‚Sekundärkupfer für Handel+Produktion‘ (Kupferschrott) in „Handel+Produktion“. Kupfermengen, die nach der „Abfallbehandlung“ weder rezykliert noch exportiert werden, gelangen als ‚Sekundärkupfer zur Deponie‘ (Abfälle) in die Deponien („Anorg. Ressourcen“), vor allem über Siedlungsabfälle und die Abfallfraktion RESH¹¹. Ein weiterer Fluss in die Deponien sind die ‚Produktionsabfälle‘ aus dem Prozess „Handel+Produktion“. Der einzige Outputfluss verlässt das System als ‚Güter-, Halbzeug- und Schrott-Exporte‘ via den Prozess

¹¹ RESH: Reststoffe aus Shredderwerken, das sind im Wesentlichen die Nichtmetallfraktionen aus der Fahrzeugschrotterwertung. Verfahrensbedingt verbleibt ein gewisser Metallanteil in der RESH-Fraktion.

„Handel+Produktion“. Es handelt sich dabei um Sekundärkupfer aus der „Abfallbehandlung“, um Produkte aus schweizerischer Produktion und um so genannte Reexporte¹².

2.2.3 Beschreibung der Prozesse, Lager und Flüsse

Unter „Mobilien“ versteht man in dieser Arbeit ortsungebundene Güter, z.B. Fahrzeuge, Maschinen, Werkzeuge, Münzen, unter „Infrastruktur“ die Transport-Netzwerke der Strasse, der Versorgungsleitungen und des Abwassers und unter „Gebäude“ alle dem Hochbau zugeordneten Bauwerke. Eine ausführliche Beschreibung aller Prozesse des gewählten Systems wird in Tab. 2-1 gegeben.

Tab. 2-1: Prozesse des gewählten Systems und ihre Beschreibung.

Prozess	Beschreibung
Handel und Produktion	Handel und Produktion von Gütern und Halbzeugwaren ¹³ , die mit oder ohne weitere Bearbeitungsstufen innerhalb der Schweiz in die Nutzungsphase gelangen oder exportiert werden. Eingeschlossen sind Handel und Aufbereitung kupferhaltiger Schrotte (nur physischer Handel).
Mobilien	Jene Güter, deren Einsatz örtlich flexibel ist – im Gegensatz zu den Immobilien. Neben dem Hausrat (Möbel, elektrische Grossgeräte des Haushaltes, Elektro- und Elektronikgeräte, Küchengegenstände, Werkzeug und Schmuck) fallen darunter auch Fahrzeuge. Sie erfüllen in der Regel eher kurz- bis mittellebige Bedürfnisse und Funktionen (ca. 1 bis 25 Jahre).
Infrastruktur	Gesamtheit aller Baukörper der Infrastrukturnetze, welche die Gebäude durch den Transport von Personen, Materialien oder Informationen verbinden: das Strassen- und Wegenetz (inkl. Beleuchtung), das Bahnnetz, das Stromnetz, das Telefonnetz und das Trinkwasser- und Abwassernetz. Der Prozess „Infrastruktur“ wird hier im engeren Sinne verstanden, das bedeutet die technisch erforderlichen, physischen Netzstrukturen. Es handelt sich um langlebige Güter (ca. 30 bis 100 Jahre).
Gebäude	Gesamtheit aller im Hochbau erstellten Bauwerke: Wohngebäude, gewerblich genutzte Gebäude und deren Mischformen. Ausgeschlossen sind Spezialbauten (z.B. Sportstadien) und ausschliesslich militärisch genutzte Gebäude. Es handelt sich um langlebige Güter (ca. 30 bis 100 Jahre).
Abfallbehandlung (inklusive Rückbau)	Zusammenfassung der drei Entsorgungsflüsse aus den Konsumprozessen „Mobilien“, „Infrastruktur“ und „Gebäude“. Mit dem Ende der Nutzungsphase gelangen die Güter durch die Entsorgung der Mobilien bzw. den Rückbau der Bauwerke zu den diversen Schrott- und Abfallfraktionen. Eingeschlossen ist die Trennung in handelbare und zu deponierende Güter.
Anorg. Ressourcen (inklusive Deponie)	Die Kupfermengen in den Deponien und den geogenen Lagerstätten werden hier als potentielle Ressourcenspender zu „Anorganischen Ressourcen“ zusammengefasst. Zur Zeit sind die Kupfergehalte der anorganischen Ressourcen in der Schweiz technisch bzw. ökonomisch unterhalb der Abbaugrenze, so dass es keine Outputflüsse aus diesem Prozess gibt.
Boden und aquatische Systeme	Die dissipativen Kupferflüsse verlassen die Nutzungsphase als Abrieb- und Abschwemmprodukte. Partikuläres und gelöstes Kupfer gelangt in die Vorfluter ¹⁴ und sammelt sich in den oberen Sedimentschichten und den Böden an.

¹² Reexporte sind Ausfuhren importierter Waren (ohne wertsteigernde Massnahmen im Inland).

¹³ In der Nichteisenmetallindustrie fasst man rohe und vorgewalzte Barren, Stangen, Rohre und Drähte zur Rubrik Halbzeug zusammen.

¹⁴ Hydrologisch betrachtet sind Vorfluter jede Form von Gerinne, in denen Wasser mit natürlichem oder künstlichem Gefälle abfliessen kann. Teilweise wird die wasserrechtliche Erlaubnis zur Einleitung von Abwässern in die Gewässer (z.B. Bach, jede Art von Kanal, Fluss oder See) als Definitionskriterium hinzugezogen.

Bei fünf der sieben ausgewählten Prozesse des Ausgangssystems (Abb. 2-3) werden Lager berücksichtigt:

- Mobilien
- Infrastruktur
- Gebäude
- Anorganische Ressourcen
- Boden und aquatische Systeme

Bei den Prozessen „Handel+Produktion“ und „Abfallbehandlung“ werden die Lager vernachlässigt, da sie entweder nicht vorhanden oder von vergleichsweise kurzer Dauer sind.

Die Charakterisierung und die Erfassung werden anhand der drei Prozesse bzw. Hauptlager der Nutzungsphase „Mobilien“, „Infrastruktur“ und „Gebäude“ methodisch entwickelt. Die beiden Lager „Anorganische Ressourcen“ sowie „Boden und aquatische Systeme“ werden aus folgenden Gründen nicht oder nur vereinfacht charakterisiert und erfasst:

- a) Die primären Kupferlagerstätten der Schweiz sind aufgrund ihrer geringen Grösse und Kupferkonzentration seit Beginn des 20. Jahrhunderts nicht abbauwürdig (JAFFÉ 1986)¹⁵. Die generelle Zusammensetzung von primären Kupfererzlagerstätten wird einschlägig in der Literatur der Lagerstättengeologie behandelt (z.B. (POHL 1992)).
- b) Zur Nutzung von Deponien als Ressourcenlager sind Mindestanforderungen an Reinheit und Konzentration der Inhaltsstoffe zu erfüllen (Endlagerqualität) (BACCINI *et al.* 1992)¹⁶; zur Zeit sind die Deponien nicht abbauwürdig. Da sie im Vergleich zu anderen urbanen Kupferlagerstätten bedeutend homogener aufgebaut sind und dadurch andersartige, bereits entwickelte „Explorationsmethoden“ erfordern, wird hier auf eine genaue, methodisch orientierte Erfassung der Deponien (Schlackendeponien, biogene und gemischte Reaktordeponien) verzichtet, und ihre Lager werden in einer Überschlagsrechnung bestimmt.
- c) Die akkumulierten Kupfermengen in den Umweltkompartimenten „Boden und aquatische Systeme“ sind aus Ressourcensicht gering, mengenmässig praktisch irrelevant (z.B. VON ARX (2006)). Aussagen über das Lager in den Umweltkompartimenten sind erst über die Langzeitbetrachtungen des dynamischen Modells möglich (Kap. 5).

Die Flüsse werden teilweise direkt gemessen und teilweise indirekt durch Transferkoeffizienten¹⁷ ermittelt (Tab. 2-2). Andere Emissionen als die in Tab. 2-2 explizit berücksichtigten Emissionsflüsse (Abrieb, Korrosion) werden wegen mengenmässiger Irrelevanz im Folgenden vernachlässigt.

¹⁵ Die Gruben der wenigen Lokalitäten in der Schweiz, die sich für Kupfererzbergbau eignen, wurden aus ökonomischen Gründen sukzessive geschlossen. Die Gruben im *Val d'Anniviers* (VS) schlossen zu Beginn des 20. Jahrhunderts (aus Kriegsgründen wurde im 2. Weltkrieg die Förderung kurzzeitig wiederaufgenommen); die Gruben in den Zentralmassiven und in der nördlichen Kalkalpenzone (Bristenstock (UR), Vorderrheintal, Mütschenalp (SG)) wurden ebenso wie diejenigen des Penninikums und in den ostalpinen Gesteinsserien (Ursera) spätestens nach dem 1. Weltkrieg eingestellt (SGTK 1997).

¹⁶ Für Siedlungsabfälle und siedlungsabfallähnliche Abfälle (Gewerbeabfälle, Bauabfälle etc.) schreibt die Technische Verordnung für Abfälle in der Schweiz eine thermische Abfallbehandlung in Kehrichtverbrennungsanlagen (KVA) vor (EDI 1988). Die Verbrennungsrückstände (KVA-Schlacken) erreichen bereits heute eine relativ hohe Homogenität. Ihre Zusammensetzung hängt von der Abfallzusammensetzung ab, diese wiederum von den Lagern in der Nutzungsphase. Aktuelle Arbeiten untersuchen die Voraussetzungen, die eine mechanische oder pyrometallurgische Rückgewinnung der Kupfergehalte in Schlacken ermöglichen (THUT 2001; LICHTENSTEIGER 1996; ZELTNER 1998). Da die *cut-off*-Konzentrationen von Kupfererzen in Zukunft sinken werden, gewinnen solche Ansätze zunehmend an Bedeutung.

¹⁷ Ein Transferkoeffizient k_{ij} beschreibt das Verhältnis des Outputflusses A_{ij} eines Prozesses i gegenüber der Summe aller Inputflüsse A_{hi} dieses Prozesses: $k_{ij} = \frac{A_{ij}}{\sum_h A_{hi}}$.

Tab. 2-2: Flüsse des gewählten Systems und ihre Beschreibung.

Fluss	Beschreibung
Import (Güter, Halbzeug, Schrott)	Kupfer, das in die Region in Halbzeugwaren, Gütern oder als Schrott gelangt
Export (Güter, Halbzeug, Schrott)	Kupfer, das die Region in Halbzeugwaren, Gütern oder als Schrott verlässt
mobile Produkte (Input)	die kupfernen und kupferführenden Güter des Prozesses „Mobilien“, die aus dem Handel in den Konsum gelangen
ausgediente Produkte (Entsorgung)	die kupfernen und kupferführenden Güter des Prozesses „Mobilien“, die aus dem Konsum in die Abfallbehandlung gelangen
installierte Leitungen (Input)	die kupfernen und kupferhaltigen Güter des Prozesses „Infrastruktur“, die aus dem Handel in den Konsum gelangen
deinstallierte Leitungen (Rückbau)	die kupfernen und kupferhaltigen Güter des Prozesses „Infrastruktur“, die aus dem Konsum in die Abfallbehandlung gelangen
installierte Bauteile (Input)	die kupfernen und kupferhaltigen Güter des Prozesses „Gebäude“, die aus dem Handel in den Konsum gelangen
deinstallierte Bauteile (Rückbau)	die kupfernen und kupferhaltigen Güter des Prozesses „Gebäude“, die aus dem Konsum in die Abfallbehandlung gelangen
Sekundärkupfer für Handel und Produktion	der Kupferschrott aus dem Konsum nach Stofftrennung, der anschliessend in den Handel oder direkt in ein Schmelzwerk gelangt
Sekundärkupfer zur Deponie	Kupfermenge aus dem Konsum, die nach Stofftrennung nicht handelbar ist und deponiert wird
Produktionsabfälle	kupferführende, nicht handelbare Rückstände der regionalen Produktion in die Deponien („Anorg. Ressourcen“)
Abrasion der Fahrzeugbremsen	abgetragener Kupferanteil der Bremscheiben von Fahrzeugen (andere Emissionen, z.B. aus der Verbrennung von Kraftstoffen, bleiben unberücksichtigt)
Abrasion der Fahrleitungen	Abtrag von den Bahnüberleitungen durch Reibung der Strombügel
run-off von Dächern	Korrosionsabtrag von Blechen und anderen Einsätzen im Aussenbereich

2.2.3.1 Datenerhebung und Datenqualität

Für das Kupferhaushaltssystem (Abb. 2-3) werden die Kupfermengen der zu messenden Flüsse und Lager erhoben und daraus die unbekanntes berechnet. Es wird ausschliesslich der Netto-Kupferanteil der Güter (Halbzeugwaren, Produkte etc.) berücksichtigt, das bedeutet: Bei stofflich zusammengesetzten Gütern und bei Legierungen wird der Kupferanteil aus Gütermenge und „Kupferkonzentration“ berechnet. Datenquellen sind eigene Erhebungen und Literatur (ZELTNER *et al.* 1999; ZELTNER 1998; VON ARX 2006; OZD 2001). Die zur Berechnung des *Status quo* verwendeten Daten beziehen sich auf den Zeitraum zwischen 1995 und 2004.

Zur Auswahl der zu untersuchenden Lager und Abschätzung der notwendigen Erfassungstiefe sind hier die Anforderungen an die Datengenauigkeit eingeschränkt (Grössenordnungen). Da die Literaturdaten nur teilweise Angaben zu ihren Unsicherheiten enthalten, müssen die fehlenden Angaben abgeschätzt werden. Der Unsicherheitsbereich variiert demnach zwischen 5 % und 25 %. Einige wichtige Einflussfaktoren können mit Unsicherheiten $\leq 5\%$ angenommen werden.

2.2.3.2 Erweiterte Systemanalyse zu Aufbau und Zusammensetzung des Ressourcenlagers in den Immobilien

Der grösste Teil der urbanen Kupferlagerstätten (bezogen auf die Masse) wird heute in den Immobilien erwartet, also den Gebäuden und den Infrastrukturbauten – weit mehr als in den Mobilien (BACCINI *et al.* 2003; ZELTNER *et al.* 1999). Überdies ist der Komplexitätsgrad bei der Erfassung der Lager in den Immobilien höher als bei denen der Mobilien und damit methodisch anspruchsvoller: Immobilienobjekte sind in der Regel Auftragsarbeiten des Bauherrn, haben in ihrer Ausführung genau seinen Ansprüchen zu genügen und sind somit bedeutend individueller gestaltet als die überwiegend in Massenproduktion hergestellten Mobilien. Der vermutlich grösste Aufwand und das grösste Potential zur methodischen Entwicklung der Erfassung im angegebenen Sinne liegen damit im Gebäudebestand und in der Infrastruktur, weil hier die grössten Lager, aber zu wenig Daten und hohe Heterogenität zu erwarten sind. Aufgrund prinzipieller Unterschiede in Aufbau und Zusammensetzung werden die Charakteristika der beiden Bauwerksgruppen getrennt behandelt.

2.2.3.3 Erfassung von Hauptstoffen und Spurenstoffen

Bauwerke bestehen im Allgemeinen überwiegend aus mineralischen Rohstoffen, Holz, Metallen und auch Kunststoffen (HÄRIG *et al.* 1996). Trotz der Verschiedenheit der Bauwerke (Gebäude bzw. Infrastrukturbauten) lassen sich die eingesetzten Baustoffe nach ihrem Anteil an der Gesamtmasse in Hauptstoffe und Spurenstoffe unterteilen¹⁸ (gilt entsprechend auch für Mobilien). Einfache Überschlagsrechnungen ergeben, dass Kupfer – wie die meisten Nichteisenmetalle und Kunststoffe – bezogen auf die Gesamtmassen der Bauwerke und der meisten kupferhaltigen Güter weniger als 1 Gew.% ausmacht und damit ein Spurenstoff ist.

Zur gezielten Erfassung von Baustofflagern in den Bauwerken existieren erst seit kurzem Methoden (LICHTENSTEIGER 2006; KOHLER *et al.* 1999; GRUHLER *et al.* 2002; LIPKOW 2001). Diese beschränken sich jedoch auf die quantitativ stark dominierenden Hauptstoffe (Massenrohstoffe) und fehlen für Spurenstoffe (z.B. Nichteisenmetalle) bis heute, obwohl sie qualitativ bedeutend und kostenrelevant sein können¹⁹. Andere Studien untersuchen Spurenstoffe exemplarisch in ausgewählten Teillagern oder Einsatzfeldern bzw. fokussieren auf Stoffflüsse, so dass ihre Lager in diesem Sinne nicht vollständig erfasst sind (OBERNOSTERER *et al.* 1998; ERDMANN *et al.* 2002). Aufgrund der vielfältigen Einsatzfelder der Spurenstoffe innerhalb der nicht tragenden Bauelemente und der damit einhergehenden heterogenen Verteilung und Vielfalt an Bauteilformen ist bei ihnen eine differenziertere Herangehensweise als bei den Hauptstoffen erforderlich. Anhand des Kupfers wird im Folgenden gezeigt, wie man bei der Exploration urbaner Lagerstätten mit Spurenstoffen umgehen kann.

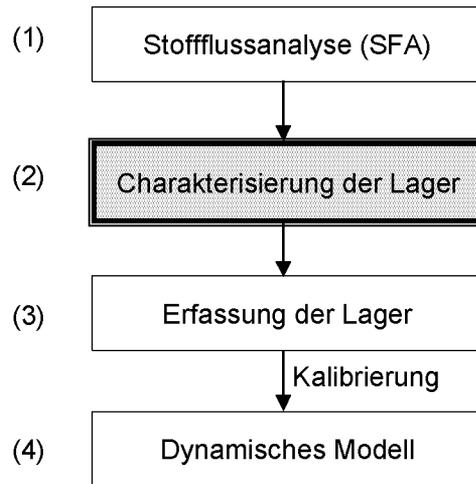
Die diversen Einsatzmöglichkeiten von Kupfer in Bauwerken werden in den Kap. 2.3 (Gebäude) und Kap. 2.5 (Infrastruktur) aufgezeigt und lagerrelevante Grössen angesprochen – erweitert um allgemeine Angaben zum Bauwerksaufbau, soweit zur besseren Einordnung des Kupfers erforderlich. Denn eine detaillierte Aufnahme der stofflichen Zusammensetzung von Einzelbauwerken und mehr noch der Einbezug von Spurenstoffen setzen ausreichende Kenntnisse über den Konstruktionsaufbau, die Struktur²⁰, der Bauwerke voraus. Für die Erfassung des Kupfers in einem bestimmten Einsatzfeld ist es beispielsweise methodisch relevant, ob es rein und feinverteilt ist oder legiert und massiv vorkommt. Da das Einsatzvolumen von Kupfer in bedeutendem Masse von den konkurrierenden Werkstoffen abhängt, werden Substituenten bei den entsprechenden Einsatzfeldern mit angeführt.

¹⁸ Analog zur Definition in der Geochemie werden chemische Stoffe beim Einsatz in Bauwerken mit einem Anteil an der Gesamtmasse grösser 1 Gew.% als Hauptstoffe bezeichnet, solche mit kleiner 1 Gew.% als Spurenstoffe.

¹⁹ „Qualitativ bedeutend“ bezieht sich hier insbesondere auf die Haustechnik, die für die Gebäudenutzung essentiell ist. Auch sind die Erstellungskosten des Ausbaus ähnlich hoch wie die Kosten des Rohbaus, bei Umbauten und Renovationen teilweise gar höher.

²⁰ „Struktur“ nennt man die Anordnung der Teile eines Ganzen zueinander (hier Bauwerksstruktur: Bauteile eines Bauwerk-Individuums).

2.3 Charakterisierung der Lager im Gebäudebereich



2.3.1 Heterogenität des Gebäudebestandes

Gebäude sind Baukörper zum Schutze von Menschen, Tieren oder Dingen vor äusseren Einflüssen. Sie dienen dem Menschen zum Wohnen, Arbeiten, Lagern oder sonstigen Aktivitäten, die in der Regel den individuellen Wünschen des Bauherrn und den örtlichen, klimatischen und finanziellen Randbedingungen genügen müssen (MEYER 1999). Trotz dieser Einschränkungen sind im Einzelfall viele ungleiche Realisierungen für ein Bauvorhaben denkbar, und dementsprechend vielfältig ist die Schar der Gebäude im Gesamtbestand. Die Gebäude einer Gemeinde variieren im Allgemeinen hinsichtlich Grösse, Form, Alter, Nutzung, Lage, Bautechnik und materieller Ausführung, was in technischen und stofflichen Bauvarianten resultiert (RENTZ *et al.* 1994). Aufgrund der Vielzahl der Gebäude gibt es bislang Ähnlichkeiten, selten aber sind zwei Gebäude gleich²¹; in diesem Sinne handelt es sich bei den Gebäuden in der Regel um Unikate (QUACK 1997; GRUHLER *et al.* 2002) und beim Gebäudebestand um deren Sammelsurium. Diese technische und materielle Heterogenität des Gebäudebestandes verhindert eine relativ einfache Bestimmung des Gehaltes an Spurenstoffen. Zur Beherrschung dieses prinzipiellen Problems wird bei der Lagererfassung der Gebäudebestand in geeignete übersichtlichere, da homogenere Teilbestände unterteilt (Kap. A.1.1.2 im Anhang).

2.3.2 Bisherige Studien zur Zusammensetzung von Gebäuden

Bei den Untersuchungen der stofflichen Zusammensetzung von Gebäuden stehen die mineralischen Baustoffe bisher im Mittelpunkt, da sie deren statisches Grundgerüst darstellen und damit mengenmässig deutlich dominieren. Bei einigen Bautypen erlangen Holz (Holzhäuser) oder Metalle (Stahlgerüstbau) einen beachtlichen Materialanteil, doch bezogen auf den gesamten Gebäudebestand ist ihre Bedeutung untergeordnet; das Gleiche gilt für Glas im Fassaden- und Innenbereich (ALBRECHT *et al.* 1984).

Die Bestimmung der materiellen Zusammensetzung von Gebäudebeständen von Regionen oder Ländern ist durch die Vielfalt der Gebäude in Aufbau und Zusammensetzung erschwert (Kap. 2.3.1). Da flächendeckende Erhebungen sehr aufwendig sind, erfolgten sie bisher selten und auf Gemeinde-

²¹ Ausnahme sind Gebäude, denen derselbe Bauplan zugrunde liegt, wie beispielsweise bei Fertighäusern.

ebene. Eine der umfangreichsten Erhebungen untersuchte den Gebäudebestand der Kleinstadt Ettlingen in Deutschland (ca. 3'000 Gebäude), wobei trotz grossem Umfang der Arbeit keine Spurenstoffe²² behandelt werden konnten (BADER, G. *et al.* 2001). Die Untersuchung grösserer Regionen ist – hinsichtlich des Arbeitsaufwands – erst durch den Aufbau von Gebäudemodellen realisierbar (KÖHLER *et al.* 1999; SCHWAIGER 2002; GRÜHLER *et al.* 2002; JOHNSTONE 2001b; LICHTENSTEIGER 2006). Aufgrund der Massenrelevanz und der Hochrechnungsproblematik werden bei den bisherigen Gebäudemodellen fast ausnahmslos die relativ homogen verteilten Hauptstoffe berücksichtigt, hingegen sind die Nichteisenmetalle bisher nur grob, pauschal oder nicht erfasst worden (vgl. Abb. A-1 im Anhang).

Eine zweite Gruppe von Arbeiten untersucht die Zusammensetzung von Einzelgebäuden. Der Grad der Genauigkeit und der Vollständigkeit hängt dabei stark von der Intention der Erfassung ab, ist aber naturgemäss detaillierter als bei der Erfassung eines Gebäudebestandes. Man kann diese Studien in drei Gruppen einteilen:

- a) Zur empirischen Baukostenplanung werden Bauteilinventare für Kostenvergleiche und -prognosen eingesetzt, welche die Gebäude durch hierarchische Gliederung der Bauteile und Arbeitsleistungen nach Gewerkepositionen quasi vollständig beschreiben²³.
- b) Eine ähnliche Genauigkeit streben Ökobilanzierungen an, jedoch mit Schwerpunkt auf den potentiellen Emissionen der Gebäude während und nach der Nutzungsphase (z.B. AMSTEIN UND WALTHERT (1998), MITHRARATNE UND VALE (2004))²⁴. Zwar werden durch die Behandlung der Umweltkompatibilität im Sinne von beispielsweise Umweltbelastungspunkten auch Schwermetalle bei solchen Lebenszyklusanalysen berücksichtigt, doch steht bei ihnen nicht die Vollständigkeit der Bauteilinventare im Mittelpunkt, sondern die Bestimmung derjenigen Bauteile, die wichtige Emittenten darstellen können.
- c) Anwendungsorientierte Untersuchungen zur Durchführung von Gebäudeabriss bzw. -rückbau zielen mehrheitlich auf das ökonomische und organisatorische Optimierungspotential sowie das Ableiten adäquater Behandlungswege. Klassisch wird die Zusammensetzung der Baurestmassen in der Literatur nur für Hauptstoffe untersucht; falls Metalle behandelt wurden, dann pauschal als Stoffgruppe (z.B. BILITEWSKI (1990; 1993)). Differenzierter gehen jene Arbeiten vor, die die Unterschiede zwischen dem üblichen Gebäudeabriss und dem selektiven Rückbau²⁵ untersuchen, indem Gebäudestücklisten erstellt und unter anderem die verschiedenen Metalle aufgrund ihrer Preisunterschiede separat geführt werden (RENTZ *et al.* 1994).

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die Zusammensetzung von Gebäudebeständen und Gebäuden hinsichtlich der Hauptstoffe weitgehend untersucht ist, nicht jedoch hinsichtlich der Spurenstoffe.

²² Es wurden keine Metalle berücksichtigt.

²³ Aufgrund der nationalen Normen und der Preisunterschiede sind solche Kostenplanungswerkzeuge in verschiedenen Ländern separat entstanden, z.B. die Elementkostengliederung der Schweizerischen Zentralstelle für Baurationalisierung (EKG 1995; MEYER 1999) oder die DIN 276 des Instituts für Bauökonomie in Deutschland (WINKLER UND FRÖHLICH 1998).

²⁴ Die ökologische Bewertung eines Gebäudes hängt stark von seiner materiellen Zusammensetzung ab. Da Lebenszyklusanalysen auf den Vergleich zwischen Gebäuden oder Gebäudetypen zielen, werden hierfür reale oder fiktive Einzelgebäude untersucht.

²⁵ Der „selektive Rückbau“ ist eine Rückbautechnik, bei der die verschiedenen Abfälle durch Trennung und Klassierung ihren Materialwert bestmöglich erhalten. Durch den zusätzlichen Erlös der höheren stofflichen Rückbauqualitäten soll der zusätzliche Aufwand gedeckt werden. Zwar ist heutzutage der selektive Rückbau noch nicht gesetzlich vorgeschrieben, doch eine Trennung verschiedener Rückbaufractionen wird bereits heute gefordert.

2.3.3 Aufbau von Gebäuden

Wie die Zusammensetzung von Gebäuden ist auch deren Aufbau sehr unterschiedlich; trotzdem sind allgemeingültige Aussagen zum Gebäudeaufbau möglich. Dieses Kapitel gibt einen Einblick zu den Einsatzfeldern, in denen Kupfer oder seine Substituenten bevorzugt eingesetzt werden. Solche Spurenstoffe werden – primär aus Kostengründen – nie in tragender Funktion eingesetzt. Folglich treten sie in reiner Form vor allem im Ausbau²⁶ und kaum in Rohbau und Fundament auf. Im Ausbau werden zwar geringere Materialmassen als im Rohbau eingesetzt, doch die Vielfalt eingesetzter Materialien ist grösser²⁷.

Die wesentlichen Einsatzfelder des Kupfers werden im Aussenbereich und in der Haustechnik lokalisiert und nachfolgend kommentiert, wobei die entsprechenden Fachbegriffe des Hausbaus eingeführt werden (IP BAU 1993). Aufgrund der vielfältigen Ausbauvarianten kann dieses Kapitel die im Hausbau möglichen Einsatzfelder von Kupfer nicht vollständig beschreiben, sondern bleibt auf die bezogen auf Kupfer häufig vorkommenden oder mengenmässig relevanten beschränkt (dies gilt auch für die nachfolgenden Kapitel). Als im Weiteren unberücksichtigte Ausbuarbeiten mit Metallanteil sind damit namentlich die Schlosserarbeiten (Handläufe von Treppen, Balkongeländer u.Ä.) zu nennen, bei denen Gusseisen das dominierende Metall ist und Kupfer und seine Legierungen ornamental eingesetzt werden, und Beschläge (Schliessmechanik) von Fenstern, Innen- und Aussentüren, bei denen Stahl- und Messingteile eingesetzt werden.

Aussenbereich

Unter Aussenbereich versteht man die Gebäudehülle, also das Dach und die Fassade, die beide das Haus vor Niederschlägen schützen und dabei dem Wind standhalten müssen. Folglich ist für den Einsatz im Aussenbereich eine grosse Korrosionsbeständigkeit erforderlich. Da sich die eingesetzten Materialien im Dach von jenen in der Fassade aufgrund verschiedener hydromechanischer Ansprüche in Reinheit und Form unterscheiden, werden die beiden Bereiche getrennt untersucht.

Dach

Das Dach umfasst (a) die *Bedachung*, (b) die *Dachentwässerung* und (c) *Aufbauten* auf der Dachfläche. Häufig eingesetzte Blechmaterialien sind Kupfer und verzinkte Stahlbleche, seltener verzinnter Chromstahl („Uginox“), Aluminium, Titanzink, Edelstahl und Blei (vgl. Tab. A-19 im Anhang)(KBOB-IPB 2001). Bei der Auswahl der Materialien für die verschiedenen Dacharbeiten wird aus ästhetischen und korrosionschemischen Gründen möglichst nicht mehr als eine Metallsorte eingesetzt; beispielsweise werden bei Dächern mit einer Dachentwässerung aus Kupferblech auch die Metallteile der Aufbauten in Kupfer ausgeführt. Dies gilt für die gesamten Spenglerarbeiten, insbesondere *innerhalb* der Bereiche Bedachung, Dachentwässerung und Aufbauten. Eine Übersicht über die verschiedenen Einsatzfelder in den Teilbereichen des Daches ist in Tab. 2-3 ersichtlich.

Fassade

Zum Schutz vor Verwitterungseinflüssen werden Aussenwände häufig mit Putz oder Klinker verkleidet und nur selten mit Blech. Für die Wahl von Kupfer sprechen vor allem ästhetisch-architektonische Gründe, aber auch sein guter Verwitterungsschutz. Das Kupfer wird in Form von beispielsweise Blechbahnen oder Kupferschindeln vor die eigentliche Fassade gehängt. Sehr selten werden auch Fensterrahmen (z.B. aus Holz) in ähnlicher Weise mit Kupferblech verkleidet²⁸.

²⁶ Unter „Ausbau“ werden hier diejenigen Bauteile verstanden, die durch die Ausbuarbeiten den Rohbau ergänzen. Das sind: Aussen- und Innenputz; Trockenbau, leichte Trennwände, abgehängte Decken, Fussböden, Verkleidungen und Verschalungen an Wänden und Decken; Anstriche; Schlosserarbeiten (ausser statisch notwendige Konstruktionen des Bauwerks); haustechnische Installationen; Spenglerinstallationen.

²⁷ Grund dafür ist die Bandbreite der Funktionen, die der Ausbau zu erfüllen hat.

²⁸ Im Fensterbau werden neben Holz auch Stahl und Aluminium als Rahmenwerkstoffe eingesetzt, nicht aber Kupfer (SEIFERT und SCHLICK 1985).

Tab. 2-3: Übersicht über den Einsatz von Kupfer im Dach: Teilbereiche und Beschreibung ihrer Einsatzfelder.

Teilbereich	Einsatzfelder
Dachentwässerung	<p>Der Niederschlag auf Dächern wird in Dachrinnen gesammelt und in Regenfallrohren abgeleitet. Rinnen und Fallrohre bestehen meist aus Metallblech – vor allem aus Kupfer und verzinktem Eisenblech – und selten aus Kunststoff (PVC). Zur Befestigung sind stabile Rinnen- und Rohrhalter erforderlich, meist aus demselben Material wie Rinnen und Rohre.</p> <p>Die häufigste Rinnenausführung sind vorgehängte halbrunde Dachrinnen, da sie gegenüber den kastenförmigen weniger Neigung zur Entwässerung benötigen (RÖBBERT 1994). Manche Dachformen wie z.B. Sheddächer erfordern eine innenliegende Rinnenausführung. Der Durchmesser des Rohrs bzw. der Rinne und damit die Blechbreite sind von der zu entwässernden Niederschlagsfläche und der Intensität der Regenereignisse in der Region bestimmt.</p>
Aufbauten	<p>Die Bedachung wird je nach technischer Notwendigkeit durch so genannte Exponentien durchdrungen (Schornsteine, Lüftungskanäle, Dachantennen usw.). Zur Einkleidung von Exponentien und zur Einfassung und Abdichtung dieser potentiellen Schwachstellen gegenüber Niederschlägen werden häufig Metallbleche eingesetzt.</p> <p>Eine besondere Art der Dachdurchdringung ist die Dachgaupe²⁹. Zur Nutzung von Dachgeschossen sind Lichteinfall und ausreichende Raumhöhe notwendig, was beides für geneigte Dächer durch den Einbau von Dachgaupen erreicht wird. Bleche werden hier zur horizontalen Bedachung und/oder zur vertikalen Seiten- und/oder Frontverkleidung verwendet.</p> <p>Neben diesen Blecheinsatzfeldern werden auch Blitzschutzanlagen und Schneefanggitter aus Metallen gefertigt. Der „äussere Blitzschutz“³⁰ dient dazu, den Funkenkanal des Blitzes von brennbaren Bauteilen fernzuhalten, indem er den Blitzstrom über metallene Leiter in die Erde ableitet. Hierfür wird das Gebäude nach dem Prinzip des Faraday-Käfigs durch ein Fangleiternetz mit einer Maschenweite von mehreren Metern überdeckt, wobei herausragende Teile wie Kamine, Gaupen etc. durch zusätzliche Fangleiter geschützt werden. Fangleiter und Erdung werden entlang den Gebäudewänden durch Ableitungen miteinander verbunden, die Erder ihrerseits durch eine unterirdische Ringleitung (TRÄCHSEL 1988). Teilweise wird die Verbindung zur Erde über Erdungsplatten hergestellt.</p> <p>Welche Gebäude der Pflicht zur Erstellung von Blitzschutzanlagen unterliegen, ist in der Schweiz kantonal geregelt³¹ (NEERACHER 1988; VKF und VBSF 1993). Sofern diese Pflicht besteht oder ein freiwilliger Blitzschutz installiert wird, hat die technische Ausführung Mindestanforderungen zu erfüllen, sowohl für die Fangleiter und Ableitungen als auch für die Dichte des Maschennetzes (TRÄCHSEL 1988) und die eingeschränkte Wahl der Materialien und ihre Kombination (SEV 1988; STALDER 1988).</p>

²⁹ Synonym zu „Gaupe“ werden in Abhängigkeit des regionalen Sprachraums auch die Bezeichnungen „Gaupe“ oder „Lukarne“ verwandt.

³⁰ Der „innere Blitzschutz“ umfasst alle zusätzlichen Massnahmen, die mögliche Blitzschäden innerhalb der Gebäude verhindern. Wichtigste Massnahme ist der vollständige Potentialausgleich, das heisst die elektrische Verbindung aller metallischen Installationen des Gebäudes. Der innere Blitzschutz wird bei der Erfassung vernachlässigt.

³¹ Für die Blitzschutzpflicht gilt folgender allgemeine Grundsatz (NEERACHER 1988): „Bauliche Anlagen, die zufolge ihrer Lage, Bauart oder Nutzung durch Blitzschlag gefährdet sind oder bei denen Blitzschlag leicht zu grösseren Folgen führen kann, sind mit dauernd wirksamen Blitzschutzanlagen zu versehen.“ Die Auslegung dieses Grundsatzes in der Praxis und die Subventionierung von Blitzschutzanlagen erfolgt jedoch kantonal unterschiedlich.

Teilbereich	Einsatzfelder
Bedachung	<p>Die Bedachung bedeckt und schützt die tragende Dachkonstruktion. Ihre Fläche hängt von der Dachform ab. Mögliche Dachformen sind das Steildach (synonym „geneigtes Dach“; nicht notwendigerweise steil) und das Flachdach. Aufgrund der Niederschlagsmengen werden die Dächer in Mitteleuropa traditionell als Steildächer ausgeführt. Die seit dem 20. Jahrhundert dominanten Dachformen der Steildächer sind das Sattel- und das Walmdach, seltener auch das Pultdach, das Sheddach und das Satteldach mit Krüppelwalm (FRICK <i>et al.</i> 1987). Seit auch Flachdächer befriedigend wasserdicht gebaut werden können (ab ca. 1970), entscheiden vorwiegend ästhetische Gründe über die Wahl der Dachform.</p> <p>Zur Bedachung von Steildächern werden überwiegend Dachziegel eingesetzt, seltener werden Metallbleche verwendet. Neben farblich-ästhetischen Argumenten bietet die Deckung mit Blechen auch gestalterische Vorteile. Zum einen erlauben Metallbleche eine geringe Dachneigung von ca. 3° (bei Ziegeldächern minimal 8°)³². Zum andern erlaubt der Einsatz von Blechen auch speziellere Dachformen wie Runddächer oder gebogene Dächer (PRACT 2001). Zur Bedachung von Flachdächern werden in der Regel Bitumenbahnen eingesetzt, die mit Kiesauflagen fixiert werden (SEKINGER 2004); Kupferbleche sind hier sehr selten.</p> <p>Im Vergleich zur Dachdeckung mit Ziegeln ist das Metaldach im Allgemeinen die aufwendigere Ausführung, was sich auch in den Kosten niederschlägt. Zuweilen sieht man sie als einmalige, langfristige Investition an, da sie bei fachmännischer Ausführung wartungsfrei ist (SCHMITT und HEENE 1996).</p>

Seit Beginn der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts werden repräsentative Bürogebäude zunehmend mit Fensterfassaden versehen, bei denen das Bauglas von einem Metallrahmen umschlossen wird. Neben der ästhetischen-architektonischen Funktion erfordert dieser aufgrund seiner technischen Funktion vom Metall einerseits einen Schutz vor atmosphärischer Korrosion, andererseits genügende statische Eigenschaften. Gegenüber Aluminium wurde die Kupferlegierung Baubronze³³ wegen ihres fünf- bis sechsfachen Preises bisher nur in wenigen Fassaden in der Schweiz eingesetzt, doch mit steigender Tendenz ist Baubronze aus ästhetischen Gründen und/oder wegen der selbst unter Extrembedingungen guten Korrosionsbeständigkeit gefragt (HARTMANN 2002). Aufgrund der hohen Kosten häufen sich Fassadenflächen aus Baubronze in den Finanzzentren wie in London, Berlin, Frankfurt, Düsseldorf und Zürich. Bei manchen Ausführungen der Baubronzefassaden besteht aus Kostengründen nur der äussere Teil des Metallrahmens aus Baubronze, der innere Teil aber aus Aluminium. Eine weitere Anwendung der Baubronze sind Aussentüren oder gewöhnliche Fensterrahmen von Büro- und Wohngebäuden.

Da die Anwendung von Kupfer in der Fassade nur sehr selten auftritt, wird sie bei der Erfassung vernachlässigt.

Haustechnik

Moderne Gebäude werden durch die Haustechnik mit Wasser, Wärme, Strom und „Information“ versorgt und dadurch für die Menschen im gewünschten Masse benutzbar. Die Haustechnik umfasst sämtliche technischen Installationen inklusive Transportanlagen, die in der Summe das Gebäude erst zum Haus machen. Im Einzelnen sind dies die Starkstromanlage, die Telekommunikations- und Sicherheitsanlage³⁴, die Wasser- und Abwasseranlage, die Heizungsanlage sowie gegebenenfalls die lufttechnische Anlage und die Transportanlage (EKG 1995). Diese Installationsanlagen bestehen jeweils aus einer zentralen Baugruppe, die meist in einem Keller- oder Dachraum untergebracht ist, aus den Verteilleitungen (gegebenenfalls plus Rückleitungen) und sonstigen Bauteilen zur Abgabe

³² Durch eine geringe Neigung kann das Dachgeschoss insbesondere in Gemeindebauzonen mit so genannten Zonenreglementen besser ausgenutzt werden, bei denen neben Bebauungs- und Ausnutzungsziffern auch maximale Nutzungsmasse wie Gebäudehöhe und -länge vorgeschrieben sein können.

³³ Anders als der Name vermuten lässt, handelt es sich bei Baubronze um eine Messinglegierung (CuZn40Mn2Fe1).

³⁴ Es handelt sich um die mit Schwachstrom betriebenen Anlagen, im Gegensatz zur mit Starkstrom betriebenen Stromanlage.

des transportierten Mediums. Eine Übersicht über die potentiell kupferhaltigen oder kupfernen Bauteile der genannten Installationsanlagen ist in Tab. 2-4 gegeben, von denen die bedeutendsten im Anschluss erläutert werden.

Tab. 2-4: Potentielle Einsatzfelder für Kupfer in den Installationsanlagen der Haustechnik. Die Bauteile sind für jede Installationsanlage den drei Bereichen *zentrale Baugruppe*, *Verteilleitungen* und *sonstige Bauteile* zugeordnet. Die in dieser Arbeit untersuchten Bauteile sind fett markiert. n.v. = nicht vorhanden.

Installationsanlage	zentrale Baugruppe	Verteilleitungen	sonstige Bauteile
Stromanlage	Haupt- und Unterverteiler Steuer- und Reguliertafeln Verteiler- und Sicherungskästen Photovoltaik	Zuleitung bis Hauptverteiler Haupt- und Steigleitungen Etagenverteilung Leitungen für Potentialausgleich Erdungen	fest installierte Lampen und Geräte Steckdosen
Telekommunikations- und Sicherheitsanlage	Telefonanlage Radio- und TV-Anlage Sonnerie- und Türsprechanlage	diverse Leitungen	Anschlussbuchsen für Apparate
Wasser- und Abwasseranlage	Wasserzähler Roharmaturen Verteilerbatterie	Wasserleitungen mit Fittings Abwasserleitungen	Armaturen zur Wasserentnahme Durchlauferhitzer
Heizungsanlage	Zuführung bzw. Lagerung des Energieträgers Leitung für Energieträger Feuerung Wassererwärmer	Leitungen mit Fittings	Heizkörper
lufttechnische Anlage	Lüftungszentrale Abluftventilatoren Kälteanlage („Klimazentrale“)	Luftkanäle Leitungen mit Fittings	Kälteanlage (Einzelgeräte)
Transportanlage	Aufzüge Rolltreppen	Stromversorgung und Steuerung	n.v.

- Stromanlagen sind über eine Zuleitung an das lokale Verteilnetz angeschlossen, von wo der Strom über die Verteiler- und Sicherungskästen an die verschiedenen Nutzereinheiten in die Räume verteilt wird. Hierfür verfeinert sich das Leitungsnetz sukzessive bis zu den Stromverbrauchern (Lampen, Steckdosen, fest installierte Geräte).
Das dominante Leitermaterial in der Schweiz ist seit langem Kupfer. Vor 1950 wurden wegen hoher Kupferpreise teilweise auch Aluminiumkabel installiert.
- Telekommunikations- und Sicherheitsanlagen umfassen die zentralen Geräte, die Leitungen sowie die Anschlussbuchsen und fest installierten Bedienelemente zur Informationsübermittlung. Darunter fallen die klassische Telefonverkabelung, die Internet- und Netzwerkverkabelung, TV- und Radiokabel sowie Sonnerieanlagen und elektrische Türöffner.
- Wasser- und Abwasseranlagen stellen die Trinkwasserversorgung und Abwasserentsorgung sicher. Das Wasser wird dem Verbraucher an der Messuhr zur Verfügung gestellt, gefiltert und anschliessend an die Wasserentnahmestellen weiterverteilt. Hierzu benötigt es Roharmaturen zur geordneten Einspeisung in die Verteilleitungen, ein Leitungsnetz (Wasserrohre und Fittings) und Armaturen zur Wasserentnahme. Die Abwasseranlage ist kupferirrelevant (in der Regel aus Gusseisen).

Entscheidendes Kriterium bei der Materialwahl der Wasseranlage (Sanitäranlage) ist die Korrosionsbeständigkeit. Bei den Roharmaturen dominiert Rotguss, da Messing vielerorts nicht genügend korrosionsbeständig und Chromstahl teurer ist (WOHLA 2002). Klassische Materialien für das Leitungsnetz sind verzinktes Eisen und Kupfer, die infolge Reparaturen und Erweiterungen in derselben Anlage nebeneinander eingebaut sein können. Bei Neuinstallationen führt der Trend heute deutlich weg von Kupfer hin zu Chromstahl, Kunststoff und Metallverbundrohren, nicht aber bei den Reparaturen (WOHLA 2002). Die hauptsächliche Ursache für diesen Trend ist die bessere Reparierbarkeit und dadurch langfristige Rentabilität von beispielsweise Chromstahlrohren gegenüber Kupfer- und Eisenrohren. Der zur Zeit stattfindende Übergang in der Verbindungstechnik von Löten hin zu Pressen nivelliert die Reparierbarkeit der Materialien und könnte eine Trendumkehr ermöglichen (FAVA 2002). Bei den Armaturen zur Wasserentnahme dominiert verchromter Messing.

Wegen der Interaktionen zwischen den Roharmaturen, Rohren und Fittings bieten die Produzenten bestimmte Produktlinien in Kombination an, die man „Sanitärsystem“ nennt. In der Schweiz existieren diverse Sanitärsysteme verschiedener Firmen³⁵. In der Regel werden pro Gebäude bzw. Bauvorhaben nur Bauteile eines Sanitärsystems eingesetzt. Die Gründe dafür sind (a) die Beschränkung der Garantieleistungen auf reine Systemeinsätze, (b) die Korrosionsgefahr bei der Kombination verschiedener Metalle und (c) die Verfügbarkeit unterschiedlicher Sanitärsysteme und systemspezifischen Spezialwerkzeugs und Know-how bei kleinen bis mittelgrossen Handwerksbetrieben. Je nach Gewichtung der Kriterien bei der Handwerker Auswahl entscheidet man sich also indirekt für eine bestimmte Materialausführung.

- Heizungsanlagen werden nach der Wärmeverteilung, der Wärmeerzeugung und dem Energieträger unterschieden, wobei nur Ersterer den Kupfereinsatz beeinflusst. Bei Zentralheizungen wird die Wärme zentral erzeugt und anschliessend als erwärmtes Wasser über die Heizungsrohre zum Verbraucher transportiert³⁶ (Radiator, Konvektor, Wärmestrahler, Flächenheizung). Die Verteilungsnetze in Wohngebäuden sind heute primär durch die Innengeometrie der Gebäude geprägt, also durch Grösse und Anordnung der Räume (in der ARK-Haus-Methode „Raumprogramm“ genannt (LICHTENSTEIGER 2006)), da stets alle bewohnte Räume beheizt werden. Die Anforderungen an die Korrosionsbeständigkeit sind hier gegenüber jenen bei Sanitäranlagen geringer und die Konkurrenz zwischen den Leitungsmaterialien deswegen schärfer (vgl. Tab. A-22), da das Leitungsnetz quasi geschlossen und dadurch die für eine oxidative Korrosion verfügbare Sauerstoffmenge beschränkt ist.

Der Umfang des Einsatzes an Roharmaturen hängt von der Grösse des versorgten Gebäudes ab, das bedeutet: Grössere Leitungsnetze erfordern neben einer vergrösserten Anzahl von Kugelhähnen, Mischern, Umwälzpumpen, Entlüftern auch einen Einsatz von Rückschlagventilen, Kugelkesselhähnen und gegebenenfalls Thermometern (SPECOGNA 2002). Die Roharmaturen bestehen aus Messing, das ausreichend korrosionsbeständig und günstiger als Rotguss ist.

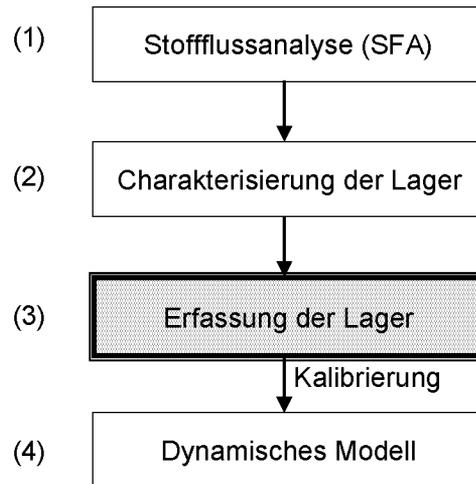
- Lufttechnische Anlagen – auch gekoppelt mit Klimaanlage – bestehen aus einer zentralen Baugruppe, in der die Luft angesaugt und aufbereitet wird, und den Verteilungen, so genannten Luftkanälen aus verzinktem Blech, in denen die Luft zum Zielort befördert wird. Der Lufttransport erfordert Ventilatoren, die mit Elektromotoren angetrieben werden.

³⁵ Technisch werden nur Materialien zugelassen, die die Bedingungen für einen einwandfreien Betrieb gewährleisten. Die Preisunterschiede der Sanitärsysteme machen die Systemwahl daher zu einer primär finanziellen Entscheidung. Eine Übersicht über die gängigen Sanitärsysteme ist in Tab. A-21 im Anhang zu finden.

³⁶ Heute hat sich bei Zentralheizungen Wasser als Medium zur Wärmeübertragung durchgesetzt, doch zu Beginn des 20. Jahrhunderts wurde auch erwärmte Luft dafür genutzt.

- Unter Transportanlagen werden die Einrichtungen zum Personen- oder Sachtransport zusammengefasst (Rolltreppen, Personen- und Lastaufzüge, Küchenaufzüge u.Ä.). Aufzüge erfordern einen Schacht und eine Kabine. Letztere wird über elektronische Tafeln an den Einstiegen und im Innenraum gesteuert, die durch Steuerungsleitungen verbunden sind. Daneben ist eine Stromleitung zum Elektromotor für den Aufzugsantrieb erforderlich.

2.4 Erfassung der Lager im Gebäudebereich



2.4.1 Das ARK-Haus-Konzept

Im Rahmen des übergeordneten Projektes ARK04 wurde ein Vorgehen entwickelt, mit dem das Materiallager in einem regionalen Gebäudebestand (das bedeutet für Siedlungen mit Millionen von Einwohnern) bestimmt werden kann (LICHTENSTEIGER 2006)³⁷. Bei dieser Methode wird der Gebäudebestand über Teilbestände erfasst, die durch Gebäudenutzungstypen beschrieben werden, da die Nutzungsweise einen relevanten Einfluss auf die Materialisierung der Gebäude hat. Die Untersuchung des Spurenstoffs Kupfer in der vorliegenden Arbeit erfolgt komplementär zu den im Projekt behandelten Hauptstoffen³⁸. In Übereinstimmung zur ARK-Haus-Methode werden in der vorliegenden Dissertationsarbeit die Gebäude des schweizerischen Gebäudebestands nach ihrer Nutzung (Wohnen, Arbeiten) und ihrer Grösse (Ein- und Mehrfamilienhaus) unterschieden. Die Unterteilung in die vier Nutzungstypen Einfamilienhaus (EFH), Mehrfamilienhaus (MFH), Dienstleistungsgebäude (DLG) und Produktionsgebäude (PRG) ist der Gebäudestatistik der Schweiz angepasst und erlaubt den Vergleich mit anderen Studien (Tab. 2-5). Andere Unterteilungskriterien wie Baujahr oder Bautechnik³⁹ werden bei der gegebenen Fragestellung nicht für geeignet gehalten. Für jeden Nutzungstyp wird ein fiktives, konkretes Modellgebäude kreiert, ein so genanntes ARK-Haus, das die verschiedenen realen Gebäude per Teilbestand repräsentiert, indem es die durchschnittlichen Gebäudeeigenschaften des Teilbestandes „im Kleinen abbildet“ (Abb. 2-4): Ein

³⁷ Das Projekt ARK04 wurde im Zeitraum 2001 bis 2004 durchgeführt unter der Leitung der Professur für Stoffhaushalt und Entsorgungstechnik der ETH Zürich in Zusammenarbeit mit der gleichnamigen Abteilung an der EAWAG in Dübendorf. Für eine ausführlichere Beschreibung der ARK-Haus-Methode und einen Vergleich mit anderen Materialerhebungsmethoden in Gebäudebeständen siehe die Projektveröffentlichung (LICHTENSTEIGER 2006).

Für die Namensgebung ARK (engl. für Arche) dient die Metapher der Arche (Peter Sloterdijk: Sphären II 1999): „Die Stadt ist gewissermassen die gelandete Arche Noah – sie stellt ein Überlebensschiff dar, das sein Heil nicht mehr im freien Driften auf Katastrophenwassern sucht, sondern sich eigensinnig auf der Erdoberfläche verankert.“

³⁸ Die zur Methodenentwicklung evaluierten Hauptstoffe sind Zement, Kies/Sand, Mergel/Ton und Holz.

³⁹ Der Begriff „Bautechnik“ bezieht sich hier auf den Rohbau und nicht auf den Ausbau.

ARK-Haus ist repräsentativ bezüglich der Grösse und der stofflichen Zusammensetzung und bildet damit das durchschnittliche Lager pro Gebäude dieses Nutzungstyps⁴⁰.

Tab. 2-5: Gebäudetypologie nach der ARK-Haus-Methode (LICHTENSTEIGER 2006). Die vier Nutzungstypen sind durch gebräuchliche Gebäudebezeichnungen und Beispiele beschrieben.

Nutzungstyp	Abkürzung	Beschreibung und Beispiele
Einfamilienhaus	EFH	Einfamilienhäuser, Doppelhäuser, Reihenhäuser
Mehrfamilienhaus	MFH	Mehrfamilienhäuser
Dienstleistungsgebäude	DLG	Gebäude, die durch den Arbeitssektor Dienstleistung genutzt werden (Bürogebäude; Verwaltungs- und Regierungsgebäude, Schulen, Universitäten, Krankenhäuser, Restaurants, Friseure etc.)
Produktionsgebäude	PRG	Produktionsstätten: Industrielle Werke, Lagerhallen Landwirtschaftsgebäude: Wagen- und Geräteschuppen, Silos, Tierställe, Feldscheunen

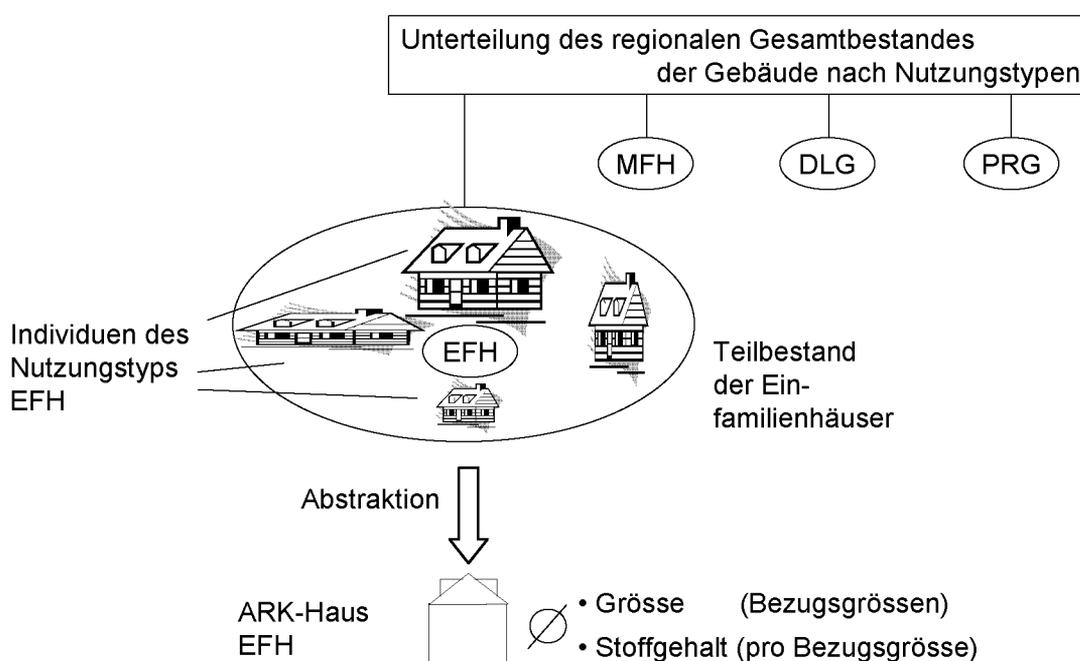


Abb. 2-4: Schematische Darstellung des Vorgehens bei der Bildung der ARK-Häuser am Beispiel des Teilbestandes der Einfamilienhäuser. Der Teilbestand besteht aus den Individuen des Nutzungstyps (hier: EFH) im Gesamtbestand. Das *ARK-Haus EFH* ist Repräsentant des Teilbestandes der Einfamilienhäuser, mit durchschnittlicher Grösse und durchschnittlichem Stoffgehalt (pro Bezugsgrösse⁴¹).

Das Stofflager M eines ausgewählten Stoffes i im Gesamtbestand ist damit die Summe der Stofflager in den vier Teilbeständen (Gl. 1):

Gl. 1:

$$M_{i,\text{Gesamtbestand}} = M_{i,\text{EFH}} + M_{i,\text{MFH}} + M_{i,\text{DLG}} + M_{i,\text{PRG}}$$

⁴⁰ Ein ARK-Haus hat die durchschnittliche Grösse der Gebäude eines Teilbestandes; beispielsweise ist seine Geschossfläche gleich der Geschossfläche des gesamten Teilbestandes dividiert durch die Anzahl der Individuen im Teilbestand. Analog gilt dies auch für seine Geometrie und seine Bauweise: Ein ARK-Haus hat teilweise ein geneigtes Dach, teilweise ein Flachdach; teilweise Aussenwände aus Beton, teilweise aus Ziegelstein usw.

⁴¹ Als Bezugsgrösse, die die Grösse des Gebäudes abbildet, sind grundsätzlich Flächen- oder Volumenangaben möglich. In der Literatur wird neben der Bruttogeschossfläche auch das Gebäudevolumen verwendet.

Zur Berechnung des Stofflagers in einem Teilbestand j bildet man das Produkt aus der Anzahl „Individuen“ im Teilbestand $N(j)$ und der spezifischen Stoffmenge im ARK-Haus $m_{i,j}$ (Abb. 2-5).

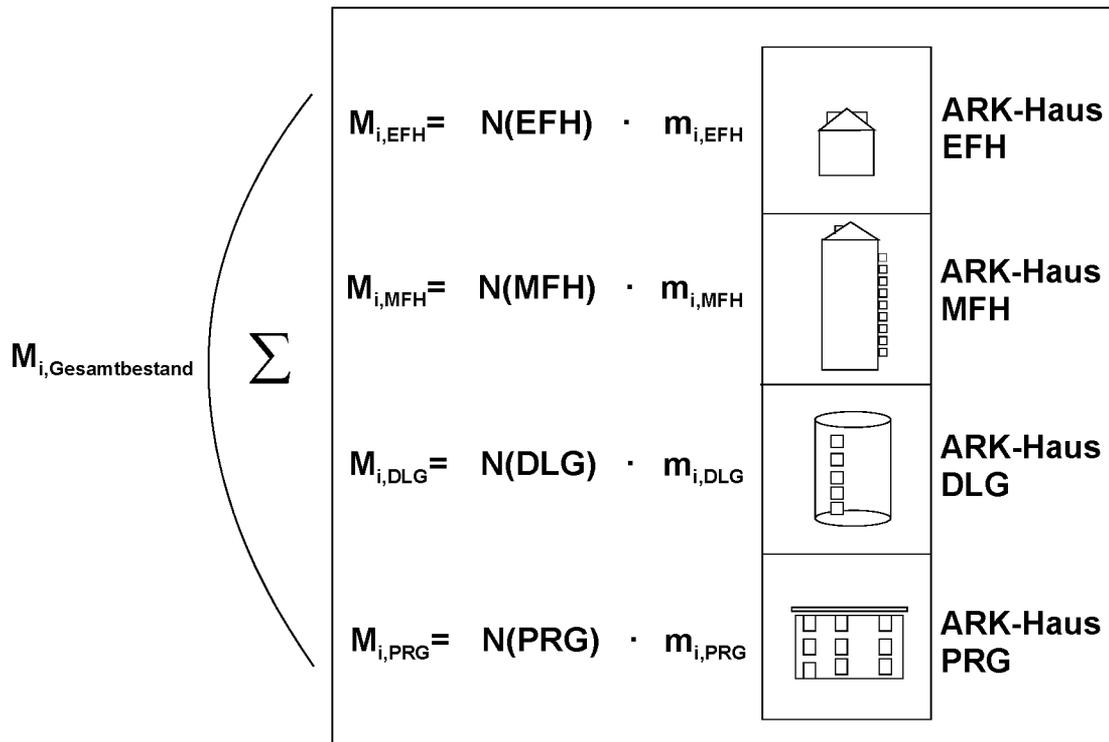


Abb. 2-5: Schematische Darstellung eines Stofflagers (Stoff i) im regionalen Gesamtbestand der Gebäude als Summe der Lager in den 4 Teilbeständen: Jeder Teilbestand ist gegeben durch das Produkt aus der Anzahl „Individuen“ (Gebäude) des Teilbestandes N und der Stoffmenge im ARK-Haus m_i .

Das ARK-Haus-Konzept ist nun für die Anwendung auf Kupfer in dieser Arbeit zu verfeinern, um den Spurenstoffigenschaften ausreichend Rechnung zu tragen.

2.4.1.1 Funktionsbereiche und Produktgruppen

Grundlage für die Bildung der ARK-Häuser sind Kenntnisse über den Kupfereinsatz in Einzelgebäuden. Die systematische Erfassung der Kupfermengen in Referenzgebäuden erfordert eine Gliederung. Gegenstand der Gliederung sind hier all jene Bauteile, die aus Kupfer oder Kupferlegierungen bestehen (Kap. 2.3.3). Mit Hilfe der Voranalyse eines Gebäudes und theoretischen Überlegungen in Anlehnung an die Elementkostengliederung des Zentrums für Rationelles Bauen der Schweiz (EKG 1995) (vgl. Fussnote ²³) werden die Gebäude hierarchisch gegliedert, um den Gebäudeaufbau transparent und vergleichbar zu machen.

Zur Ermittlung der Kupfermengen werden in dieser Arbeit die kupfernen Bauteile der beiden *Bauelemente* (BE) „Dach“ und „Haustechnik“ sukzessive in 5 *Funktionsbereiche* (FB) und 14 *Produktgruppen* (PG) geordnet (Tab. 2-6). Die Funktionsbereiche erfüllen jeweils eine Aufgabe im Gebäude (z.B. Heizung), deren Ausführung und Materialwahl unabhängig sind von denen der anderen Funktionsbereiche. Demgegenüber sind die Materialwahl und die Art der Ausführung der Produktgruppen innerhalb eines Funktionsbereiches im Allgemeinen nicht unabhängig voneinander. Unter dieser Prämisse ist ein modularer Aufbau auf PG-Ebene möglich. Die Ebenen *Bauelement* und *Funktionsbereich* werden nicht zur Erfassung genutzt, erleichtern aber weitere Darstellungsformen der Resultate und deren Diskussion über die PG-Definitionen hinaus⁴².

⁴² Die Hierarchieebenen *Bauelement* und *Funktionsbereich* in dieser Arbeit entsprechen in der Elementkostengliederung der Schweizerischen Zentralstelle für Baurationalisierung den Hierarchieebenen *Elementgruppe* bzw. *Element* (EKG 1995).

Tab. 2-6: Relevante kupferführende Bauelemente und Funktionsbereiche in Gebäuden, mit Zuordnung der zugehörigen untersuchten Produktgruppen.

Bauelement (BE)	Funktionsbereich (FB)	Produktgruppe (PG)
Dach	Dachbereich	Bedachung/Abdeckung Dachrinnen Regenfallrohre Dachgaupen Blitzableiter ⁴³
Haustechnik	Stromanlage	Stromkabel
	Telekommunikationsanlage	Telekommunikationskabel
	Sanitäranlage	Wasserrohre Fittings Roharmaturen
	Heizungsanlage	Heizungsrohre(Verteilung) ⁴⁴ Fittings Roharmaturen Heizungsrohre(Fläche)

Der Umfang der Produktgruppen entspricht den Begriffsdefinitionen der ausführenden Handwerker und der Literatur zu den Gewerken (DANIELS 1996), was mit dem allgemeinen Sprachgebrauch übereinstimmt. Eine Kommentierung der Zuordnungen, auch für zweifelhafte Fälle oder Ausnahmen, findet sich in Kap. A.1.2 im Anhang. Nicht aufgeführte Bauteile aus Kupfer werden aufgrund ihrer Massenirrelevanz vernachlässigt.

2.4.1.2 Kupfergehalte der ARK-Häuser

Die Grundidee zur Berechnung der Kupferlager mittels Kupfergehalten und Bezugsflächen baut auf der ARK-Haus-Methode auf (LICHTENSTEIGER 2006). Der Kupfergehalt ist ein Mass für den Einsatz von Kupfer in Gebäuden. Gemäss der Definition des Stoffgehalts bei der ARK-Haus-Methode ist der *Kupfergehalt eines ARK-Hauses* (KG) gegeben durch den Quotienten von der Masse des eingesetzten Kupfers (m_{Cu}) zur Bezugsfläche (A) (Einheit: [kg Cu/m² Bezugsfläche])(Gl. 2)⁴⁵. Er bezieht sich nicht auf ein reales Gebäude, sondern ist eine abgeleitete Grösse eines fiktiven ARK-Hauses.

Die Kupfergehalte der ARK-Häuser werden mit Erhebungen an ausgewählten spezifischen Gebäuden, so genannten Referenzgebäuden, und aus der Literatur ermittelt. Da sich ARK-Haus und Referenzgebäude im Allgemeinen in der Grösse unterscheiden, wird die Kupfermenge zur Kompensation des Grössenunterschieds auf die Gebäudegrösse bezogen.

Gl. 2: Definition des Kupfergehaltes des ARK-Hauses vom Nutzungstyp j, mit $j \in \{EFH, MFH, DLG, PRG\}$.

$$KG_j := \frac{m_j}{A_j}$$

⁴³ Die Erdung der Blitzableiter wird bei der Erfassung nicht berücksichtigt.

⁴⁴ Gemeint sind Rohrleitungen für den Wärmetransport, nicht für den Transport der Brennstoffe: Gas- und Ölleitungen, häufig auch aus Kupfer, bleiben hier unberücksichtigt.

⁴⁵ Im Folgenden wird zur Wahrung des Leseflusses auf die Indizierung der Massen mit „Cu“ verzichtet. Kupferlegierungen werden gegebenenfalls ausdrücklich gekennzeichnet.

Damit ist also die gesuchte Kupfermasse im ARK-Haus gleich dem Produkt aus seinem Kupfergehalt und seiner Bezugsfläche (Gl. 3).

Gl. 3: Kupfermasse im ARK-Haus vom Nutzungstyp j , mit $j \in \{EFH, MFH, DLG, PRG\}$.

$$m_j = KG_j \cdot A_j$$

Bauelemente und Bezugsflächen

Das spezifische Verteilungsmuster des Spurenstoffs Kupfer (Kap. 2.3.3) in den ARK-Häusern erfordert gegenüber den Hauptstoffen ein verfeinertes Vorgehen mit Anpassungen bei der Erhebung der Kupfergehalte und der Bezugsflächen (vgl. Kap. 2.2.3.3). Hierfür werden die beiden Bauelemente *Dach* und *Haustechnik* separat behandelt. Die Gesamtmasse wird in diese zwei Summanden zerlegt (Gl. 4).

Gl. 4: Grundgleichung der Kupfermasse im ARK-Haus vom Nutzungstyp j , mit $j \in \{EFH, MFH, DLG, PRG\}$.

$$m_j \equiv m_{DA} + m_{HT}$$

Wie nach der ARK-Haus-Methode für Hauptstoffe wird hier für das Kupfer im Bauelement *Haustechnik* die *Bruttogeschossfläche* (BGF)⁴⁶ als Bezugsfläche angewendet. Um den geometrischen Zusammenhängen des gesamten Einsatzes von Kupfer (Kap. 2.3.3) gerecht zu werden, reicht für die Erfassung der unterschiedlichen Einsatzfelder des Kupfers eine Bezugsfläche nicht aus (vgl. (WITTMER *et al.* 2003)). Es ist einsichtig, dass die Kupfermenge im Bauelement *Dach* besser mit der Fläche des Daches korreliert, daher wird für den Kupfergehalt dort als weitere Bezugsfläche die *Dachfläche* (DF)⁴⁷ eingeführt. Durch Einsetzen von Gl. 3 auf Bauelementebene in Gl. 4 folgt:

Gl. 5:

$$m_j = KG_{DA} \cdot A_{DF} + KG_{HT} \cdot A_{BGF}$$

Die Verfeinerung aus Gl. 4 wird zur Bestimmung der Kupfergehalte auf die tieferen Gliederungsebenen ausgedehnt, da die Bauteile aus Kupfer im Gegensatz zu denen aus Hauptstoffen nicht nur planar, sondern daneben auch linear geformt oder komplexer aufgebaut sind (in der Haustechnik grossteils Erfüllung von Transportfunktionen bzw. anderen nicht tragenden Funktionen). Mit der modularen Gliederung in Funktionsbereiche und Produktgruppen (Kap. 2.4.1.1) können die Kupfermassen in den Bauelementen *Dach* und *Haustechnik* hierarchisch in die Summanden auf FB- und PG-Ebene zerlegt werden (Gl. 6 und Gl. 7):

Gl. 6:

$$m_{DA} = \sum_{FB \in DA} m_{FB} = \sum_{FB \in DA} \sum_{PG \in FB} m_{PG} \equiv \sum_{PG \in DA} m_{PG}$$

und analog:

Gl. 7:

$$m_{HT} = \sum_{FB \in HT} m_{FB} = \sum_{FB \in HT} \sum_{PG \in FB} m_{PG} \equiv \sum_{PG \in HT} m_{PG}$$

Somit lassen sich die Kupfergehalte des *Daches* und der *Haustechnik* aus Gl. 5 (Quotienten aus der im Dach bzw. in der Haustechnik eingesetzten Masse zur Dach- bzw. Bruttogeschossfläche) mit Gl. 6

⁴⁶ Die Bruttogeschossfläche ist die Gesamtfläche aller Stockwerke; Flächenberechnung nach SIA 416 (SIA 1993).

⁴⁷ Die Dachfläche ist die Summe aller Ausmasse der nicht vertikalen Flächen zum Schutz des Gebäudes. Aufbauten wie Gaupen werden dabei so weit wie möglich berücksichtigt.

bzw. Gl. 7 als Summe der zugehörigen Kupfergehalte auf FB- und PG-Ebene umschreiben (Gl. 8 und Gl. 9):

Gl. 8:

$$KG_{DA} = \frac{m_{DA}}{A_{DF}} = \frac{\sum_{PG \in DA} m_{PG}}{A_{DF}} = \sum_{PG \in DA} KG_{PG} \quad \text{mit } KG_{PG} := \frac{m_{PG}}{A_{DF}} \quad \forall PG \in DA$$

und analog:

Gl. 9:

$$KG_{HT} = \frac{m_{HT}}{A_{BGF}} = \frac{\sum_{PG \in HT} m_{PG}}{A_{BGF}} = \sum_{PG \in HT} KG_{PG} \quad \text{mit } KG_{PG} := \frac{m_{PG}}{A_{BGF}} \quad \forall PG \in HT$$

Ein Kupfergehalt eines ARK-Hauses wird mit Hilfe der Kupfergehalte von Referenzgebäuden bestimmt. Da diese Messwerte an solchen Referenzgebäuden nicht dem Durchschnitt des Teilbestands entsprechen müssen, handelt es sich um *potentielle Kupfergehalte* (PKG), deren Ausführungen nach ihren Häufigkeiten zu berücksichtigen sind (Abb. 2-6). Die Bildung eines ARK-Hauses erfordert zudem die Anwendung der entsprechenden Bezugsflächen einerseits zur Normierung des Kupfereinsatzes, andererseits zur Verknüpfung der Kupfergehalte der beiden Bauelemente.

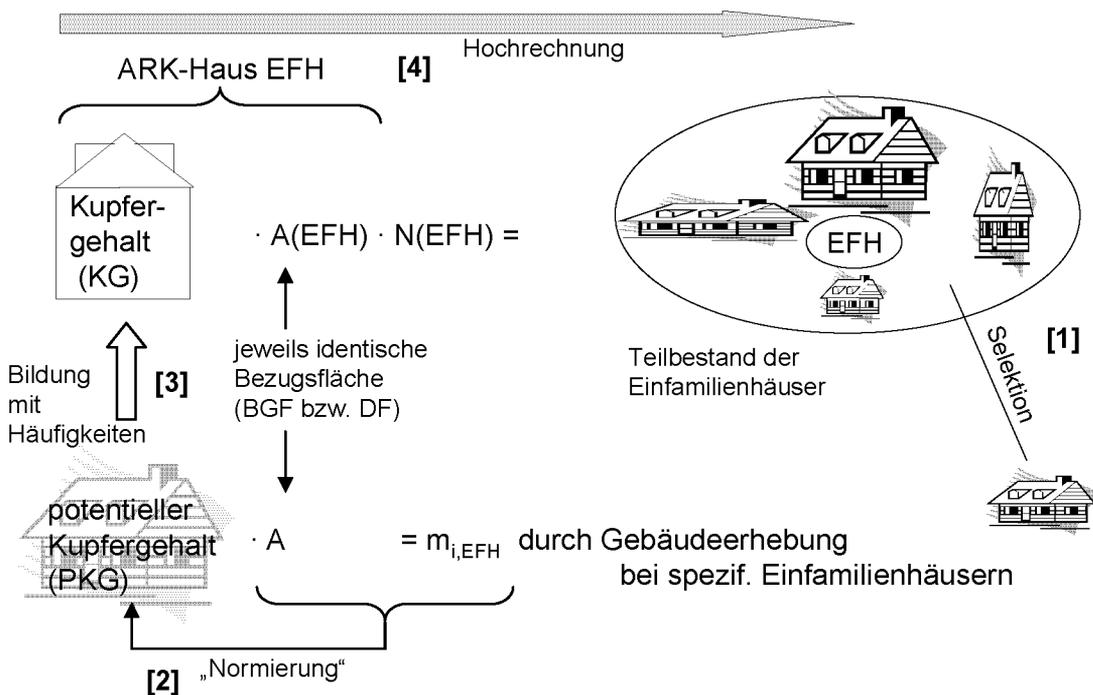


Abb. 2-6: Schematische Darstellung der Bildung eines ARK-Hauses auf der Basis von Einzelerhebungen spezifischer selektierter Gebäude [1] am Beispiel der Einfamilienhäuser (EFH). Durch Normierung der Kupfermasse (m) der Referenzgebäude erhält man die *potentiellen Kupfergehalte* (PKG) [2] (indirekt aus Messwerten berechneter Wert), aus denen mit den Häufigkeiten der Kupferausführungen die *Kupfergehalte der fiktiven ARK-Häuser* (KG) gebildet werden [3]. Die Übertragbarkeit der Kupfergehalte auf die ARK-Häuser erfordert dieselbe *Bezugsfläche* (A) (separates Vorgehen pro Bauelement). Schliesslich wird vom ARK-Haus auf den Teilbestand hochgerechnet (N Objekte) [4].

2.4.1.3 Bezugsflächen der ARK-Häuser

Die physikalischen Einheiten der Kupfergehalte eines Funktionsbereiches oder einer Produktgruppe und der zugehörigen Bezugsfläche sind davon abhängig, welchem Bauelement der Funktionsbereich bzw. die Produktgruppe zugehört. Beim Dach dient als Bezugsgrösse die Dachfläche (DF), bei der Haustechnik ist es die Bruttogeschossfläche (BGF). Mit der Bezugsfläche ändert sich nach Gl. 3 auch die Einheit des Kupfergehalts (Tab. 2-7).

Tab. 2-7: Physikalische Einheiten von Bezugsfläche und Kupfergehalt, in Abhängigkeit von Bauelement bzw. Funktionsbereich (gültig für ARK-Häuser und Referenzgebäude).

Bauelement	Funktionsbereich	Bezugsfläche	Kupfergehalt
Dach	Dachbereich	[m ² DF]	[kg/m ² DF]
Haustechnik	Stromanlage	[m ² BGF]	[kg/m ² BGF]
	Telekommunikationsanlage		
	Sanitäranlage		
	Heizungsanlage		

Zur Hochrechnung auf den Gebäudebestand wird zudem die Anzahl Gebäude per Nutzungstyp $N(j)$ mit $j \in \{EFH, MFH, DLG, PRG\}$ benötigt, welche zusammen mit den Bezugsflächen $A(j)$ (BGF(j) und DF(j)) aus statistischen Daten ermittelt werden (Kap. 2.4.3).

2.4.2 Ermittlung der Kupfergehalte der ARK-Häuser

Die Ermittlung der Kupfergehalte der ARK-Häuser stellt aufgrund der Heterogenität des Gebäudebestandes (Kap. 2.3.1) eine besondere Herausforderung dar. Kaum eine Produktgruppe wird in allen Gebäuden eingebaut und stets in Kupfer ausgeführt. Vielmehr bringt das Zusammenspiel von Nachfrage und Kosten im Allgemeinen diverse Ausführungsvarianten (und entsprechend PKG) hervor, die miteinander konkurrieren und in einem Gebäudeteilbestand koexistieren können.

Für eine statistisch abgestützte Bestimmung der Kupfergehalte der ARK-Häuser (KG) wären die Kupfergehalte sehr vieler Gebäude der Teilbestände nach Gl. 8 und Gl. 9 zu erheben, doch ist dies im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich, da die Datenerhebung an Referenzgebäuden in diesem Umfang zu aufwendig wäre. Die Vielzahl der Kombinationen des Kupfereinsatzes (Kap. 2.3.3) erfordert vielmehr ein massgeschneidertes Vorgehen, das neben der Erhebung *potentieller Kupfergehalte* auch die Kenntnis ihrer *Häufigkeit* miteinbezieht.

Gemäss der in dieser Arbeit adaptierten ARK-Haus-Methode (Abb. 2-6) werden die Kupfergehalte der ARK-Häuser aus den potentiellen Kupfergehalten (PKG), gebildet auf Basis ausgewählter Referenzgebäude, und den Häufigkeiten ihrer Ausführung **auf Ebene der Produktgruppen** (also pro ARK-Haus 14 mal) berechnet (Gl. 10).

Gl. 10:

$$KG_{PG} = PKG_{PG} \cdot \text{Häufigkeiten}_{PG}$$

In diesem Sinne sind die die potentiellen Kupfergehalte und Häufigkeiten bzw. die ihnen zugrunde liegenden Messungen an Referenzgebäuden Zwischenergebnisse zur Bildung der ARK-Häuser (Abb. 2-7).

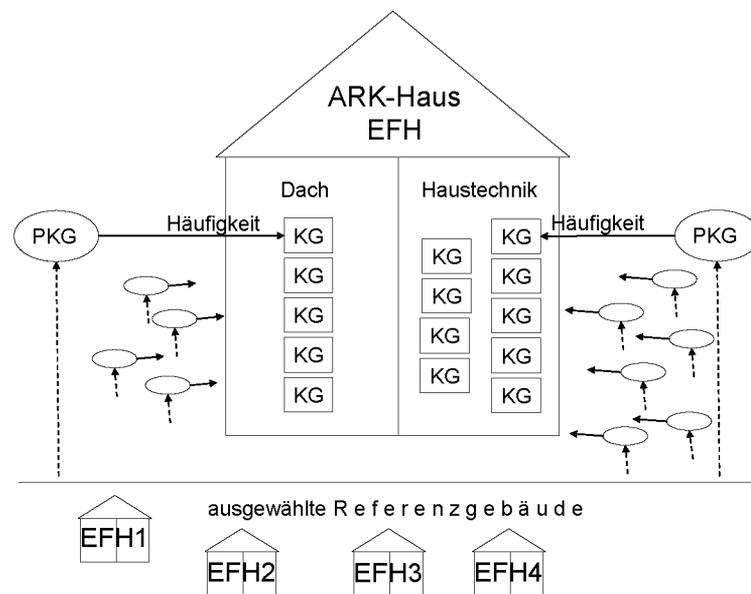


Abb. 2-7: Modulares Vorgehen zur Bildung der Kupfergehalte auf Ebene der Produktgruppen (am Beispiel des ARK-Hauses Einfamilienhaus). Pro ARK-Haus werden gemäss der Gliederung im Dach fünf und in der Haustechnik neun verschiedene Kupfergehalte (KG) bestimmt. Hierzu werden die aus den Messungen in den Referenzgebäuden gebildeten PKG und die Häufigkeiten herangezogen.

2.4.2.1 Potentieller Kupfergehalt von Produktgruppen

In Analogie zum KG der ARK-Häuser ist der PKG als Quotient von der innerhalb der Produktgruppe eingesetzten Kupfermasse m_{PG} zur zugehörigen Bezugsfläche A definiert (Gl. 11 und Gl. 12). Seine Einheit wird je nach Bauelement in $[\text{kg}/\text{Bezugsfläche}]$ angegeben, also für das Dach in $[\text{kg}/\text{m}^2 \text{ DF}]$ bzw. für die Haustechnik in $[\text{kg}/\text{m}^2 \text{ BGF}]$.

Gl. 11:

$$\text{PKG}_{PG} \equiv \frac{m_{PG}}{A_{DF}} \quad \forall PG \in DA$$

Gl. 12:

$$\text{PKG}_{PG} \equiv \frac{m_{PG}}{A_{BGF}} \quad \forall PG \in HT$$

Die Kupfermasse in Referenzgebäuden wird indirekt über *Produktmengen* erfasst, da eine *Wägung* in der Regel nicht möglich ist. Produktmengen eignen sich hierfür (z.B. Produktflächen, Produktlängen, Stückzahlen), da sie enger mit den Ansprüchen an die Produktgruppe korrelieren als ein aggregiertes Produktgewicht. Zudem werden bis auf Ausnahmen alle Stoffmengen von Spurenstoffen im Baugewerbe in dieser Form angegeben. Damit lassen sich Gl. 11 und Gl. 12 faktoriell neu formulieren; die entstehenden Faktoren heissen *spezifische Masse* (sM) und *Installationsdichte* (ID) (Gl. 13 und Gl. 14). Potentielle Kupfergehalte werden stets auf Produktgruppenebene durch Multiplikation von spezifischer Masse und Installationsdichte berechnet.

Gl. 13:

$$PKG_{PG} := \frac{m_{PG}}{\text{Produktmenge}} \cdot \frac{\text{Produktmenge}}{A_{DF}} \equiv sM_{PG} \cdot ID_{PG} \quad \forall PG \in DA$$

Gl. 14:

$$PKG_{PG} := \frac{m_{PG}}{\text{Produktmenge}} \cdot \frac{\text{Produktmenge}}{A_{BGF}} \equiv sM_{PG} \cdot ID_{PG} \quad \forall PG \in HT$$

* Im Gegensatz zum zweiten Faktor ist die Produktmenge im ersten Faktor zur besseren Vergleichbarkeit und Interpretation stets normiert auf 1 Einheit, also „1 m²“, „1 lfm“, „1 Stück“ (je nach Produkttyp).

Zu Diskussionszwecken ist es sinnvoll, die Kupfergehalte von Referenzgebäuden auf höheren Ebenen als der Produktgruppe zusammenzufassen. Dies geschieht analog zum ARK-Haus (Gl. 8 und Gl. 9) durch Summation der Kupfergehalte der Produktgruppen. Der potentielle Kupfergehalt wird dann entsprechend der betrachteten Ebene (Bauelement-, Funktionsbereichebene) mit PKG_{BE} bzw. PKG_{FB} bezeichnet.

Der PKG innerhalb eines Teilbestands wird also aus sM und ID für jede Produktgruppe separat berechnet. Letztere werden ihrerseits aus Messungen bzw. Berechnungen an Referenzgebäuden erhoben (Abb. 2-8). Durch diese Erhebungen an Referenzgebäuden (ausgewählte Gebäude) sollen Größenordnungen und Wertebereiche ermittelt werden, in denen sich die Kupfergehalte der ARK-Häuser bewegen.

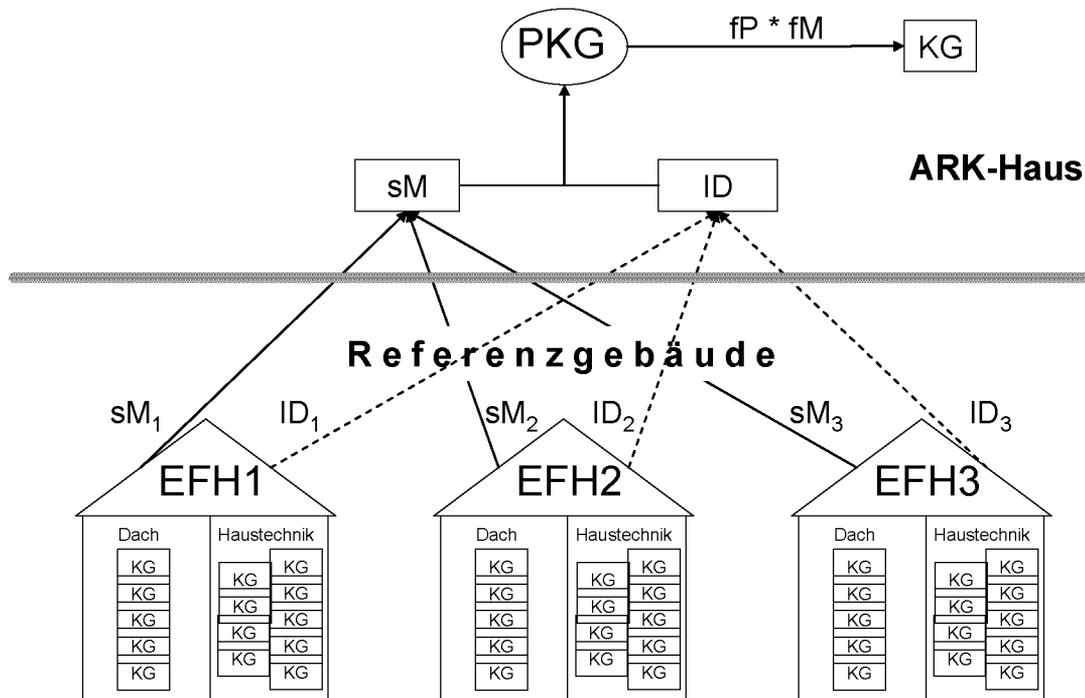


Abb. 2-8: Bildung der spezifischen Masse (sM) und der Installationsdichte (ID) einer Produktgruppe aus Berechnungen und Messungen von sM_i (durchgehende Linie) und ID_j (gestrichelte Linie) an Referenzgebäuden. Aus den beiden berechneten bzw. erhobenen Größen wird der potentielle Kupfergehalt (PKG) im Teilbestand berechnet.

2.4.2.2 Spezifische Masse und Installationsdichte

Die beiden Faktoren *spezifische Masse* und *Installationsdichte* dienen nach Gl. 13 bzw. Gl. 14 der quantitativen Beschreibung des potentiellen Kupfergehaltes. Die Kupfermasse, die innerhalb einer Produktgruppe pro „Produktmenge“ bzw. Produkt eingesetzt wird, nennt man *spezifische Masse* (vgl. Gl. 13 und Gl. 14). Sie ist eine verallgemeinerte „Produkteigenschaft“, da ihr Wert direkt von der technischen Ausführung der Bauteile abhängt. Die *Installationsdichte* einer Produktgruppe gibt als Quotient von Produktmenge zur Bezugsfläche an, wie „dicht“ das Produkt installiert ist (z.B. Heizschlangen) und ist materialunabhängig.

Je nach Produkttyp bzw. Produktgruppe bedeutet *Produktmenge* eine Fläche (Bleche) [m²], eine Länge (Leitungen, Rinnen, Rohre) [lfm] (Laufmeter) oder eine Stückzahl (komplexere Bauteile) [Stück] (vgl. Tab. 2-6). Dementsprechend variieren die semantischen Bedeutungen und physikalischen Einheiten der zugehörigen Wertepaare von spezifischer Masse (sM) und Installationsdichte (ID) produkttypspezifisch (Gl. 13 und Gl. 14)(Tab. A-1 im Anhang): Die sM eines planaren Bauteils wird also ‚pro Quadratmeter Bezugsfläche‘ [kg/m²], eines linear geformten ‚pro Meter Bauelement‘ [kg/lfm] und eines komplexer aufgebauten ‚pro Stück‘ [kg/Stück] angegeben (z.B. 0.04 kg/m für Stromkabel oder 0.5 kg/Stck. für Mischer). Die Einheit der ID hängt zusätzlich aber auch von der Bezugsfläche des Bauelements ab, dem die Produktgruppe gemäss Tab. 2-7 zugehört⁴⁸, das bedeutet die Einheit planarer Produkttypen wird in [m²/m² ‚Bezugsfläche‘] angegeben, jene linearer Produkttypen in [lfm/m² ‚Bezugsfläche‘] und jene komplexer aufgebauter Produkttypen in [Stück/m² ‚Bezugsfläche‘] (Tab. A-1 im Anhang).

Zur Bestimmung der sM und ID in einem Teilbestand werden schliesslich die erhobenen Werte der sM oder ID die Messwerte innerhalb einer Produktgruppe von einem oder mehreren Referenzgebäuden zusammengefasst. Mangels statistischer Erhebungen ist die Einordnung der Referenzgebäude in die Bandbreite der spezifischen Massen und der Installationsdichten problematisch. Daher werden einzelne oder mehrere Erhebungen (sM und ID), als Wertebereich betrachtet, deren relative Breite produktgruppenspezifisch schwankt. Dieser Abstraktionsvorgang kann nicht rigide formuliert werden, denn die knappe Datenlage verlangt für jede Produktgruppe eine individuelle bewertende Behandlung, die die Kenntnisse über bestimmte Ausführungen der Produktgruppe bzw. Funktionsbereiche bestmöglich einbezieht.

2.4.2.3 Häufigkeiten von Produktgruppen

Mit der Berechnung eines potentiellen Kupfergehalts stellt sich die Frage, wie charakteristisch die erhobene Ausführungsvariante für die Produktgruppe im Gebäudebestand ist. Hierzu wird die Häufigkeit bedeutender Ausführungen in Kupfer zweistufig bestimmt:

- 1) Häufigkeit der Produktgruppe (Realisierung) (fP)
- 2) Häufigkeit des Stoffes (Materialisierung) (fM)

Die *Häufigkeit der Produktgruppe* beschreibt den Grad der Realisierung einer Produktgruppe im Teilbestand (Gl. 15); die *Häufigkeit des Stoffes* beschreibt, wie häufig die Ausführung in Kupfer bzw. Kupferlegierungen in Konkurrenz mit anderen Materialien vorkommt (bezogen auf die Zahl realisierter Produktgruppen)(Gl. 16). Die Einheiten der beiden Häufigkeiten sind dimensionslos und haben Werte zwischen 0 (non-existent) und 1 (existent) bzw. zwischen 0 % und 100 %.

⁴⁸ Die Bezugsflächen der Referenzgebäude (A_{DF} und A_{BGF}) sind analog denen in ARK-Häusern definiert.

Gl. 15:

$$fP_{PG} = \frac{\text{Anzahl Gebäude mit realisierter PG}}{\text{Anzahl Gebäude gesamt}} \quad \text{„Häufigkeit der Produktgruppe“}$$

Gl. 16:

$$fM_{PG} = \frac{\text{Anzahl Gebäude mit PG-Material=Cu}}{\text{Anzahl Gebäude mit realisierter PG}} \quad \text{„Häufigkeit des Stoffes“}$$

Durch Bestimmung dieser beiden Grössen pro Teilbestand lässt sich der potentielle Kupfergehalt (Dimensionierung) auf das jeweilige ARK-Haus übertragen (Gl. 17). Zum Beispiel wird durch die Erhebung von Gebäuden mit Dachgaupen, die mit Kupferblechen eingekleidet sind, der PKG_{Gaupen} bestimmt. Anschliessend ist zu ermitteln, wie häufig Gaupen vorkommen (fP_{Gaupen}) und wieviele der Gaupen mit Kupfer bedeckt sind (fM_{Gaupen}) – und nicht mit verzinktem Blech oder Dachziegeln.

Gl. 17:

$$KG_{PG} = PKG_{PG} \cdot fP_{PG} \cdot fM_{PG}$$

Der potentielle Kupfergehalt (PKG) wird durch die Häufigkeiten an die Situation im Teilbestand angepasst. Bei maximalen Häufigkeiten ist der Kupfergehalt des ARK-Hauses (KG) identisch mit dem PKG, also sofern die Produktgruppe in allen Gebäuden realisiert ist ($fP = 100\%$) und Kupfer alleiniges Produktmaterial ist ($fM = 100\%$). Insofern beschreibt der PKG das Potential des Kupfereinsatzes innerhalb einer Produktgruppe und wird deswegen „potentieller“ Kupfergehalt genannt.

2.4.3 Datenerhebung

Spezifische Masse und Installationsdichte

Die spezifische Masse sM_i und die Installationsdichte ID_j werden aus den *Kupfermassen*, den *Produktmengen* und den *Bezugsflächen* in Referenzgebäuden gemäss Gl. 13 bzw. Gl. 14 berechnet. Dabei werden die Kupfermassen und Produktmengen auf der Ebene der Produktgruppen berechnet bzw. erhoben. Hierfür werden verschiedene Typen von Datenquellen herangezogen:

- Gebäudeerhebungen
- Interviews mit Firmenvertretern, Handwerkern und Experten
- Literatur
- eine Rückbauerhebung

Die **Kupfermasse** wird stets aus dem Produktaufbau errechnet, der sich für die im Referenzgebäude eingesetzten Bauteile durch Auskünfte von Handwerkern und Leistungsverzeichnisse ermitteln lässt. Bei Produktgruppen mit sehr unterschiedlichem Aufbau bezüglich der Kupferkomponente werden teilweise zusätzliche Informationen zur Produktbandbreite (z.B. Grösse, Zusammensetzung, Legierungstyp) von Herstellern und Verkäufern oder aus technischer Literatur und Bauteilzeichnungen herangezogen, so dass Abweichungen der Bauteile in den Referenzgebäuden gegenüber dem typischen Produktaufbau erkannt werden. Bei einigen Produktgruppen existieren Vorschriften zum Produktaufbau (beispielsweise Blitzableiter).

Bei Produkten aus Kupferlegierungen wird nur der Kupferanteil berücksichtigt: Für Messing wird CuZn40 als eine der häufigsten Messingsorten zugrunde gelegt und für Rotguss die gängige Legierung G-CuSn6ZnNi.

- 5.45 kg Cu/dm³ Messing entsprechend 61 % Cu
- 7.64 kg Cu/dm³ Rotguss entsprechend 85 % Cu.

Als Hauptdatenquelle für die Installationsdichten werden eigene Gebäudeerhebungen durchgeführt, da bisher keine gezielten und systematischen Erhebungen durchgeführt worden sind.

Mögliche Quellen für **Produktmengen** in Referenzgebäuden sind Rechnungen, Lieferscheine, Architektenpläne und mündliche Angaben von Auftraggebern und ausführenden Handwerkern.

Die **Bezugsflächen** werden vorzugsweise aus den Bauplänen ermittelt, können aber auch aus Gebäudebegehungen (eigene Messung mit Hand-Lasermeter⁴⁹), Auskünfte der ausführenden Architekten, Beschreibung von Bauvorhaben oder Verkaufsprospekte von Gebäuden ermittelt werden.

Da die Dachfläche (DF) bei einer Gebäudebegehung nur in Ausnahmefällen messbar ist, wird sie aus der gemessenen Gebäudegrundfläche plus geschätzten Dachüberhängen und der trigonometrisch bestimmten Dachneigung (α) berechnet (Gl. 18). Dies gilt analog für die Gaupendachfläche.

Gl. 18: Dachfläche

$$DF = \frac{\text{Grundfläche}}{\cos \alpha}$$

Gebäudeerhebungen

Zur Ermittlung möglichst aussagekräftiger sM_i und ID_j werden Messungen in ausgewählten Gebäuden – nach Möglichkeit mit ähnlicher Grösse und Geometrie wie das ARK-Haus – durchgeführt, so genannten Referenzgebäuden, um eine systematische Beeinflussung der Messgrössen durch eine untypische Gebäudegrösse auszuschliessen (vgl. Tab. 2-8). Einschränkend bei der Auswahl sind die Verfügbarkeit der Daten bzw. Datenpaare⁵⁰ und die Zugänglichkeit der Gebäude. Die Erfassung im Bereich der Haustechnik ist durch die Tatsache erschwert, dass die Gewerke in Wohngebäuden von den Handwerkern häufig pauschal installiert und abgerechnet werden und dadurch nicht erfassbar sind.

Zur Erhebung werden aufgrund der erleichterten und verbesserten Datenverfügbarkeit (z.B. Rechnungen, Lieferscheine, mündliche Auskünfte) bevorzugt Referenzgebäude ausgewählt, die in den vergangenen zehn Jahren gebaut oder renoviert worden sind. Eine Übersicht über die erhobenen Gebäude findet sich in Tab. A-2 im Anhang.

Die Auswahl der Referenzgebäude zielt auf mittlere typische ID_j diverser Produktgruppen, welche in der Haustechnik – im Gegensatz zum Dach – nicht an der Gebäudehülle im Vorhinein eingeschätzt werden kann. Es werden aber auch gezielt Extremwerte von ID_j (und damit auch PKG) miteinbezogen wie beispielsweise das Kupferblechdach bei der Bedachung aus Kupfer. Die Extremwerte dienen der Einordnung und der Plausibilitätsprüfung der Messergebnisse und sollen die Grenzen des wahrscheinlichen und möglichen Wertebereichs der Kupfergehalte begründen. Die Extremwerte der ID_j sind technisch, gebäudegeometrisch (Grundrissform), ökonomisch oder aus den Nutzeransprüchen heraus begründet.

In der *Haustechnik* korreliert die ID_j mit der Grösse der Leitungsnetze, hängt also von der Anzahl der Entnahmestellen („Installationstiefe“) und ihrer geometrischen Anordnung („Raumprogramm“) ab: Kleine Zimmer ergeben grosse ID_j und umgekehrt. Aufgrund ihrer Fachkenntnisse und Erfahrungen können die ausführenden Handwerker (Spengler, Elektroingenieur, Elektro-, Heizungs- und Sanitärinstallateur) sowie die Planer, Architekten und Bauherren unter Umständen über die Komfortklasse der Funktionsbereiche die ID_j in den Referenzgebäuden im Vergleich zum entsprechenden Teilbestand einordnen. Je nach *Installationsgrad* können die Installationen eingeteilt werden in „Standard“,

⁴⁹ Leica Geosystems. Disto™ pro⁴.

⁵⁰ Neben der Produktmenge muss jeweils auch die Bezugsflächen (BGF, DF) und/oder die Produktmasse (Kupfervolumen · Stoffdichte) per Produktgruppe ermittelbar sein (vgl. Gl. 13 und Gl. 14).

„Normal“ oder „Komfort“, was bei der Gebäudeauswahl genutzt wird. Die Auswahl erfolgte unter der Prämisse, dass der Einfluss der Installationstiefe über jenen der Raumverteilung dominiert.

Interviews mit Firmenvertretern, Handwerkern und Experten

Neben der oben genannten Einschätzung des Installationsgrades können Handwerker unabhängig von Gebäudeerhebungen übliche Wertebereiche von ID_j (beispielsweise der Heizungsrohre in Flächenheizungen) und Produktaufbau (und damit sM_i) umreissen oder auch die beiden Häufigkeiten (fP, fM) einschätzen. Produkthersteller können detailliertere Angaben zum Produktaufbau und zum Marktanteil der Produkte (fM_{PG}) liefern. Zum Marktanteil wurden auch Experten befragt.

Literatur

In der Literatur sind spezifische Massen möglicher und vorherrschender Produkttypen im Dach und in der Haustechnik dokumentiert (DKI 1999b), jedoch existieren keine Angaben zu Installationsdichten. Wissenschaftliche Gebäudeerhebungen zu Referenzgebäuden erlauben durch Produktmengenangaben linear geformter Bauteile eine nachträgliche ID -Berechnung dieser Produktgruppen, die zum Vergleich bzw. zur Ergänzung eigener ID -Messungen herangezogen werden. In diesem Zusammenhang ist das Gebäudebestandsmodell von GRUHLER *et al.* nennenswert, das die Daten zur Dachentwässerung (Rinnen und Fallrohre) mehrerer EFH zusammenstellt (GRUHLER *et al.* 2002), sowie der sehr umfangreiche Gebäudeatlas für MFH (SCHULZE und WALTHER 1990); im Bereich der Haustechnik stellt der Gebäudekatalog von Görg mehrere Kenngrößen für Wohngebäude zusammen (ausgenommen Rohre von Flächenheizungen)(GÖRG 1997).

Rückbauerhebung

Zwar bietet der Rückbau eines Gebäudes allgemein eine Möglichkeit zur Bestimmung der Baumassen (RENTZ *et al.* 1994), doch die Erfassung von Kupfer erfordert eine Muldentrennung auf überdurchschnittlichem Niveau, bei der auch die kupferrelevanten Rückbaufaktionen gewahrt und messbar bleiben. Durch vereinfachte Zuordnung dieser Rückbaufaktionsmassen zu den wichtigen Produktgruppen erhält man *potentielle Kupfergehalte* des rückgebauten Referenzgebäudes⁵¹, die sich unter Annahme bestimmter spezifischer Massen in Installationsdichten überführen lassen. Ferner lassen sich aus den Massen der Nichteisen-Schrottfaktionen⁵² Einzelaussagen zu den Funktionsbereichen der Haustechnik ableiten.

Häufigkeiten

Die Häufigkeiten fP_{PG} und fM_{PG} werden mit Hilfe von begründeten Schätzungen in Zusammenarbeit mit Handwerkern und durch Zuhilfenahme von Literatur ermittelt. Die Häufigkeiten der Produktgruppen im Dachbereich werden zudem durch eigene Feldbegehungen untersucht (*urban mapping*). Eine statistisch abgestützte Erhebung kann im Rahmen dieser Arbeit allerdings nicht durchgeführt werden, da eine derartige Erhebung sehr zeitintensiv ist.

Wo möglich wird die Häufigkeit fM sinnigerweise für die verschiedenen vorkommenden Materialien komplementär ermittelt; denn durch Kenntnis der Häufigkeiten anderer Materialien als Kupfer erhält man eine Kontrolle zur Kupferabschätzung, was der Fehlerminderung dient (HEDBRANT 2003).

⁵¹ Die Rückbauerhebung wird an der Stromanlage des Gebäudetyps *Dienstleistungsgebäude* (DLG) durchgeführt. Das untersuchte DLG ist das Hauptbürogebäude eines grossen Finanzdienstleisters (Verwaltungszentrum Werd in Zürich), das zu einem kommunalen Verwaltungsgebäude umgebaut worden ist (2003). Dieser Umbau ist im Auftrag des Stadtbauamtes als Pilotprojekt durch ein „Rückbaumonitoring“ begleitet worden, wodurch die Verfolgbarkeit der Entsorgungswege garantiert ist (RUBLI 2003a). In Zusammenarbeit mit dieser Studie erfolgte die Datenerhebung. Die metallische Fraktion wird gemäss Muldenkonzept in Eisen, Aluminium und Kupfer getrennt.

⁵² Die Nichteisen-Schrotte beim Rückbau des Verwaltungszentrums Werd wurden in den fünf Schrottfaktionen *Klimakonvektoren, Elektroverteilkästen, Kabelschrott, Elektromotoren* und *allgemeiner Elektroschrott* erfasst.

Flächendaten für die Nutzungstypen

Über die kumulative Geschossfläche oder Dachfläche des Gebäudebestandes der Schweiz lagen bisher keine Daten vor – weder für den Gesamtbestand noch für Teilbestände. Im Rahmen des ARK04-Projektes sind die kumulativen Bruttogeschossflächen für die vier Teilbestände und die Anzahl der Gebäude pro Teilbestand bestimmt worden und werden in diese Arbeit übernommen (HENSELER *et al.* 2006)⁵³.

Zur Berechnung der Dachflächen werden in dieser Arbeit vereinfachende Annahmen zur ARK-Haus-Geometrie getroffen⁵⁴. Damit sind die Bezugsgrössen BGF und DF der ARK-Häuser bestimmt (Tab. 2-8).

Tab. 2-8: Bruttogeschossfläche und Dachfläche der vier Gebäudeteilbestände der Schweiz: Einfamilienhaus (EFH), Mehrfamilienhaus (MFH), Dienstleistungsgebäude (DLG) und Produktionsgebäude (PRG). Durch Division der Bezugsflächen durch die Anzahl der Gebäude (beides zum Stand im Jahr 2000) erhält man die durchschnittliche Gebäudegrösse der vier Teilbestände. Quelle: ARK04-Bericht (HENSELER *et al.* 2006) und eigene Berechnungen auf Basis desselben.

Bezugsflächen	EFH	MFH	DLG	PRG
Bruttogeschossfläche [10^6 m ²] CH	189	414	207	261
Dachfläche [10^6 m ²] CH	93	134	58	118
Anzahl Gebäude pro Teilbestand (2000)	874'078	586'390	162'559	652'287
Ø Bruttogeschossfläche [m ²] „ARK-Haus“	216	705	1271	401
Ø Dachfläche [m ²] „ARK-Haus“	107	229	358	182

2.4.4 Datenqualität

Die Messungen der Kupfermasse, Produktmenge und der Bezugsfläche liefern relativ exakte Ergebnisse für die sM_i und der ID_j der Referenzgebäude. Schwieriger ist die Übertragung dieser sM_i und ID_j auf die sM und ID der Teilbestände zu bewerten (Abb. 2-8).

Die Qualität der bei der Erhebung gewonnenen Daten ist abhängig von der Datenquelle. Jede der Datenquellen hat ihre Vor- und Nachteile bezüglich Qualität und Verfügbarkeit. Einen Überblick über die Nutzung der verschiedenen Quellen mit Angabe ihrer Datenqualität und Nutzungspräferenzen gibt Tab. 2-9.

Die bei den *Gebäudeerhebungen* gewonnenen Messwerte (Kupfermassen, Produktmengen, Bezugsflächen) beruhen auf verschiedenen, teilweise sehr unterschiedlichen Quellen und entsprechend unterschiedlich ist ihre Datenqualität: Die *Bezugsflächen* lassen sich aus Architektenplänen⁵⁵ und eigenen Messungen auf 1 % genau bestimmen, ebenso die *Produktmenge* aus Leistungsverzeichnissen, Lieferscheinen etc. Die Genauigkeit der Erhebungen der *Produktmengen* und der *Bezugsfläche* ist in der Literatur nicht angegeben. Mit der Annahme einer analogen Gebäudeerhebung wird auch dort der Fehler für beide Grössen auf jeweils 1 % geschätzt. Somit bleibt der Fehler der aus Messwerten berechneten ID nach Fehlerfortpflanzung unter 2 %.

⁵³ Die zentralen Literaturgrundlagen für diese Studie waren die Eidgenössische Volkszählung, die Statistischen Jahrbücher des Bundesamts für Statistik, die Erwerbstätigenstatistik und die Eidgenössische Betriebszählung. *Bruttogeschossfläche* wird hier übereinstimmend mit dem Begriff *Geschossfläche* in der SIA 416 verwendet (SIA 1993).

⁵⁴ Die Berechnung der Dachfläche basiert auf dem von Henseler berechneten Gebäudevolumen pro ARK-Haus (HENSELER *et al.* 2006). Als Form des Gebäuderumpfes (Gebäude ohne Dachgeschoss) wurde ein Würfel angenommen. Weitere Annahmen sind ein Dachüberstand über die Aussenmauern von 0.5 m nach allen Seiten und eine Dachneigung von 30°.

⁵⁵ Architektenpläne sind exakte Vorlagen mit einer Genauigkeit von +/-10 cm. Die Abweichung zwischen Bauplan und Gebäude wird hier vernachlässigt. (Auch bei noch so sauberer Maurerarbeit sind Ungenauigkeiten der Wandausführung unvermeidlich; diese können durch ein Toleranzmass (5 mm) bei der Verkleidung ausgeglichen werden (NEUFERT 1961).)

Tab. 2-9: Rangordnung der Datenqualität verschiedener Datenquellen (1 = gut, 5 = schlecht) nach empirischer Einschätzung (entspricht der Reihenfolge der bevorzugten Wahl). Die *Handwerkerauskunft* schliesst auch Bauherren, Planer und Architekten mit ein. Die Bewertung der sM_{PG} a-b-c bedeutet: (a) Spektrum aller Produkte, (b) dominanter Produktaufbau, (c) Bemessung des Produktes. Nicht ausgefüllte Felder sind bisher nicht zu bewerten.

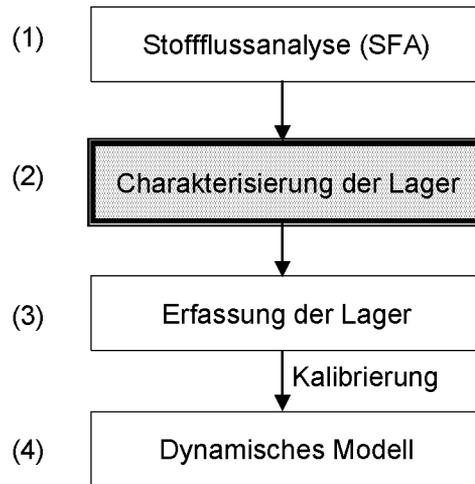
Datenquelle	m_{PG}	Produktmenge	Bezugsfläche	sM_{PG} a - b - c	ID_{PG}	fP_{PG}	fM_{PG}
Gebäudeerhebungen	1	1	1	2 - 3 - 2	1	5	5
Firmenvertreter	-	-	-	1 - 2 - 3	-	-	2
Handwerker	-	-	-	3 - 1 - 1	3	1	3
Experten	-	-	-	- - - - -	-	-	1
Literatur	-	2	3	4 - - - -	2	-	2
Rückbauerhebung	4	-	2	- - - - -	-	-	-
fundierte Schätzung	-	-	-	- - 5 - 5	5	4	4

Bei den längen- und flächenspezifischen Produkten erlaubt bereits die abrechnungsrelevante Produktbezeichnung (Bleche in $[m^2]$, Kabel und Rohre in $[l\text{fm}]$) eine exakte Massenbestimmung (Fehler ca. 3 %). Der Fehler der Massenschätzungen stückspezifischer Produkte ist ca. 50 %. Die Massenbestimmung dürfte zwar auch beim *Rückbau* relativ genau sein (ca. 3 %), doch praktisch treten bei der Muldensammlung oft Verunreinigungen auf (ca. 5 bis 10 %). Da die Zuordnung einer Mulde zur Produktgruppe problematisch ist, beläuft sich der Fehler auf schätzungsweise 15 %.

Die Abstraktion von den berechneten sM_i und ID_j (Referenzgebäude) auf die sM_{PG} bzw. ID_{PG} der ARK-Häuser sind für die verschiedenen Produktgruppen unterschiedlich gut begründet. Zur Bildung von ID_{PG} (und sM_{PG}) für Produktgruppen, die als massenmässig wichtig eingeschätzt werden, werden vermehrt Messwerte erhoben. Trotzdem können auch diese Übertragungen keinen statistisch begründeten Mittelwert liefern, da die Anzahl erhobener Gebäude dafür nicht ausreichend ist. Bei der Bestimmung der sM_{PG} resultiert der Hauptfehler aus der Unsicherheit, welcher Produkttyp durchschnittlich eingesetzt wird. Je nach *Produktgruppe* schwankt daher der Fehler der sM_{PG} zwischen 10 % (z.B. Normrohr) und > 50 % (z.B. Roharmaturen). Nach der Fehlerfortpflanzung dominiert der Fehler der sM_{PG} damit auch den Fehler der PKG. Letzterer bewegt sich also im Bereich von 10 bis 50 %.

Im Weiteren dominieren die meist relativ grossen Fehler der *Häufigkeiten* den systematischen Fehler der KG in hohem Masse. Die Fehler der KG werden auf +/-10 bis 40 % geschätzt (je nachdem, wieviele Gebäude erhoben werden und wie verschieden die Ausführungen innerhalb einer Produktgruppe sind). Die Fehler der KG im Funktionsbereich *Stromanlage* sind geringer aufgrund stark eingeschränkter Substitution.

2.5 Charakterisierung der Lager im Infrastrukturbereich



Seit ca. den 70er-Jahren des 20. Jahrhunderts sind die Siedlungen in Westeuropa bis auf Ausnahmen (beispielsweise Gebirgslandschaften) dicht erschlossen. Solche Gebiete bieten dem einzelnen Gebäude eine Versorgung mit bzw. Entsorgung von benötigten Versorgungsgütern (Materie, Energie, Information): der Transport von Menschen und Waren, die Lieferung von Energie und Wasser, die Ableitung und Reinigung des Abwassers, die Beseitigung von Abfällen und der Austausch von Information. Eine Region benötigt zur Erfüllung der Übertragungsaufgaben in diesen Versorgungsbereichen einen materiellen Unterbau, der die Übertragung der Versorgungsgüter ermöglicht. Der Begriff „Infrastruktur“ umfasst in dieser Arbeit die Bauwerke und Anlagen dieses materiellen Unterbaus.

Die Bauwerke und Anlagen der Infrastruktur verbinden die Gebäude für den Transport der Versorgungsgüter mit den zentralen Ver- und Entsorgungseinheiten (Kraftwerke, Wasserwerke, Kläranlagen, Telefonzentralen usw.)(SIA 1984). Dementsprechend verlaufen sie netzförmig zwischen einerseits den Ver- und Entsorgungseinheiten und andererseits den Gemeinden, Siedlungen bzw. Gebäuden. Dabei sind die Infrastrukturanlagen gemäss den transportierten Versorgungsgütern in Versorgungsbereiche zu gruppieren, z.B. Verkehr, Wasser und Abwasser, Gas, Elektrizität, Fernmeldeanlagen (Tab. A-27). Die netzartig angeordneten Verbindungsleitungen und -anlagen dominieren das Kupferlager in der Infrastruktur, da die zentralen Ver- und Entsorgungseinheiten nicht kupferintensiv⁵⁶ sind und bezogen auf die Region nur punktuell existieren. Charakterisierung und Erfassung der Lager im Infrastrukturbereich sind im Folgenden auf diese Verbindungsnetze beschränkt.

2.5.1 Aufbau von Infrastrukturnetzen

Grundlage der Infrastrukturerschliessung ist das Verkehrsnetz. Zur Erlangung der notwendigen Stabilität werden im Strassen- und Wegenetz mineralische und bituminöse Baustoffe sowie Stahl und Holz eingesetzt; Gleiches gilt für das Schienennetz (Ausnahme: Elektrifizierung der Bahnstrecken). Die anderen Versorgungsbereiche erfordern netzförmige Verbindungsleitungen zur Übertragung der Versorgungsgüter und werden im Folgenden Leitungsnetze genannt. Die Bauausführungen der verschiedenen Leitungsnetze werden aus logistischen Gründen bestmöglich koordiniert, so dass die

⁵⁶ Der Einsatz von Kupfer in Kraftwerksbauten wird gering eingeschätzt, z.B. für Steinkohlekraftwerke 0.2 Gew.% Cu (JENSCH 1988).

verlegten Netzstrukturen annähernd deckungsgleich sind. Dies gilt insbesondere für die arbeitsintensiv erdverlegten Leitungen, aber auch für einen Grossteil der Freileitungen. Da die Leitungen häufig entlang der Strassen und Wege verlaufen, bildet das Verkehrsnetz in erster Näherung die Leitungsnetze ab. Somit wird die Form des Versorgungsnetzes einer Gemeinde massgeblich von den Siedlungstypen beeinflusst (LIPKOW 2001).

Die Infrastrukturnetze sind hierarchisch in mehrere Ver- bzw. Entsorgungsebenen gegliedert: Produktion (ggf.) – überregionaler und regionaler Transport – Groberschliessung – Feinerschliessung – Grundstückerschliessung – Verbraucher (SIA 1984). Jeder Versorgungsbereich verfügt für die Übertragung über ein Leitungsnetz mit einer Struktur und einem Aufbau, die dem Versorgungsgut angepasst sind. Einige Leitungsnetze sind stets unterirdisch verlegt, andere teilweise auch als Freileitung. Die Gründe für die Erdverlegung von Leitungen trotz hoher Kosten sind eine erhöhte Versorgungssicherheit und der Erhalt des Landschaftsbildes.

2.5.2 Die Leitungsnetze

Stromnetz

Die Versorgung einer Region mit elektrischem Strom erfordert die Kette von Erzeugung, Übertragung und Verteilung. In der Schweiz werden die Endverbraucher durch über 900 Energieversorgungsunternehmen versorgt, die sich diese Kette im Allgemeinen aufteilen (GRABER 2003). Die Unternehmen der schweizerischen Elektrizitätswirtschaft sind aus historischen Gründen ihrer Grösse und Aufgaben nach sehr heterogen zusammengesetzt (LIENHARD 1979): Nur wenige von ihnen decken die ganze Versorgungskette ab, die meisten beschränken sich auf die Übertragung und/oder die Feinverteilung. Die grossen Variationen vom Grosserzeuger bzw. internationalem Handelsunternehmen bis zum Kleinversorger (Mühlrad-Kraftwerk, einzelne Gemeinde) bewirken, dass ein Grossteil der Stromerzeugung und der Feinverteilung jeweils in wenigen Unternehmen konzentriert ist (MUTZNER 1995). Strom wird heute unabhängig vom Kraftwerkstyp in grossen Elektrizitätswerken und damit zentral erzeugt (JENSCH 1988)⁵⁷. Anschliessend wird er – aus technischen Gründen als Drehstrom – über grössere Entfernungen zum dezentralen Verbrauch transportiert. Dies gilt insbesondere für die Stauwerke in den Voralpen, die Flusskraftwerke und die Kernkraftwerke, aber auch für die thermischen Kraftwerke, die mit zunehmender Grösse einen höheren Wirkungsgrad erreichen⁵⁸. Die Grösse der Kraftwerke wuchs im 20. Jahrhundert an, bis ihre Blockleistung ca. 1970 ein Optimum erreichte (konventionelle Kraftwerke ~8000 MW, Kernkraftwerke ~1300 MW)(JENSCH 1988). In der Schweiz erfolgt heute das Gros der Stromerzeugung durch ca. 80 Kraftwerke.

Bei der Übertragung und der Verteilung werden vier hierarchische Netzebenen genutzt, die jeweils mit einer Spannungsebene korrelieren und mit den hierarchisch benachbarten Netzebenen durch Transformatoren verbunden sind (Tab. 2-10). Die Kraftwerke erzeugen Strom als Mittelspannung im Bereich von 20 bis 30 kV, doch um die Verluste des Stroms bei der Übertragung gering zu halten, wird er vor der Einspeisung in das *überregionale Verteilnetz* auf Hochspannung (50 bis 150 kV) transformiert, bei grossen Transportdistanzen in das *Überlandnetz* auf Höchstspannung (220 bis 380 kV). Nach der Übertragung wird er zur Verteilung in die *regionalen* und *lokalen Verteilnetze* (10 bis 30 kV bzw. < 1 kV) eingespeist. Die Elektrizitätsverteiler versorgen die Endverbraucher im Versorgungsgebiet mit Niederspannung („letzte Meile“ zu den Haushalten und zum Gewerbe), die industriellen Grossverbraucher auch mit Mittelspannung (MUTZNER 1995).

⁵⁷ Im Gegensatz zur konventionellen Stromerzeugung erfolgt die alternative oft dezentral, z.B. mit Photovoltaikanlagen, Wärmepumpen oder Windkraftanlagen. Bezogen auf den Gesamtverbrauch sind diese Strommengen noch gering; die lokalen Stromerzeugungsanlagen werden daher vernachlässigt.

⁵⁸ Von Beginn an basierte die Schweizerische Stromerzeugung auf Wasserkraft. Erst seit den 70er-Jahren trat mit der Einführung der Kernenergienutzung eine weitere grosse Energiequelle neben die Wasserkraft, so dass heute der Schweizer Strom-Mix zu rund 60 % aus Wasserkraft und 40 % Kernenergie besteht (MUTZNER 1995). Nur ca. 1 % wird mit fossilen Brennstoffen erzeugt, und Wind- und Solarenergie sind trotz Wachstum noch gering in den Stromnetzen vertreten.

Tab. 2-10: Die vier Netz- und Spannungsebenen zur Stromübertragung und Stromverteilung in der Schweiz mit den normierten Übertragungsspannungen (MUTZNER 1995). Bei modernen Elektrizitätsverteilern werden zunehmend die fett markierten Übertragungsspannungen eingesetzt (KÜNG, L. 2003a).

Netzebene (Funktion)	Spannungsebene	Übertragungsspannungen (Nennspannung)
Überlandnetz	Höchstspannung (HöS)	220 kV, 380/400 kV
überregionales Verteilnetz	Hochspannung (HS)	50 kV, 110 kV, 132 kV, 150 kV
regionales Verteilnetz	Mittelspannung (MS)	6 kV, 11 kV, 16 kV, 20 kV, 22 kV
lokales Verteilnetz	Niederspannung (NS)	0.22 kV, 0.38 kV

Stromtransit

Das Übertragungsnetz (Überlandnetz und überregionales Verteilnetz) dient in der Schweiz neben der Grobverteilung vor allem dem Stromtransit: Import und Export der Schweiz erfolgen ausschliesslich über dieses Netz mit 30 grenzüberschreitenden Leitungen (EGL GRID AG 2003). Seine geographisch begründete Schlüsselrolle im Nord-Süd-Stromtransport über die Alpen erklärt die vergleichsweise hohe Dichte des Übertragungsnetzes in der Schweiz. Für den Leitungsverlauf durch das Alpengebiet spricht zudem die ausserordentliche Möglichkeit, Energie im Jahreszyklus in Stauseen zwischenzuspeichern, um sie in Hochpreisphasen wieder zu verkaufen.

Diskrete Übertragungsspannungen

Da die moderne Gesellschaft eine hohe Versorgungssicherheit bei der Stromabgabe erfordert, der elektrische Strom als solcher technisch aber nicht gespeichert werden kann (abgesehen von Stauseespeicherkraftwerken), wurden zur Verbesserung des Gleichzeitigkeitsfaktors und der Reservehaltung Verbundsysteme durch eine Verknüpfung der Netze verschiedener Unternehmen gebildet (JENSCH 1988). Wegen technischer Vorteile beim Stromaustausch sowohl zwischen geographisch benachbarten Netzen als auch zwischen den Netzebenen, werden diskrete „normierte“ Übertragungsspannungen (Nennspannungen) genutzt (Tab. 2-10). Allgemein ist bei Neubau und Leitungserneuerung der Trend festzustellen, dass die Übertragungsspannungen innerhalb einer Spannungsebene mit der Zeit anwachsen, beispielsweise ist geplant, die 50 kV-Netze sukzessive auf energetisch verlustärmere 150 kV-Netze umzubauen.

Leitungsführung

Starkstromleitungen lassen sich aufgrund ihrer Leitungsführung in erdverlegte Kabelleitungen und in Freileitungen unterteilen⁵⁹. Ein Grossteil der Leitungen ist aus Sicherheits- und/oder ästhetischen Gründen im Erdreich verlegt, insbesondere in Siedlungsgebieten (SIA 1984). Allgemein nimmt von niedriger zu hoher Spannungsebene der Anteil der Verkabelung ab: In der Schweiz sind rund 80 % des Mittel- und Niederspannungsnetzes verkabelt, hingegen nur 1 % des Höchstspannungsnetzes (VSE 2003). Die wartungsintensiven Höchst- und Hochspannungsleitungen werden aus Betriebs- und Kostengründen nach Möglichkeit als Freileitung verlegt.

⁵⁹ Kabel sind Stromleitungen mit ein oder mehreren Stromadern, die durch Umhüllung gegen Feuchtigkeit und mechanische Beschädigung isoliert sind. Freileitungen sind frei in der Luft verlaufende Leiterdrähte und erfordern daher keine weitere Isolierung.

Materialisierung

Der Leitungsverlauf beeinflusst die Materialisierung der Leitungen: Für Freileitungen können als Leitermaterial unlegiertes bis schwachlegiertes Kupfer, Aluminium oder die Aluminiumlegierung „Aldrey“ eingesetzt werden (DKI 1992; NEXANS 2004). Für Hoch- und Höchstspannungs-Freileitungen ist Aldrey (E-AlMgSi0.5) das bevorzugte, fast ausschliessliche Leitermaterial, da durch die Gewichtsersparnis eine kostensenkende Vergrösserung der Mastabstände ermöglicht wird. Hingegen bestehen Kabelleiter grösstenteils aus Kupfer und nur selten aus Aluminium⁶⁰.

Strang und Leiterzahl

Die Netzbetreiber geben für die Netzabschnitte branchenüblich statt der Leiterlängen die Stranglängen an. Ein Leitungsstrang besteht aus 3 bis 5 Leitern (Drehstromsystem mit 3 Phasen identischen Leiterquerschnitts/plus Schutzleiter/plus Neutralleiter).

Das Drehstromsystem besteht bei Kabeln aus drei Leitern. Netzkabel müssen neben einer Isolierung vorschriftsmässig zum mechanischen Schutz und Personenschutz eine Armierung aufweisen. Diese kann aus verzinkten Stahlbändern oder -drähten bestehen oder – wie beim Ceanderkabel – als vierter Leiter, so genannter PEN-Leiter, konzentrisch die drei Linienleiter (Polleiter) umgeben, wobei er aus dem gleichen Leitermaterial wie diese besteht und den gleichen Querschnitt aufweist (BRUGG KABEL 1996). Neben diesem Schutzleiter führen manche Kabel auch einen Neutralleiter (Null). Damit existieren für die Drehstromübertragung Einleiter-, Dreileiter-, Vierleiter- und Fünfleiterkabel⁶¹.

Bei Freileitungen besteht ein Drehstromsystem aus drei Leitern. Freileitungsdrähte sind aufgrund andersartiger Leiterumgebung (Isolierung und elektromagnetische Eigenschaften) dünner als Kabelleiter mit gleicher Netzspannung. Kupferdrähte zur Erdung der Freileitungsmasten (Blitzschutz) werden im Folgenden vernachlässigt.

Weitere Leitungsnetze

Die Leitungsnetze *Telefonnetz*, *Stromversorgung von Bahnen*, *Trinkwassernetz* und *Abwassernetz* unterscheiden sich voneinander im Leitungsverlauf und in der Materialzusammensetzung. Eine Beschreibung hinsichtlich charakteristischer Materialeinsätze liefert Tab. 2-11.

Tab. 2-11: Charakterisierung der Versorgungsnetze *Telefon*, *Stromversorgung von Bahnen*, *Trinkwasser-versorgung* und *Abwasser*.

Leitungsnetz	Einsatzfelder
Trinkwassernetz	Das Trinkwasser wird vom Wasserwerk oder der Brunnenfassung in Trinkwasserleitungen zum Verbraucher transportiert, häufig unter Druck. Man unterscheidet Übertragungsleitungen und Verteilleitungen. Die Rohre haben einen Durchmesser im Bereich von 100 bis 1400 mm. Die Leitungsrohre und Fittings bestehen meist aus Gusseisen oder duktilem Guss (Sphäroguss), seltener aus Stahl, Asbestzement (Eternit), verstärktem Beton oder Kunststoffen (PVC, High-density PE)(SVGW 2000; MAYS 1999).
Abwassernetz (Kanalisation)	Das Abwassernetz dient der Entsorgung des Abwassers. Die Abwasserrohre haben grössere Querschnitte als die Trinkwasserleitungen. Sie bestehen oft aus Zementwaren ⁶² oder Gusseisen. Es wird kein Kupfer eingesetzt.

⁶⁰ In der Vorkriegszeit wurden aus Knappheit an Kupfer auch Kabel aus Aluminium, Messing und Stahl verlegt, die noch heute genutzt werden (KÜNG, M. 2003c).

⁶¹ Im MS- und HS-Bereich umgibt die PEN-Ader konzentrisch jeden einzeln verkabelten Leiter, doch da sie nur kleine Ströme transportiert, ist der summierte PEN-Aderquerschnitt trotzdem kleiner als bei einem Dreileiterkabel (KÜNG, L. 2003b).

⁶² Zementwaren sind jene Waren, die mit Hilfe von Zement hergestellt werden, z.B. Beton oder Zementmörtel.

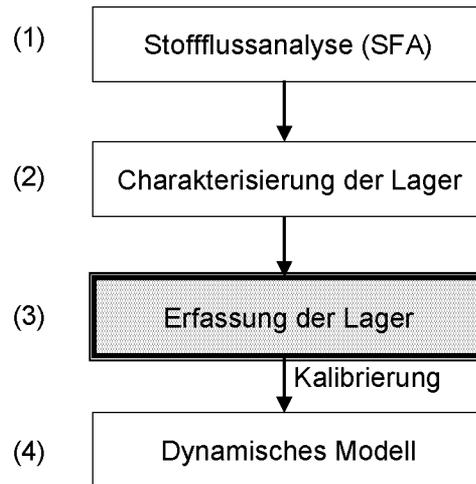
Leitungsnetz	Einsatzfelder												
Telefonnetz	<p>Das Telefonnetz der Schweiz wurde von dem Unternehmen „swisscom“ unter der Vorgabe eines flächendeckenden <i>service public</i> aufgebaut⁶³, weswegen auch die kleinen Gemeinden, Weiler und gar Alphütten mit Anschlüssen versorgt sind. Das Netz der „swisscom“ zählt über 3.6 Mio. Analoganschlüsse und 0.5 Mio. ISDN-Basisanschlüsse (Stand 1999) und umfasst einige Hundert Anschlusszentralen (CONRAD und TESTER 2001).</p> <p>Zur Telefonie in der Schweiz werden die drei Leitungsebenen Fernnetz, Regionalnetz und Anschlussnetz („letzte Meile“) mit jeweils unterschiedlicher Übertragungstechnik miteinander kombiniert. Zur Informationsübertragung (Signale, Daten) werden als Übermittlungskabel die drei Kabeltypen <i>Fernmeldekabel</i>, <i>Koaxialkabel</i> und <i>Glasfaserkabel</i> eingesetzt.</p> <p>Übersicht über den Einsatz (+) der Kabeltypen in den beiden Leitungsebenen:</p> <table border="1" data-bbox="512 703 1430 880"> <thead> <tr> <th data-bbox="512 703 820 745">Kabeltypen</th> <th data-bbox="820 703 1123 745">Fern- und Regionalnetz</th> <th data-bbox="1123 703 1430 745">Anschlussnetz</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td data-bbox="512 745 820 788">Fernmeldekabel</td> <td data-bbox="820 745 1123 788">+</td> <td data-bbox="1123 745 1430 788">+</td> </tr> <tr> <td data-bbox="512 788 820 831">Koaxialkabel</td> <td data-bbox="820 788 1123 831">+</td> <td data-bbox="1123 788 1430 831">-</td> </tr> <tr> <td data-bbox="512 831 820 880">Glasfaserkabel</td> <td data-bbox="820 831 1123 880">+</td> <td data-bbox="1123 831 1430 880">+</td> </tr> </tbody> </table> <p>Bei Betrachtung des Anschlussnetzes fällt auf, dass die Teilnehmer per Fernmeldekabel an die Anschlusszentralen angeschlossen sind und nur selten mit Glasfaserkabel (CONRAD und TESTER 2001). Das Fernmeldekabel und das Koaxialkabel verwenden Kupfer zur Signalübertragung, das Glasfaserkabel hingegen so genannte optische Fasern (PRIM <i>et al.</i> 1997).</p>	Kabeltypen	Fern- und Regionalnetz	Anschlussnetz	Fernmeldekabel	+	+	Koaxialkabel	+	-	Glasfaserkabel	+	+
Kabeltypen	Fern- und Regionalnetz	Anschlussnetz											
Fernmeldekabel	+	+											
Koaxialkabel	+	-											
Glasfaserkabel	+	+											
Stromversorgung von Bahnen	<p>Die Schweiz hat ein dichtes Verkehrsnetz und im Vergleich zu anderen europäischen Ländern einen hohen Anteil an öffentlichen Verkehrsmitteln. Der mit Abstand bedeutendste Bahnnetzbetreiber ist die Schweizerische Bundesbahn⁶⁴, gefolgt von kleineren kantonalen Betreibern. Die Tram- und Trolleybuslinien⁶⁵ werden von städtischen Verkehrsunternehmen betrieben.</p> <p>Praktisch alle Bahnlinien in der Schweiz sind elektrifiziert (99.4 %)(KOMMUNIKATION SBB 2001), hinzu kommen die Tram- und Trolleybuslinien. Die Stromversorgung dieser Strecken erfolgt durch Oberleitungen. Zur Stromabnahme der Antriebswagen der Bahnen und Trams ist pro Gleis ein kupferner Fahrdrat erforderlich, der durch ein Drahtnetz in der erforderlichen Höhe fixiert ist.</p> <p>Der Fahrstrom der Bahnen und Trams wird auf die Schienen abgeleitet; für die Trolleybusse ist pro Fahrtrichtung eine zweite Oberleitung zur Stromableitung erforderlich. Wo die Schienen nicht lückenlos verschweisst sind, wird die Leitung durch kupferne Stoss-, Quer- und Überbrückungsverbinder hergestellt. Dies ist jedoch nur in 4 % der Gleislänge der Fall (KOMMUNIKATION SBB 2001). Zudem sind Signalleitungen zur Übertragung der Sicherheitssignale verlegt.</p>												

⁶³ Seit wenigen Jahren bietet „cablecom“, der grösste Netzbetreiber für Kabelfernsehen, auch Telefondienstleistungen an. Der Kabelanschluss beim Endkunden erfolgt als Koaxialkabel. Dieses Netz wird nicht berücksichtigt.

⁶⁴ Gemäss einer Kurzstudie des Bundesamtes für Energie wickelt die Schweizerische Bundesbahn ca. 90 % des Bahnbetriebes der Schweiz ab (BRUNNER, C.U. 2001).

⁶⁵ Synonym zu „Trolleybus“ wird in Deutschland der Begriff „Oberleitungsbus“ verwandt.

2.6 Erfassung der Lager im Infrastrukturbereich



Leitungsnetze

Das Kupferlager in der Infrastruktur besteht gemäss Kap. 2.5.2 aus den drei kupferrelevanten Infrastrukturnetzen *Starkstrom*, *Telekommunikation* und *Transport*. Die Netzstrukturen erlauben ein paralleles Vorgehen für die drei Leitungsnetze, bei dem die Kupfermasse als Produkt von Leitungslänge, Leitungsquerschnitt und Materialdichte (ρ_{Cu}) berechnet wird (die Legierungsanteile im Kupfer werden im Weiteren vernachlässigt). Da innerhalb eines Netzes die Leiterquerschnitte⁶⁶ auf den einzelnen Netzstrecken beträchtlich variieren, ist das Leitervolumen gegeben durch die Summe der Volumina aller n Teilabschnitte mit unterschiedlichen Querschnitten. Diese Volumina werden jeweils ermittelt als Produkt der Leiterlängen l_i und der Leiterquerschnitte A_i bzw. indirekt durch die Leiterdurchmesser d_i (Gl. 19).

Gl. 19

$$m_{\text{Netz}} = \rho_{Cu} \cdot \sum_{i=1}^n (A_i \cdot l_i) = \rho_{Cu} \cdot \sum_{i=1}^n \left(\pi \left(\frac{d_i}{2} \right)^2 \cdot l_i \right)$$

Die folgenden Kapitel erläutern die Erfassung der Querschnitte und der Leitungslängen in den drei ausgewählten Infrastrukturnetzen mit Schwerpunkt auf dem Stromnetz (Kap. 2.6.1), da dort die im Vergleich zum Telekommunikationsnetz (Kap. 2.6.2) und der Stromversorgung von Transportnetzen (Kap. 2.6.3) grösseren Kupfermengen vermutet werden.

Die Netzknoten (z.B. Trafoanlagen) spielen bezogen auf die Kupfermasse eine untergeordnete Rolle (FRISCHKNECHT und SUTER 1995) und werden folglich bei der Erfassung vernachlässigt, sofern nicht anders angegeben.

⁶⁶ Der „Leiterquerschnitt“ ist der kumulative Querschnitt der Leitungen (je nach Funktionsbereich gleichbedeutend mit „Kabelquerschnitt“ oder „Leitungsquerschnitt“).

2.6.1 Starkstrom

2.6.1.1 Vorgehen

Da wegen einer stark zersplitterten Betreiberstruktur keine verlässlichen Daten zu den Leiterlängen und -querschnitten und den Leitermaterialanteilen des schweizerischen Stromnetzes existieren⁶⁷, ist eine einfache Abschätzung der Kupfermengen nicht möglich (BRUGG KABEL 1996). Die erforderlichen Messgrössen sind gemäss Gl. 19 folgende: *Stranglänge*, *Strangquerschnitt*, *Verlegeart* und *Materialwahl*. Jede dieser Grössen erfordert die getrennte Beachtung der vier Netzebenen Höchstspannung (HöS), Hochspannung (HS), Mittelspannung (MS) und Niederspannung (NS), da Verlegeart, Materialwahl und Querschnitt von der Netzebene abhängig sind. Das Produkt von Länge, Kupferanteil, Querschnitt und Kupferdichte ergibt die gesamte Kupfermasse (Abb. 2-9).

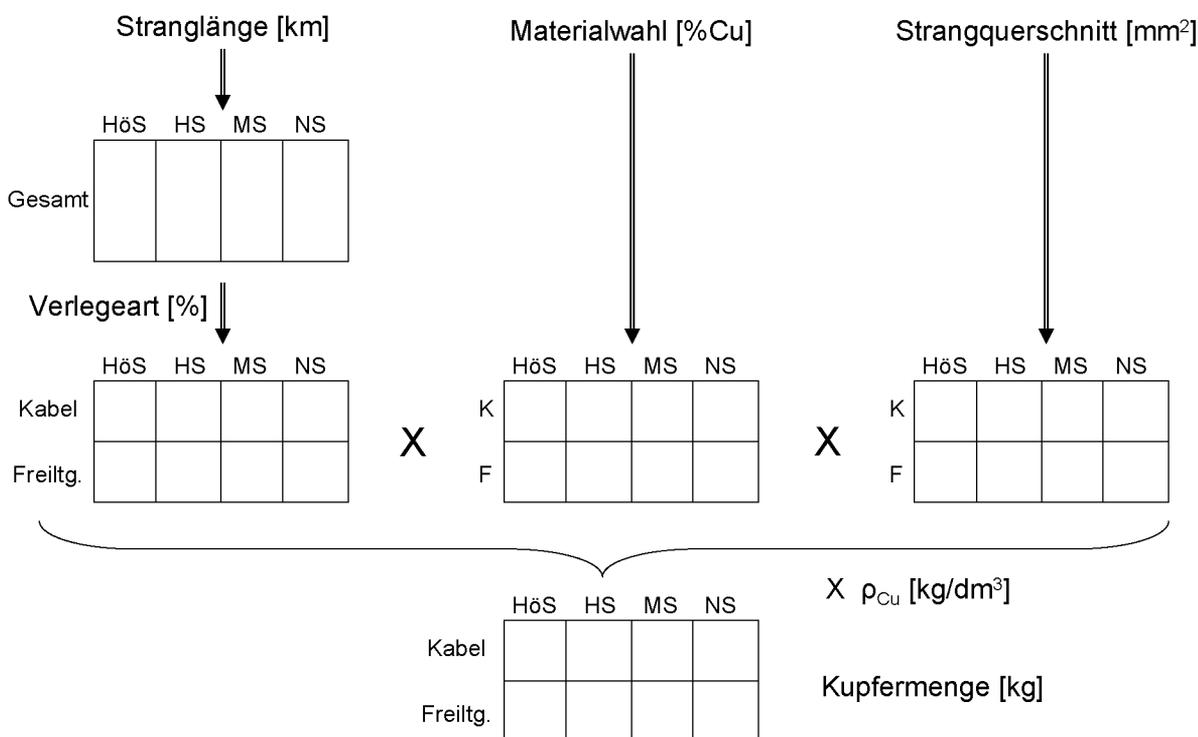


Abb. 2-9: Vorgehen zur Ermittlung der Kupfermenge im Stromnetz der Schweiz. Die Gesamtstranglänge der vier Netzebenen Höchst- (HöS), Hoch- (HS), Mittel- (MS) und Niederspannung (NS) wird nach Verlegeart unterteilt. Jedem Strangabschnitt werden durch die Materialwahl ein Kupferanteil und mit dem Strangquerschnitt ein Volumen zugeordnet.

Bei der Erfassung des Stromnetzes werden die Hausanschlüsse und die öffentliche Beleuchtung nicht berücksichtigt, da ihre Kupfermengen gering sind. Stichproben ergaben, dass ihre Kupfermenge am gesamten Netz jeweils 2 bis 5 % ausmachen.

⁶⁷ Gemäss dem Elektrizitätsgesetz ist das Eidgenössische Starkstrominspektorat (ESTI) die Kontrollstelle für Schwachstrom- und Starkstromanlagen. Sämtliche Starkstromleitungen mit Spannungen grösser 1 kV werden durch das ESTI in Planvorlagen genehmigt und sind damit erfasst. Die vorhandene Datenstruktur erlaubt allerdings keine Auswertung von Netzlängen, vor allem, weil erneuerte Teilstücke nicht konsequent ausgetragen werden und folglich mehrfach enthalten sein können (MARTY 2003).

2.6.1.2 Quellen und Erhebung

Die Stromnetzbetreiber sind per Verordnung angehalten, „Leitungsarchive“ mit Leitungs- und Trassenplänen⁶⁸ bereitzuhalten, die die Teilabschnitte der Anlagen hinsichtlich Länge, Netzspannung und Verlegeart dokumentieren (EleG 1994). Allerdings sind diese Leitungsinformationen wegen des hohen Arbeitsaufwands nur teilweise in Betriebsstatistiken bilanziert. Aufgrund der Notwendigkeit für anfallende Erneuerungs-, Betriebs- und Wartungsarbeiten sind dies vorzugsweise die Längen per Netzebene und/oder per Verlegeart, nicht aber per Strang-/Leiterquerschnitt oder per Materialwahl⁶⁹. Abgesehen vom Höchstspannungsnetz, das von einer kleinen Gruppe von Elektrizitätswerken betrieben wird, existieren auf nationaler Ebene keine verlässlichen Netzangaben. Der Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen kann ausreichende Angaben zu den Stranglängen und Informationen über die Leitungsführung der Höchstspannungsleitungen angeben. Für die anderen Netzebenen (HS, MS und NS) werden eigene Erhebungen bei sechs Netzbetreibern durchgeführt, die nach folgenden Kriterien ausgewählt wurden:

- typische Siedlungsstruktur im abgedeckten Gebiet (städtisch bzw. ländlich)
- relevante Grösse des Unternehmens
- Verfügbarkeit einer geeigneten Datenstruktur
(vor allem Stranglänge, aber auch Verlegeart und Querschnittsverteilung)

Stranglänge

Zur Abbildung des Stromnetzes werden *Stranglängen* von Stromnetzen ausgewählter Netzbetreiber erhoben und mit einem flächen- sowie einwohnerbasierten Ansatz gewichtet auf die gesamte Schweiz übertragen. Die Grösse eines Stromnetzes, seine Stranglänge, korreliert einerseits mit (a) der *zu versorgenden Fläche*, andererseits (b) der *Anzahl der Einwohner*. Darauf aufbauend werden zwei so genannte Netzdichten ermittelt (Abb. 2-10):

- a) die *Flächennetzdichte* (ND_A):
Quotient von Stranglänge zur versorgten Fläche
- b) die *Einwohnernetzdichte* (ND_{EW}):
Quotient von Stranglänge zur Anzahl versorgter Einwohner

Um den siedlungsstrukturabhängigen Unterschieden Rechnung zu tragen, werden die Netzdichten für Gebiete mit unterschiedlicher Netzstruktur (*städtische oder ländlich-kantonale Gebiete*⁷⁰) getrennt bestimmt, indem man jeweils mehrere Netzbetreiber gleicher Siedlungsstruktur zusammenfasst und mittelt (Netzdichte „ ND_A “ über die Flächen bzw. „ ND_{EW} “ über die Einwohner)(Abb. 2-10).

Anschliessend wird durch Gewichtung von städtischen bzw. ländlichen Gebieten die Siedlungsstruktur der Schweiz geschätzt, um damit gesamtschweizerische Netzdichten zu bestimmen (Tab. 2-12). Schliesslich erhält man durch Multiplikation mit dem entsprechenden Hochrechnungsfaktor die Stranglänge der Schweiz („via Fläche“ bzw. „via Einwohner“).

⁶⁸ Trassen sind insofern wichtig, als sie die Geometrie des Stromnetzes definieren und damit auch die lokale Verfügbarkeit und den Raumanspruch bestimmen. Eine Trasse kann mehrere Leitungsstränge parallel führen, die bei der weiteren Stromverteilung aufgetrennt werden.

⁶⁹ Nur einzelne fortschrittliche Leitungsnetzbetreiber führen aus internen energieoptimierenden Gründen ein massenorientiertes Rohstoffinventar, beispielsweise die Elektrizitätswerke Zürich (EMCH 2003). Eine mögliche Datenquelle für künftige Stranglängen- und Materialerfassungen ist das national standardisierte Netzinformationssystem, das sich zur Zeit im Aufbau befindet (CKW 2003; JÄGER 2003).

⁷⁰ Eine scharfe Abgrenzung „städtischer“ und „ländlich-kantonalen“ Gebiete im angestrebten Sinn ist nicht möglich, da die Verwaltungsgrenze der Stadt nicht scharf mit den Netzdichten korreliert. Gemäss den verfügbaren Daten sind es jene Gebiete, die Netzdichten gleich oder ähnlich jenen in grossen schweizerischen Städten aufweisen (z.B. Zürich, Basel, Bern). Vororte dieser Städte gehören also teilweise dazu; ländlich-kantonal umfasst die übrigen Regionen, also auch grosse Teile des Mittellands und der Bergregionen.

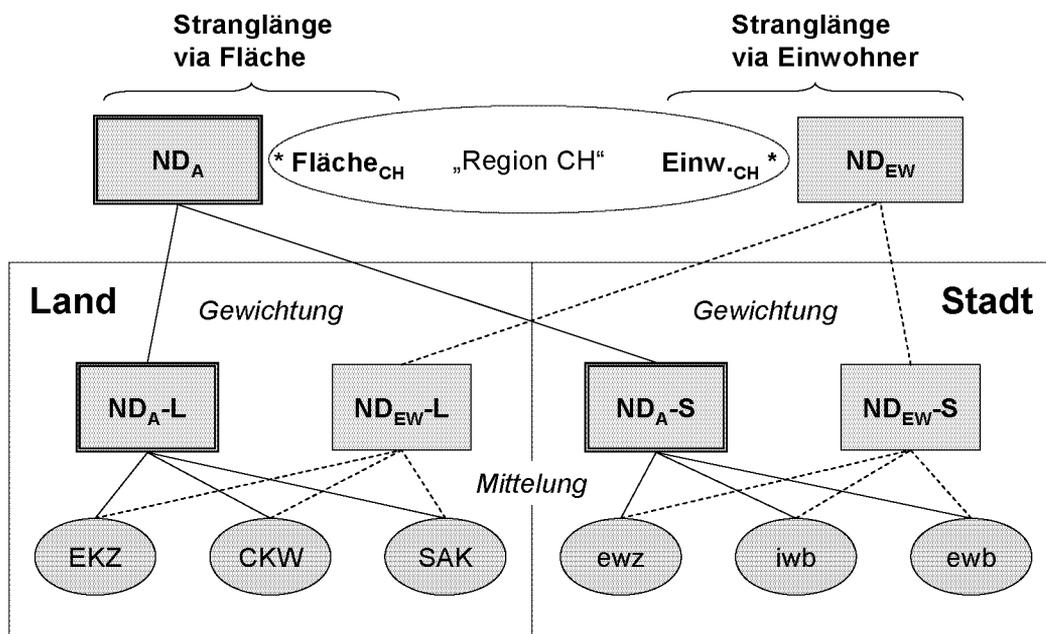


Abb. 2-10: Vorgehen zur Ermittlung der Stranglänge der gemischt besiedelten Region Schweiz. Durch Erhebung von *Stranglängen*, versorgter Fläche und versorgten Einwohnern bei ausgewählten Netzbetreibern (sechs Ellipsen) werden – parallel für Stadt und Land – die *Flächennetzdichte* (ND_A) und die *Einwohnernetzdicthe* (ND_{EW}) bestimmt, angedeutet durch durchgehende bzw. gestrichelte Linien. Durch Gewichtung der Gebietsstrukturen werden die schweizerischen Netzdichten ermittelt und anschliessend zur Berechnung der Stranglänge genutzt. – Untersuchte Netzbetreiber: EKZ: Elektrizitätswerke des Kantons Zürich; CKW: Centralschweizerische Kraftwerke; SAK: St.Gallisch-Appenzellische Kraftwerke AG; ewz: Elektrizitätswerk der Stadt Zürich; iwB: Industrielle Werke Basel (BS); ewB: Energie Wasser Bern.

Tab. 2-12: Grössen zur Bestimmung der schweizerischen Netzdichten. Quelle: eigene Schätzung der Gewichtungen; statistische Werte für Hochrechnungsfaktoren.

	Siedlungsstruktur		Gewichtung	Hochrechnungsfaktor
Flächendichte	Stadt	ND_{A-S}	0.05	$\text{Fläche}_{\text{CH}}$ 41'285 km ²
	Land	ND_{A-L}	0.95	
Einwohnerdichte	Stadt	ND_{EW-S}	0.43 (= 3/7)	$\text{Einwohner}_{\text{CH}}$ 7'261'200
	Land	ND_{EW-L}	0.57 (= 4/7)	

Die Untersuchungen zur Stranglänge werden für ländliche und städtische Gebiete in jeweils drei Elektrizitätswerken durchgeführt (Tab. 2-13). Vertreter für grosse städtische lokale Verteilnetze sind die Elektrizitätswerke der Städte Zürich, Basel und Bern. Als ländliche Vertreter werden die regionalen Elektrizitätswerke der Kantone Zürich, St. Gallen/Appenzell und der Zentralschweiz ausgewählt.

Tab. 2-13: Übersicht über die Elektrizitätswerke, die zur Beschreibung der Hochspannungs-, Mittelspannungs- und Niederspannungsnetze untersucht wurden.

Ländlich-kantonales Gebiet		Städtisches Gebiet	
EKZ	Elektrizitätswerke des Kantons Zürich	ewz	Elektrizitätswerk der Stadt Zürich
CKW	Centralschweizerische Kraftwerke	iwB	Industrielle Werke Basel (Kanton BS)
SAK	St.Gallisch-Appenzellische Kraftwerke AG	ewB	Energie Wasser Bern

Verlegeart

Die durchschnittliche Verlegeart der Höchst-, Hoch- und Mittelspannungsleitungen wird durch Literaturangaben bestimmt (EGGENBERGER 1990; KNOEPFEL 1995). Im Gegensatz zu den anderen Netzebenen stimmen die Kabelanteile der beiden Studien im Niederspannungsbereich nicht überein (Abweichung > 20 %).

Eigene Messwerte zur Verlegeart der untersuchten Elektrizitätswerke sind nicht repräsentativ für die Schweiz, verdeutlichen aber durch ihre minimalen und maximalen Kabelanteile ihre Spannweite. Unter der Annahme einer systematischen (= identischen) relativen Abweichung dieses Messwertbereichs vom „wahren Wert“⁷¹ (hier: 0.11 des Messwertbereiches $|\Delta|$ über dem Minimalwert von 45 % bzw. 70 %) wird der Kabelanteil im NS-Bereich per Dreisatz projiziert geschlossen (Abb. 2-11).

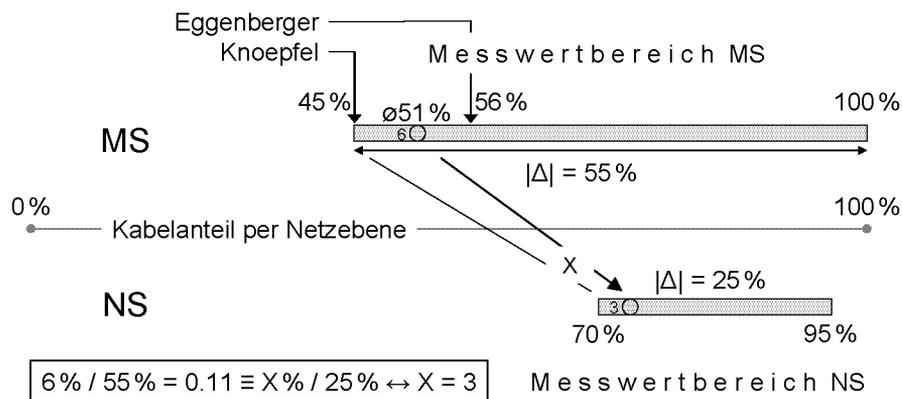


Abb. 2-11: Proportionalitätsansatz bei Annahme gleicher relativer Abweichung X des „wahren Werts“ von den Wertbereichsgrenzen. Die Extremwerte (Balkenenden) sind gegeben durch die Messwerte des Kabelanteils bei den untersuchten Elektrizitätswerken.

Leitungsmaterial

Die Häufigkeit von Kupfer und anderer Leitermaterialien wird durch Expertenbefragung pro Verlegeart und Netzebene ermittelt.

Strangquerschnitt

Der Strangquerschnitt hängt vom Strangaufbau ab, also vom Leiterquerschnitt⁷² und der Leiteranzahl (pro Strang). Starkstromkabel sind in zahlreichen Variationen verfügbar, doch der grösste Teil des Verkaufs (mindestens 90 %) sind normalisierte Kabeltypen mit bestimmtem Kabelaufbau („Normkabel“)(vgl. Tab. A-29 im Anhang).

Generell werden bei höheren Spannungen grössere Leiterquerschnitte genutzt, um den Widerstand zu verringern⁷³. In einer Erhebung bei ausgewählten Netzbetreibern (*ewz*, *iwv*, *ewb*, *EKZ*; siehe Tab. 2-13) werden die dominanten bzw. durchschnittlichen Leiterquerschnitte ermittelt, die innerhalb einer

⁷¹ Der durchschnittliche Literaturwert für den Kabelanteil der Mittelspannung (ca. 51 %) wird als „wahrer Wert“ angesehen, hier also der Mittelwert der Werte von Knoepfel und Eggenberger.

⁷² Eindrängige Kupferadern werden mit einem Leiterquerschnitt von maximal 16 mm² hergestellt. Die grössten Leiterquerschnitte sind für feindrängige Leitungen 630 mm² und bei feinstdrängigen 300 mm². Der Leiter besteht hier aus einer grossen Anzahl dünner, verseilter Kupferdrähte, die die Beweglichkeit bei der Verlegung (inklusive Trommelaufwicklung und -abwicklung) gewährleistet. Grössere Querschnitte (bis 2000 mm² nach DIN VDE 0296 genormt) werden aus mehreren Drähten kleineren Querschnittes zusammengesetzt, gegebenenfalls mit einer dünnen Zinn- oder Silberschicht überzogen. Für die Massenberechnung werden die auftretenden Zwischenräume feindrängiger Leitungen vernachlässigt und der angegebene Leitungsquerschnitt wird übernommen.

⁷³ Wegen der maximal zulässigen Feldstärke entfallen kleine Querschnitte mit steigenden Spannungen (BRUGG KABEL 1996). Die thermisch bedingte technische Obergrenze der Stromdichte von 2 bis 3 Ampère pro mm² verdeutlicht, dass bei einer Verteilstation ein grosser Leiterquerschnitt in mehreren kleinen Leiterquerschnitten mündet.

Netzebene genutzt werden (nur für Kupferleitungen). In einer zweiten Erhebung wurde die Leiteranzahl bei einem ausgewählten Netzbetreiber untersucht (CKW).

Datenqualität

Die Aktualität und Korrektheit von Angaben der Netzbetreiber wird hoch eingestuft, da sie entscheidend für ihre betriebsinternen Planungen sind. Bei der Übernahme ist besonders auf folgende potentielle Fehlerquellen zu achten:

- Netzabschnitte können von mehreren Elektrizitätsunternehmen gleichzeitig betrieben werden (üblich bei Hoch- und Höchstspannung)
- Besitz und Betrieb von Netzstrecken werden oft nicht deutlich unterschieden
- Netze verschiedener Betreiber überlappen sich teilweise und können damit nicht eindeutig auf eine bestimmte Fläche bzw. Einwohnerzahl bezogen werden. Im Allgemeinen weisen tiefe Netzebenen (NS,MS) eine schärfere räumliche Trennung der Netzabdeckung von Nachbarnetzbetreibern auf (IMBAUMGARTEN 2003a).

2.6.2 Telekommunikation

Die Erhebung beschränkt sich auf das Leitungsnetz des Unternehmens „swisscom“⁷⁴, der ehemalige Telekommunikationsmonopolist, dem fast vollständig das Anschlussnetz gehört und der mit Abstand grösster Netzbetreiber der Schweiz ist. Die anderen Netzbetreiber werden vernachlässigt. Die drei Teilnetze mit verschiedenen Kabeltypen (Kap. 2.5.2) werden separat nach Gl. 19 erfasst.

Stranglängen

Nach den Statistischen Jahrbüchern der PTT hat das Gesamt-Leitungsnetz eine Totalkabellänge von 150'474 km (1994). Die Längen der Kabel in den beiden Leitungsnetzebenen „Fern- und Regionalnetz“ und „Anschlussnetz“ sind in Tab. 2-14 aufgeführt.

Tab. 2-14: Leitungslängen der verschiedenen Kabeltypen in den beiden Leitungsnetzebenen (1994). Angaben in Kabelkilometer. Quelle: Statistisches Jahrbuch der SCHWEIZERISCHEN POST- TELEFON- UND TELEGRAFENBETRIEBE (1994).

Kabeltyp	Fern- und Regionalnetz [km]	Anschlussnetz [km]	Total [km]
Fernmeldekabel	11'756	125'981	137'737
Koaxialkabel	2'091	–	2'091
Glasfaserkabel	7'755	2'893	10'648
Total	21'602	128'874	150'474

Leiterquerschnitte

Die Querschnitte sind bei den Übertragungsleitungen uneinheitlich wegen der Verzweigungen im Netz. Die kleinste Querschnittseinheit ist bei den Fernmeldekabeln die Doppelader (Aderpaar). Ein Übertragungskabel trägt zwischen 2 und 2400 Doppeladern. Der Leiterquerschnitt einer Ader variiert zwischen 0.12 mm² und 0.50 mm², die Doppelader damit zwischen 0.24 mm² und 1.00 mm² (CONRAD und TESTER 2001). Eine Abschirmung ist nicht notwendig. Auf Basis dieser Bandbreiten werden Annahmen zum Kabelaufbau getroffen (Tab. 2-15).

⁷⁴ Mit Auflösung des Telekommunikationsmonopols in der Schweiz änderte das Unternehmen seinen Namen von „Telecom PTT“ zu „swisscom“.

Tab. 2-15: Literaturangaben und Annahmen zum durchschnittlichen Aufbau der Fernmeldekabel. Der Kabelquerschnitt gibt die Summe der Aderquerschnitte aus Kupfer an (ohne Isolierung). Quelle: (CONRAD und TESTER 2001).

Kabeltyp Fernmeldekabel	Bandbreite des Kabelaufbaus	Annahmen zu:	
		Fern- und Regionalnetz	Anschlussnetz
Anzahl Doppeladern	2 bis 2'400	1'000	100
Aderquerschnitt [mm ²]	0.12 bis 0.50	0.25	0.25
Kabelquerschnitt A [mm ²]	0.24 bis 1'200	500	50

Zur Berechnung wird für die Koaxialkabel im Fern- und Regionalnetz der gleiche Kabelquerschnitt wie bei den Fernmeldekabeln angenommen. Die Glasfaserkabel werden nicht berücksichtigt, da sie kupferfrei sind (PRIM *et al.* 1997).

2.6.3 Stromversorgung von Transportmitteln

Berücksichtigt werden die Oberleitungen der elektrifizierten Gleisabschnitte der Schweizerischen Bundesbahnen (SBB) und der Privatbahnen sowie die der kommunalen Tram- und Trolleybuslinien. Unberücksichtigt bleiben die Trag- und Hängedrähte der Oberleitungen, die Schwachstromleitungen zur Signalsteuerung, das Beleuchtungsnetz sowie die Heizleitungen für Tramweichen. Ebenso werden die Überbrückungsverbinder der unverschweissten Schienenverläufe vernachlässigt, da die Schienen bis auf Ausnahmen miteinander verschweisst sind (KOMMUNIKATION SBB 2001). Die Oberleitungen der verschiedenen Verkehrsnetze werden separat nach Gl. 19 berechnet.

Länge der Oberleitungen

Zur Ermittlung der Länge der Oberleitungen werden die Gleislängen der elektrifizierten Strecken gesucht. Da die Linien der SBB fast ausnahmslos elektrifiziert sind (> 99.4 %), werden die nicht elektrifizierten Abschnitte der SBB und der Privatbahnen vernachlässigt (KOMMUNIKATION SBB 2001). Die Länge der Oberleitungen von Tram und Trolleybus wird durch Verdoppelung der „Netzlängen“ erhalten. Die Oberleitungslängen der untersuchten Streckennetze sind in Tab. 2-16 aufgeführt.

Tab. 2-16: Längen der Oberleitungen der elektrifizierten Strecken öffentlicher Verkehrsnetze im Jahr 2000 (gerundet). Quelle: SBB: (KOMMUNIKATION SBB 2001); Privatbahnen: (BUWAL 2001; KOMMUNIKATION SBB 2001); Tram und Trolleybus: (LITRA 2001).

Streckennetz	Länge [km]
SBB	7'400
Privatbahnen	4'500
Tram	380
Trolleybus	640

Die „Gleislänge“ der Liniennetze der kommunalen Transportmittel wird in den Betriebsstatistiken auf Ebene der Unternehmen angegeben und heisst dort „Betriebslänge“ (zu beachten ist der Unterschied zur „Linienlänge“, das ist die Summe aller Längen der Bus- und Tramlinien).

Leiterquerschnitt

Der Aufbau und der Betrieb der Leitungsanlagen von Bahnen sind gesetzlich geregelt (EleG 1933). Die kleinsten zugelassenen Querschnitte liegen je nach der Befahrung der Strecke zwischen 50 und 70 mm². Da im Laufe der Nutzungsdauer ca. 30 % des Kupfers abgerieben werden (ELSENER und

STRUB 1993), werden Leitungsdrähte mit Querschnitten von 107 oder 150 mm² eingebaut (NEXANS 2004). Die Leiterquerschnitte der Oberleitungen sind in Tab. 2-17 aufgeführt.

Tab. 2-17: Querschnitte der Oberleitungsdrähte in den untersuchten Streckennetzen. Der angegebene Querschnitt bezieht sich auf den Zeitpunkt des Einbaus und wurde aus den gesetzlichen Mindestquerschnitten berechnet. Quelle: SBB und Privatbahnen: (NEXANS 2004)⁷⁵; Tram und Trolleybus: eigene Annahmen.

Streckennetz	Querschnitt A [mm²]
SBB	107
Privatbahnen	107
Tram	50
Trolleybus	2 · 50

⁷⁵ Die Firma Nexans Schweiz AG produziert die Oberleitungsdrähte nach einem Pflichtenheft der SBB. Diese technischen Vorgaben werden auch für die Privatbahnen angenommen.

2.7 Charakterisierung und Erfassung weiterer Lager

Die weiteren Lager der *Mobilien* und der *Deponien* werden einheitlich als Produkt der Gütermasse (M_{Gut}) und der Kupferkonzentration des Guts ($c_{\text{Cu,Gut}}$) berechnet (Gl. 20).

Gl. 20

$$m_{\text{Cu}} = M_{\text{Gut}} \cdot c_{\text{Cu,Gut}}$$

Die Kupferlager in den Umweltkompartimenten sind nicht direkt ermittelbar, sondern nur indirekt über die jährlichen Flüsse zu bestimmen, welche unter anderem von der Grösse der Hauptlager abhängen. Eine Berechnung findet daher erst mit der dynamischen Modellierung statt. Die zugrunde liegenden technischen und materialwissenschaftlichen Parameter werden in Kap. 4 diskutiert.

2.7.1 Mobilien

Die *Mobilien* umfassen mehrere verschiedenartige Gütergruppen wie Fahrzeuge, elektrische und elektronische Geräte, Maschinen, „weisse Ware“⁷⁶, Heizgeräte, Haushaltswaren und andere Gegenstände aus Kupfer (Teller, Münzen usw.) (Definition: siehe Tab. 2-1). Sie sind überwiegend heterogen aufgebaut und führen das Kupfer teils feinverteilt in Kabeln, Drähten, Kühlern, Schaltern und anderen Bauteilen. Zur Bestimmung der Kupfermenge in den Mobilien wird Gl. 20 auf die wichtigen Güter angewendet und anschliessend summiert (Gl. 21)(hier: für 23 Güter). Die Gütermasse (M_i) wird für jedes Gut (i) über die Stückzahl (n_i) und das Stückgewicht (m_i) bestimmt.

Gl. 21

$$m_{\text{Cu,Mobilien}} = \sum_{i=1}^{23} M_i \cdot c_{\text{Cu},i} = \sum_{i=1}^{23} (n_i \cdot m_i) \cdot c_{\text{Cu},i}$$

Die Stückzahl der Güter hängt von der Durchdringung des Konsummarktes ab. Diese Grösse, Stückzahl pro Einwohner bzw. Haushalt, wird hier „Konsumdichte“ genannt. Die Stückzahlen der meisten Güter werden über eine Konsumdichte geschätzt, da sie nicht in Statistiken erfasst sind. Die Anzahl der Fahrzeuge wird der Schweizerischen Verkehrsstatistik entnommen (BFS 1994)⁷⁷, die Stückgewichte aus einer Ökobilanz (MAIBACH *et al.* 1995). Weitere Stückgewichte werden der Literatur entnommen (SCHÄFER und PRETZ 2002) oder plausibilitätsgeprüft abgeschätzt. Der Kupfergehalt der Güter wird für den Untersuchungszeitraum als konstant angenommen.

2.7.2 Deponien

Der Haus- und Gewerbemüll der Schweiz wird in Kehrlichtverbrennungsanlagen (KVA) verbrannt und als KVA-Schlacke⁷⁸ innerhalb der Schweiz deponiert. Diese Mengen werden über das Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft jährlich dokumentiert. Pro Jahr sind das etwas über 0.5 Mt (2000)(BUWAL 1998a).

⁷⁶ Unter „weisse Ware“ versteht man die elektrischen Grossgeräte des Haushaltes wie Herd, Waschmaschine, Spülmaschine, Trockner usw., da die klassische Ausführung in weiss ist.

⁷⁷ Die Abweichung der tatsächlich vorhandenen Fahrzeuge gegenüber den in der Schweiz angemeldeten Fahrzeugen – das sind ungenutzte Fahrzeuge und zwischengelagerte Autowracks – wird vernachlässigt.

⁷⁸ Der Begriff KVA-Schlacke beschreibt die Bettasche als Verbrennungsrückstand bei der Kehrlichtverbrennung.

Durch die thermische Behandlung in der KVA gelangt das Kupfer vollständig in die festen Rückstände. Die mittlere Kupferkonzentration in KVA-Schlacken beträgt nahezu 10 g/kg Trockensubstanz (ZELTNER und LICHTENSTEIGER 2002; ZELTNER 1998; THUT 2001)⁷⁹.

Frühere Arbeiten ergaben deutlich tiefere Messwerte von $c_{\text{Cu,Schlacke}} = 2$ bis 5 g/kg TS Schlacke (Trockensubstanz) (BRUNNER, P.H. und MÖNCH 1986; SCHMICKL 1993; BACCINI und GAMPER 1994; SCHACHERMAYER *et al.* 1997), da die schwer beprobaren Grobfractionen und Siebrückstände mit bis zu 35 g/kg TS Schlacke (!) nicht in ausreichendem Masse berücksichtigt wurden (BELEVI 1998).

Der Kupfertransferkoeffizient in die Schlacke beträgt $k_{\text{Cu,Schlacke}} = 0.96$ und in die Rauchgasreinigungsrückstände (RGRR) $k_{\text{Cu,RGRR}} = 0.04$ (SCHACHERMAYER *et al.* 1997). Da der Kupferanteil der RGRR im Fehlerbereich des Kupferanteils der Schlacke liegt, wird die Kupfermenge in den Rückständen der Kehrichtverbrennung im Folgenden als 10 g/kg TS (Trockensubstanz) angenommen.

Die „sonstigen deponierten Abfälle“ setzen sich aus mehreren Abfallfraktionen zusammen, die sich bezüglich Mengen und Zusammensetzung stark unterscheiden. Als kupferrelevant werden die vier Fraktionen *Bausperrgut*, *RESH*⁸⁰, *Sonderabfälle* und *Klärschlamm* erachtet, deren Kupferfrachten analog zur Schlacke als Produkt aus jährlich anfallender Abfallmenge und ihrer Kupferkonzentration berechnet werden.

Die jährlich deponierte Kupfermenge beträgt dann:

Gl. 22

$$A_{\text{Cu,Deponie}} = A_{\text{Schlacke}} \cdot c_{\text{Cu,Schlacke}} + \sum_{i=1}^4 A_i \cdot c_{\text{Cu},i}$$

mit A_1, \dots, A_4 : kupferrelevante Abfallfraktionen

Schliesslich erhält man die deponierte Kupfermenge durch Multiplikation mit der Dauer der Deponierung:

Gl. 23

$$m_{\text{Cu,Deponie}} = A_{\text{Cu,Deponie}} \cdot \text{Dauer}$$

⁷⁹ Bei bekannten KVA-Input- und Output-Mengen kann mittels der Transferkoeffizienten von KVA-Anlagen aus der Schlackenkomposition die Kupferkonzentration im Kehricht berechnet werden (BELEVI 1998). Diese Rückberechnung der Kehrichtzusammensetzung aus der Schlackenzusammensetzung ist in zahlreichen Arbeiten durchgeführt worden, da eine direkte Messung des KVA-Inputs wegen seiner Heterogenität problematisch ist.

⁸⁰ RESH: **R**eststoffe aus **S**hredderanlagen. Diese Abfallfraktion wurde bis zur Einführung der *Technische Verordnung über Abfälle* (1996)(vgl. (EDI 1988)) deponiert. Seitdem wird sie in KVA behandelt und künftig ist die Behandlung in einer speziellen Schmelzanlage vorgesehen. Das Endprodukt wird in beiden Fällen deponiert.

2.8 Historische Entwicklung der anthropogenen Kupferlager

Die heutigen Kupferlager der Schweiz sind Ausgangspunkt für die historische Betrachtung der Kupferlager. Die Untersuchung erfolgt mit Hilfe von Literatur, die mit historischen Beschreibungen direkt oder indirekt Aussagen zum Kupferbestand ermöglicht, und gezielten mündlichen Befragungen von Experten und Zeitzeugen.

Hierfür werden die historischen Kupferlager separat für die *Gebäude*, die *Infrastruktur* und die *Mobilien* eingeschätzt, wobei – wie bei der Erfassung heutiger Lager – der methodische Schwerpunkt auf den Gebäuden verbleibt, indem diese exemplarisch auf der tiefsten Ebene der Erfassung eingeschätzt werden (das bedeutet, dass grundsätzlich jeder Berechnungsfaktor des Gebäudelagers entlang der Zeit verfolgt wird). Der Betrachtungszeitraum reicht von 1900 bis 2000 mit einer zeitlichen Auflösung von 25 Jahren. Mit dem methodischen Schwerpunkt auf den Gebäuden wird der historisch betrachtete Zeitraum vom übergeordneten Projekt ARK04 übernommen, da es eines der am weitesten zurückreichenden und umfangreichsten Modelle zur Gebäudebestandsentwicklung ist und zudem mit der betrachteten Region übereinstimmt.

Zur Bestimmung der historischen durchschnittlich genutzten Standardausführungen werden neben direkten Informationen zum „Ausstattungsbestand“ (Mikrozensus, Gebäudestatistik) auch „Ausstattungsangebote“ herangezogen (Verkaufs- und Messekataloge), die in gewisser Masse abbilden können, wonach die Menschen damals verlangten.

Im vorliegenden Ansatz wird der historische Aufbau der Kupferlager in den Deponien nicht untersucht, sondern in Abhängigkeit von den drei Hauptlagern im dynamischen Modell berechnet (Kap. 5.2.1).

2.8.1 Gebäudebereich

Das Lager in den Gebäuden ist in Analogie zu Gl. 5 zu jeder Zeit das Produkt aus der Bezugsfläche und der Kupfergehalte der ARK-Häuser:

Gl. 24

$$m_j(t) = KG_{DA}(t) \cdot A_{DF}(t) + KG_{HT}(t) \cdot A_{BGF}(t)$$

Die Bruttogeschossflächen des Gebäudebestands ($A_{BGF}(t)$) sind aus der Literatur bekannt; die Dachfläche wird unter Annahmen daraus gebildet (Kap. 2.8.1.1). Die Entwicklung der Kupfergehalte der ARK-Häuser wird auf der Basis von Literatur und Expertengesprächen rekonstruiert (Kap. 2.8.1.2). Das vorrangige Ziel ist die qualitative Bestimmung jener Einflussfaktoren, die für die Lagerentwicklung relevant sind. Hingegen ist die Genauigkeit der Faktoren nachrangig, die naturgemäss mit zunehmendem zeitlichen Abstand abnimmt.

2.8.1.1 Gebäudebestand

Die Entwicklung des Gebäudebestands wurde – ausgehend vom heutigen Zustand – in den Jahrhundertsquartalen für die vier Nutzungstypen errechnet (HENSELER *et al.* 2006). Der Gebäudebestand der Schweiz vervielfachte sich im Zeitraum 1900 bis 2000. Die Bruttogeschossfläche (BGF) wuchs von ca. $310 \cdot 10^6 \text{ m}^2$ auf $1'070 \cdot 10^6 \text{ m}^2$ und die Dachfläche (DF)⁸¹ von $129 \cdot 10^6 \text{ m}^2$ auf $404 \cdot 10^6 \text{ m}^2$ (HENSELER *et al.* 2006), was einem durchschnittlichen jährlichen Netto-Zuwachs von 1.25 %

⁸¹ Die Berechnung der Dachfläche erfolgt unter der gleichen Annahme zur Gebäudegeometrie wie in Kap. 2.4.3 für heute beschrieben.

bzw. 1.15 % über die Zeitspanne entspricht. Insgesamt vergrösserte sich damit im 20. Jahrhundert die BGF um ca. +245 % und die DF um 214 % (vgl. Abb. A-2 und Abb. A-3 im Anhang). Der Unterschied der beiden Zuwachsraten belegt den Trend zu grösseren Gebäuden, denn mit zunehmender Gebäudegrösse nimmt das Verhältnis DF/BGF ab.

Der Zuwachs im Gebäudebestand ist einerseits durch die Bevölkerungsentwicklung und andererseits durch die Pro-Kopf-Zunahme an Wohn-, Arbeits- und anderen Flächen zu erklären.

2.8.1.2 Kupfergehalt

Neben der Zunahme des Kupferlagers im Gebäudebestand aufgrund des Flächenzuwachses veränderte sich auch die Intensität des Ausbaus („Installationsgrad“) in den Gebäuden, insbesondere in der Haustechnik. Ebenso wurden auch manche Präferenzen bei der Materialwahl den Marktpreisen und materialspezifischen Fortschritten bei der Verarbeitung angepasst. Wachsender Wohlstand und zunehmende Wohnqualität im 20. Jahrhundert bewirkten in vielen Produktgruppen Änderungen:

- Zunahme von *Installationsdichten* $ID = ID(t)$
- Veränderungen in der *Häufigkeit der Produktgruppe* $fP = fP(t)$
- Veränderungen in der *Häufigkeit des Stoffs* $fM = fM(t)$

Demgegenüber haben sich die *spezifischen Massen* der installierten Produkte nicht signifikant verändert, da die technischen Erfordernisse und Rahmenbedingungen dieselben waren⁸².

Ziel ist also die Rekonstruktion der oben genannten Schlüsselgrössen (ID , fP , fM)(Kap. 2.4.2) per Produktgruppe entlang der Zeit⁸³, wobei jede Produktgruppe stets eine angepasste Bearbeitung erfordert, um die angestrebte Genauigkeit unter gerechtfertigtem Aufwand zu erreichen. Durch Kenntnisse über die oben genannten Schlüsselgrössen ist eine Aussage über die Entwicklung des Kupfergehalts der vier ARK-Häuser für die diskreten Zeitpunkte t der Jahrhundertquartale (I–IV) auf Ebene *Funktionsbereich* möglich (Gl. 24). Durch Berücksichtigung der Zeitabhängigkeit folgt also aus Gl. 17 und Gl. 13 bzw. Gl. 14 in Kap. 2.4.2 folgende Beziehung (Gl. 25):

Gl. 25

$$\begin{aligned}
 KG_{PG}(t) &= fP_{PG}(t) \cdot fM_{PG}(t) \cdot PKG_{PG}(t) \\
 &= fP_{PG}(t) \cdot fM_{PG}(t) \cdot ID_{PG}(t) \cdot sM_{PG}
 \end{aligned}
 \left| \begin{array}{l}
 \forall PG \in \{DA, HT\} \\
 \forall t \in \{1900, 1925, 1950, 1975, 2000\} \\
 \text{wobei gilt: } sM_{PG} = sM_{PG}(t=2000).
 \end{array} \right.$$

Berücksichtigung von Renovationen

Der Gebäudebestand befindet sich in einem „ständigem Umbau“: Tatsächlich handelt es sich bei den Bautätigkeiten nicht nur um Neubauten und Erweiterungsbauten, sondern in zunehmendem Masse gewinnt eine Erneuerung im Bestand i.w.S. (Renovation, Umbau, Ersatzneubau) gegenüber dem Neubau an Bedeutung. Kupfer und die anderen im Ausbau vorkommenden Spurenstoffe erfordern also eine erweiterte Betrachtung, bei der Renovationen und Umbauten berücksichtigt werden.

Die durch Renovation verkürzten Lebenszeiten der Materialien im Ausbau⁸⁴ bewirken eine fortlaufende „Aktualisierung“ ihres Bestands, denn bei einem Renovationszyklus von ca. 50 Jahren sind die ältesten Installationen in der Nutzungsphase vom Stand 1950 (im Gegensatz zu den Bauteilen des Rohbaus); der grössere Teil aber ist wegen der zusätzlichen Neubauten bedeutend jünger. Daher wird als „globale Bezugszeit“ für die zeitabhängigen Berechnungsgrössen in Gl. 24 und

⁸² Tatsächlich hat sich auch die spezifische Masse mit der Zeit verändert, beispielsweise bei Starkstromkabeln, doch wird hier nicht weiter auf diese Änderungen eingegangen, da sie in der Gesamtrechnung als vernachlässigbar eingeschätzt werden. Für Näheres siehe SCHERER (2004).

⁸³ Eine exemplarische detaillierte Untersuchung der Entwicklung der Häufigkeit fM wird an der Produktgruppe Heizungsrohre(Fläche) durchgeführt.

⁸⁴ Der Ausbau umfasst hier alle Bauteile, die nicht dem Rohbau angehören (vgl. Kap. 2.3.3).

Gl. 25 der Betrachtungszeitpunkt eingesetzt, anstatt die verschiedenen Altersklassen „übereinanderzustapeln“ wie bei der ARK-Haus-Methode für Hauptstoffe (LICHTENSTEIGER 2006).

Je nach Funktionsbereich bewirkt die zuvor angesprochene Zeitspanne der Renovationszyklen eine Verzögerung der „Aktualisierung“, insbesondere in der Haustechnik, deren Renovationen aufwendig sind (Abb. 2-12). Bei gegebener zeitlicher Auflösung von $\Delta t = 25$ a wird für die Kupfergehalte des **Dachbereichs** die Verzögerung vernachlässigt, das bedeutet alle Installationen stammen vom vergangenen Quartal (25 a) und sind „auf dem Stand der Technik“. Für die **Haustechnik** wird die Verzögerung dadurch simuliert, dass ein „veralterter Teil“ die Kupfergehalte der Vorperiode (25 bis 50 a) innehat und ein „erneuerter Teil“ Kupfergehalte der aktuellen Periode (0 bis 25 a). Für die **Sanitär- und Heizungsanlage** wird die Verzögerung im Zeitraum 1950 bis 2000 um eine dritte Stufe erweitert (50 bis 75 a, 25 bis 50 a, 0 bis 25 a); beispielsweise bleibt eine im II. Quartal (1926 bis 1950) eingebaute Zentralheizung häufig bis heute erhalten⁸⁵. Dieses zeitliche Stufenmodell kommt der Realität der Lagerentwicklung von Spurenstoffen in der Haustechnik näher als das Grundmodell aus dem Projekt ARK04 (LICHTENSTEIGER 2006), mit dem die Berechnung des Dachbereichs übereinstimmt.

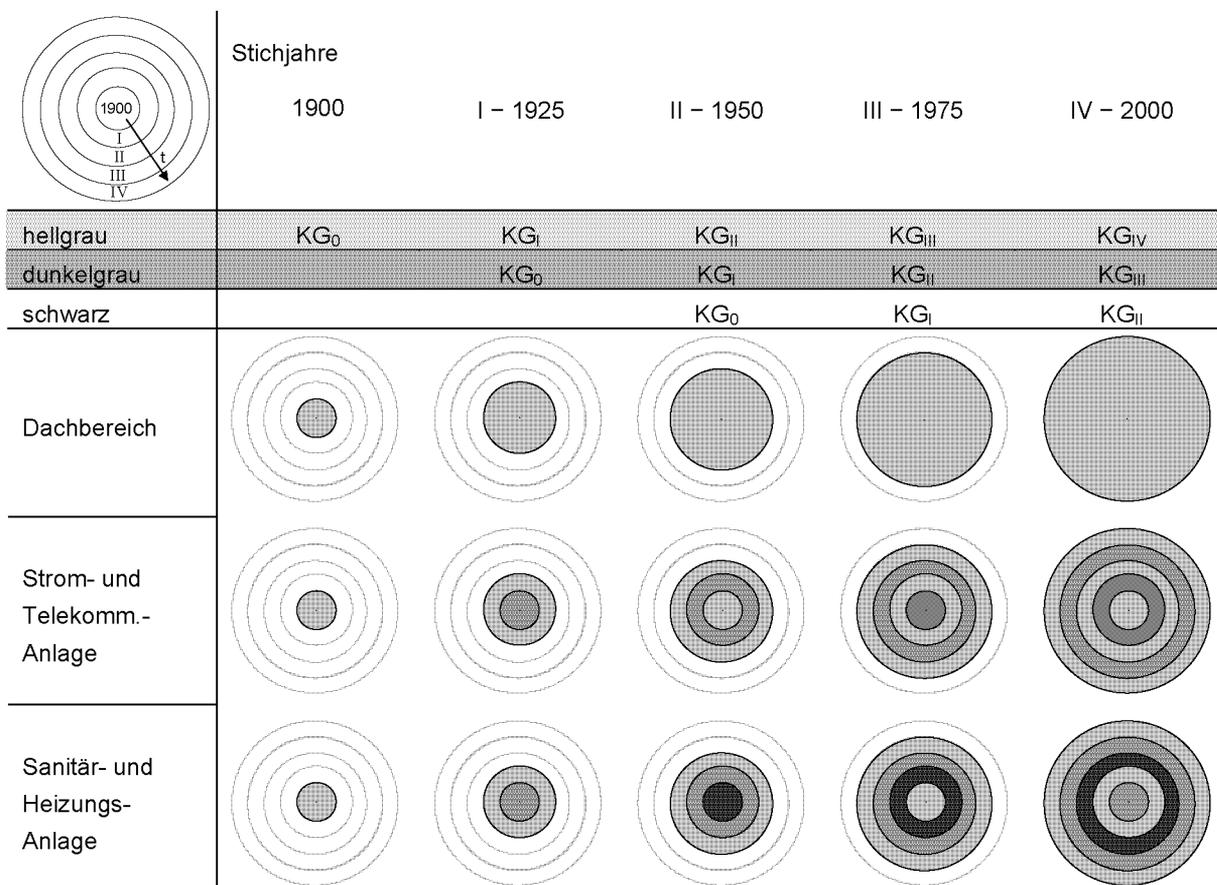


Abb. 2-12: Visualisierung der stufenweisen Entwicklung der Lager in dem *Dachbereich*, der *Strom- und Telekommunikationsanlage* und der *Sanitär- und Heizungsanlage* (jeweils beide Funktionsbereiche), mit Berücksichtigung der Renovationszyklen. – Die Ringe bedeuten die verschiedenen Quartale (1900 bis IV, siehe Schema links oben). Die Farbstufen verdeutlichen die Renovationsstufen der Kupfergehalte für die Quartale: hellgrau: im aktuellen Quartal gebaut bzw. renoviert (0 bis 25 a); dunkelgrau: im vergangenen Quartal gebaut bzw. renoviert (25 bis 50 a); schwarz: im vorvergangenen Quartal gebaut bzw. renoviert (50 bis 75 a).

Vereinfachend wird die Unsicherheit des Gebäudelagers für den Fall ohne Berücksichtigung der Renovationszyklen berechnet (Kap. 4.3). Es wird angenommen, dass die Unsicherheit im verzögert renovierten Fall ähnlich ist und auf diesen übertragen.

⁸⁵ Die Berechnungsvorschriften der Teillager sind mathematisch in Tab. A-25 und Tab. A-26 im Anhang formuliert.

Quellen

Datenquellen für die Entwicklung der Kupferlager sind einerseits historische Schriften zur Bauordnungslehre (SCHOLTZ 1905; NEUFERT 1961) und die regelmässig erscheinenden Baukataloge, die die Neuheiten rund ums Haus jährlich zusammenfassen (HÄSSIG 1930). Nützlich sind Arbeiten, die die Anpassung von Normen besprechen (ZAUDY 1930). Andererseits unterstützen auch hochbauhistorische Abhandlungen und Nachschlagewerke die Rekonstruktion ehemaliger Zustände (AHNERT und KRAUSE 2000; SCHAAL 1990), die als Ausgangspunkt zur ergänzenden Befragung von Handwerkern dienen.

Schriften zur Elektrotechnik behandeln in der Regel die elektrische Nutzung in Gebäuden und in der Infrastruktur einheitlich. Im Rahmen des Bestandsschutzes werden neue Schutzmassnahmen mit älteren verglichen, um Handlungsanleitungen zu erarbeiten (SCHERER 2004), aber auch sozialhistorische Studien zur Rezeption der Elektrotechnik geben indirekt qualitative Auskunft über den Prozess der Elektrifizierung (BLUMER-ONOFRI 1994). Zuweilen enthalten auch einfache Informationsseiten aus dem Internet Angaben zu historischen Materialeinsätzen, z.B. für Wasserleitungen (KLAAS 2004).

2.8.2 Infrastrukturbereich

Die Entwicklung des Lagers in der Infrastruktur wird ausgehend von heute auf Basis historischer Beschreibungen in der Literatur für den Zeitraum von 1900 bis 1990 im Abstand von 10 Jahren rekonstruiert (Stichjahre 1900, 1910, ..., 1990). Aufgrund der Korrelation des Ausbaus der Infrastruktur mit dem Schlüsselindikator „Bevölkerung“ können qualitativ Wachstumsschübe und -pausen datiert werden (BÄTZING 2003).

2.8.2.1 Stromnetz

Die Stranglängen und die Strangquerschnitte des Stromnetzes wuchsen seit seinem Aufbau stark an (SCHERER 2004). Demgegenüber ist die Materialwahl relativ konstant: Bereits seit Beginn der Elektrifizierung ist das Kupfer der bevorzugte Leiterwerkstoff des Stromnetzes in der Schweiz – wegen seiner hohen elektrischen Leitfähigkeit und seines relativ geringen Preises (DKI 1992; HAEMMERLE 2001).

Quellen

Statistische Datenreihen liegen für die Elektrifizierung der Schweiz nicht vor. Da sie aber als ein zentraler Prozess der Technisierung eine herausgehobene Stellung in der Kulturgeschichte innehat, beschreiben mehrere historische Arbeiten qualitativ die Bedingungen, unter denen sich das Stromnetz entwickelte. Einige Arbeiten nähern sich dem Phänomen als vielschichtigem kulturellem Prozess, der von der Gesellschaft gesteuert wird, diese aber auch verändert (BINDER, B. 1999). Gugerli beschreibt den Ausbau der Elektrizitätsnetze der Schweiz in der Frühphase bis 1914 als gesellschaftlichen Prozess in Abhängigkeit gesellschaftlicher und ökonomischer Rahmenbedingungen (GUGERLI 1996). Aus einer umfangreichen beschreibenden Oral-Historie über die Elektrifizierung bis 1950 und ihre Rezeption bei den Endkunden lassen sich ungefähre Entwicklungsschübe interpretieren (BLUMER-ONOFRI 1994); obwohl die Studie kleinräumig auf das Beispiel Baselbiet ausgerichtet war, wird es als stadtnahe Region für auf die gesamte Schweiz übertragbar erachtet, da die Schweiz zu dieser Zeit noch weniger urbanisiert war. Das Verständnis dieser Zusammenhänge unterstützt die Rekonstruktion der physischen Aspekte (Netzlängen) der Elektrifizierung auf schweizerischer Ebene.

2.8.2.2 Telekommunikation

Zur Rekonstruktion der Entwicklung des Lagers in der Telekommunikation wird die statistische Zeitreihe des Telefonnetzes (PTT-Netz) genutzt, die den Zeitraum ab ca. 1950 dokumentiert (PRIM *et al.* 1997).

2.8.2.3 Stromversorgung von Transportmitteln

Der Ausbau des Streckennetzes der SBB (grösster Netzbetreiber; Kap. 2.6.3) und seine Elektrifizierung sind statistisch dokumentiert (Abb. A-9 im Anhang).

2.8.3 Mobilien

Die Abschätzung der Entwicklung des Mobilienlagers stützt sich auf Technikchroniken, die Produktrends und technische Entwicklungen punktuell darstellen (HÄSSIG 1930; PATURI 1988). Ergänzend wird die Entwicklung des Fahrzeugbestandes aus der Verkehrsstatistik herangezogen, die ab 1950 fortlaufend geführt wird (1950, 1960, 1970; ab 1970 jährlich)(BFS 1994).

2.8.4 Bedeutung des Aussenhandels

Im Allgemeinen sind die Veränderungen im Gesamtlager durch den Rohstoffabbau in der Region und ihren Aussenhandel gegeben. Im betrachteten Falle des Rohstoffs Kupfer mit der Systemgrenze Schweiz ist der Lagerzuwachs mangels regionseigener primärer Lagerstätten weitgehend durch die Nettoimporte gegeben.

3 Resultate

Zu Beginn werden die Ergebnisse aus der Untersuchung des Aussenhandels vorgestellt (Kap. 3.1). In den folgenden Kapiteln werden die Ergebnisse aus der *bottom-up*-Erfassung der Lager dargestellt (Kap. 3.2-3.4) inklusive der historischen Entwicklung (Kap. 3.5). Die Unsicherheiten der Lagermengen werden separat in Kap. 4.3 diskutiert.

3.1 Die historische Aussenhandelsbilanz

Der schweizerische Aussenhandel mit Kupfer wächst – abgesehen von einer temporären Abnahme in der Zeit des 2. Weltkriegs – im 20. Jahrhundert stark an, wobei die Importe die Exporte übertreffen (Abb. 3-1). Um 1900 betragen Im- und Export nur wenige tausend Tonnen, doch bereits im II. Quartal steigen die Importe auf 10- bis 30tausend Tonnen. In der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts wächst der Handel sogar noch stärker an, so dass sie zu Beginn des 21. Jahrhunderts über 100tausend Tonnen betragen.

Die Aussenhandelsströme wachsen schneller an als die Bevölkerung. Bereits vor 1950 ist eine Entkoppelung der Kupferimporte und -exporte vom Bevölkerungswachstum festzustellen, doch erst mit dem wirtschaftlichen Aufschwung nach Ende des 2. Weltkriegs erhält diese Entkoppelung eine neue Dimension (Abb. 3-1). Durch die rapide Entwicklung nach dem Krieg wachsen die Importe im Betrachtungszeitraum auf das 30fache und die Exporte gar auf das 70fache an, während sich in der gleichen Zeit die Bevölkerung nur verdoppelt. Dies bedeutet, dass die starke Zunahme des schweizerischen Aussenhandelsvolumens an Kupfer überwiegend durch eine Pro-Kopf-Zunahme begründet ist.

Die Wachstumskurven der Importe und Exporte ähneln sich in der Form, doch hinkt die Exportkurve um 10 bis 30 Jahre hinterher (Abb. 3-1). Demgemäss erfolgt zeitgleich mit dem raschen Wachstum der Importe – nach Ende des 2. Weltkriegs – auch ein Anstieg des Nettoimports.

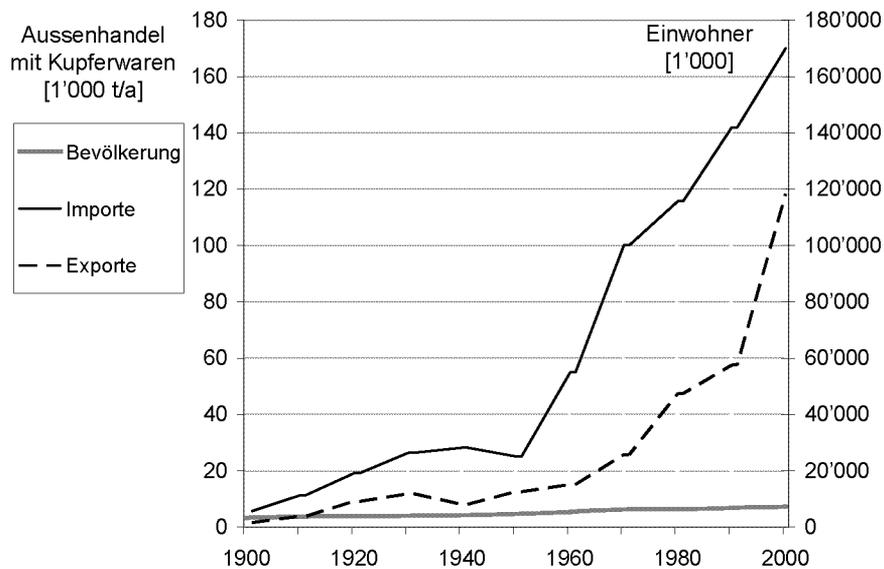


Abb. 3-1: Entwicklung des schweizerischen Aussenhandels mit Kupferwaren im Verlauf des 20. Jahrhunderts: Importe (liniert) und Exporte (gestrichelt) in tausend Tonnen pro Jahr. Die Aussenhandelswerte zwischen den Dekaden sind linear interpoliert. Der Abstand zwischen den Importen und den Exporten eines Jahres entspricht dem jährlichen Nettoimport. Zum Vergleich ist die Bevölkerungsentwicklung der Schweiz in Tausend dargestellt (graue Linie). Quelle: diverse Statistiken (OZD 2001; RITZMANN-BLICKENSTORFER und SIEGENTHALER 1996; BFS 1997-1999, 1993).

Ähnlich wie bei den Im- und Exporten wächst der Pro-Kopf-Nettoimport in der ersten Hälfte des Jahrhunderts an (Abb. 3-2): von 1 bis 2 kg/(capita · a) um 1900 auf 3 bis 5 kg/(capita · a). Anschliessend erfolgt ein rasanter Anstieg auf Pro-Kopf-Nettoimporte über 10 kg/(capita · a) in der Zeit von ca. 1970 bis 1990. Im Zeitraum von 1990 bis 2000 nimmt er ab auf ca. 7 kg/(capita · a).



Abb. 3-2: Entwicklung des schweizerischen Pro-Kopf-Nettoimports von Kupferwaren im Verlauf des 20. Jahrhunderts. Die Werte zwischen den Dekaden sind linear interpoliert. Quelle: diverse Statistiken (OZD 2001; RITZMANN-BLICKENSTORFER und SIEGENTHALER 1996; BFS 1997-1999, 1993).

Die Summation der Nettoimporte (vgl. Abb. 3-1) ergibt den kumulierten Nettoimport von Kupferwaren, und durch anschliessende Bezugnahme auf die jeweils aktuelle Bevölkerung der Schweiz erhält man den „kumulierten Nettoimport pro Kopf“, der in erster Näherung mit dem anthropogenen Kupferlager

der Schweiz übereinstimmt (Abb. 3-3). Abweichungen davon sind möglich durch unverzollte Aussenhandelsflüsse, dissipative Nutzungsverluste wie beim Düngereinsatz und die regionseigene Aufbereitung von Kupfererzen aus der Schweiz.

Der Verlauf des so berechneten Pro-Kopf-Lagers weist deutlich einen beschleunigten Lagerzuwachs auf, der sich in den 60er-Jahren stabilisiert und erst seit den 80er-Jahren abnimmt. Man erhält für das Jahr 2000 ein kumuliertes Pro-Kopf-Lager von mehreren Hundert Kilogramm (ungefähr 500 kg). Die abgeschätzte Unsicherheit der Kupferflüsse im Aussenhandel von 30 bis 40 % überträgt sich auf das kumulierte Kupferlager. Aufgrund des Erfassungsmodus ist eine systematische Unterschätzung der Im- und Exporte möglich, doch die Form der Wachstumskurve ist von dieser Unsicherheit nicht betroffen.

Der Vergleich der beiden Kurven verdeutlicht, dass – wie beim Aussenhandel – das Lagerwachstum der Schweiz grösstenteils durch einen steigenden Pro-Kopf-Kupferbedarf begründet ist und nicht durch das Bevölkerungswachstum (Abb. 3-3).

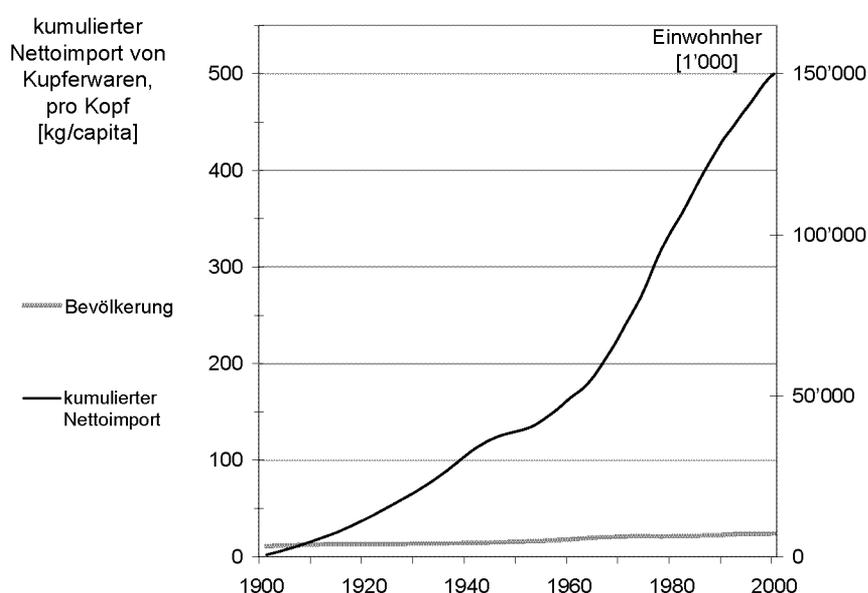
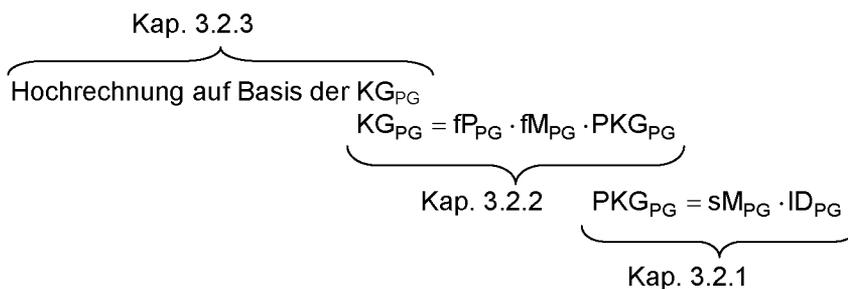


Abb. 3-3: Entwicklung des kumulierten schweizerischen Pro-Kopf-Nettoimportes im Verlauf des 20. Jahrhunderts. Die Werte zwischen den Dekaden sind linear interpoliert. Quelle: diverse Statistiken (OZD 2001).

Die Auswertung der Aussenhandelsstatistik ergibt also für das Kupferlager der Schweiz den ungefähren Wert von 500 ± 200 kg/capita. In den folgenden Kapiteln wird dieser Wert präzisiert und mit Hilfe der Erfassungsmethode differenziert den Haupt- und Teillagern zuordenbar.

3.2 Kupferlager im Gebäudebereich

In einem ersten Teil, Kap. 3.2.1, werden die Messwerte der *spezifischen Massen* und *Installationsdichten* (sM_i , ID_j), ihre Abstraktion auf die entsprechenden abgeleiteten Grössen (sM_{PG} , ID_{PG}) und die berechneten *potentiellen Kupfergehalte* pro Produktgruppe (PKG_{PG}) präsentiert (vgl. Abb. 2-8). Im zweiten Teil werden die *Kupfergehalte* (KG) der ARK-Häuser in Verbindung mit den *Häufigkeiten* der Produktgruppen und der Kupferanwendungen dargestellt (Kap. 3.2.2). Eine Zusammenfassung der nach Funktionsbereichen berechneten Lager wird in Kap. 3.2.3 gegeben. Schematisch ist der Aufbau damit wie folgt:



3.2.1 Potentielle Kupfergehalte

Die Ermittlung der Grössenordnung des *potentiellen Kupfergehalts* (PKG) orientiert sich an der *spezifischen Masse* (sM) und der *Installationsdichte* (ID) in den Referenzgebäuden. Die als gezielte Stichproben erhobenen sM_i und ID_j bewegen sich für jede Produktgruppe in einem bestimmten Wertebereich – in Abhängigkeit von den untersuchten Ausführungsvarianten⁸⁶ (vgl. Abb. 3-4). Aufgrund der Datenverfügbarkeit ist die ID überwiegend in Wohngebäuden erfasst worden.

Naturgemäss beanspruchen die Messungen und auch die davon abgeleiteten PKG nicht, die durchschnittlichen ARK-Häuser zu beschreiben. Die Auswahl der Referenzgebäude möchte ja gerade **nicht statistisch** von Messwerten auf die ARK-Häuser schliessen, sondern mittels dieser Wertebereiche übliche Ausführungstypen beschreiben, um sie anschliessend mit den Häufigkeiten im Gebäudebestand zu gewichten.

Im Folgenden werden die Ergebnisse präsentiert und vorgängig beispielhaft anhand der Blechbedachung vertieft illustriert (Abb. 3-4). Die Erhebungen der Referenzgebäude aller Produktgruppen werden detaillierter beschrieben als zur Bildung der ARK-Häuser erforderlich, um künftige differenzierte Explorationsen zu unterstützen⁸⁷. Die Messungen und berechneten Werte (im Text kursiv dargestellt) werden direkt nach Nennung mit dem entsprechenden Referenzgebäude belegt (in eckigen Klammern; vgl. Tab. A-2 im Anhang). Die zur Berechnung des potentiellen Kupfergehalts eingesetzten Werte sind mit grauem Hintergrund versehen (z.B. **9.99 kg/lfm**). Die Ergebnisse von Kap. 3.2.1 werden im Kontext des Erfassungsvorgangs dargestellt und diskutiert, soweit dies das Verständnis unterstützt.

⁸⁶ Der Bestimmung der sM_i und der ID_j liegen Messungen der *Bezugsflächen* und der *Produktmenge von Produktgruppen* zugrunde (vgl. Kap. 2.4.2.1). Auf eine Auflistung dieser Basis-Messwerte wird hier verzichtet, da die Bezugsflächen bereits in Tab. A-2 im Anhang gegeben und die Produktmengen leicht durch Multiplikation der Bezugsfläche mit der Installationsdichte rekonstruierbar sind.

⁸⁷ Aus diesem Grund werden die sM_i und die ID_j auf bis zu drei Nachkommastellen angegeben (grammgenau bzw. genau auf 10 g pro m² Bezugsfläche).

3.2.1.1 Dach

Bedachung/Abdeckung und Dachgaupen

Das allgemeine Vorgehen bei der Bestimmung des PKG wird in Abb. 3-4 exemplarisch anhand der Produktgruppe *Bedachung* verdeutlicht, wobei die Kürzel in runden Klammern auf die Arbeitsschritte in der Abbildung verweisen (z.B. „A-I“):

Die bei der Bedachung verwendeten Blechdicken variieren zwischen 0.5 und 1.0 mm (DKI 2002); häufige Blechdicken sind 0.55 [EFH1; MFH2], 0.60 [MFH1] und 0.70 mm [EFH6] (A-I). Die spezifische Masse dieser Bleche bewegt sich zwischen 4.9 und 6.3 kg/m² (A-II). Für die spezifische Masse der Bedachungsbleche wird der Mittelwert dieses Wertebereichs zugrunde gelegt: $sM_{\text{Bedachung}} = 5.6 \text{ kg/m}^2$ (A-III)(Tab. 3-1).

Für ein Kupferdach werden Kupferbänder zur Abdichtung verfalzt. Spengler setzen einen Mehrverbrauch von +14% für die Falzung an (SCHRANZ 2002)⁸⁸ (B-I). Auch bei Kupferbedachungen sind ferner Einlaufbleche, Einfassungen und/oder weitere Abdichtungsbleche erforderlich, so dass sich der Wert um schätzungsweise weitere +4% auf 1.18 m²/m² DF erhöht. Eine massengestützte Erhebung eines renovierten Daches liefert 1.17 m²/m² DF [MFH2] (B-II). Nach bestmöglicher Einordnung der Messwerte und Plausibilitätsprüfung wird damit die $ID_{\text{Bedachung}}$ zu 1.17 m²/m² DF ermittelt (B-III). Durch Multiplikation beider Grössen erhält man den potentiellen Kupfergehalt (IV).

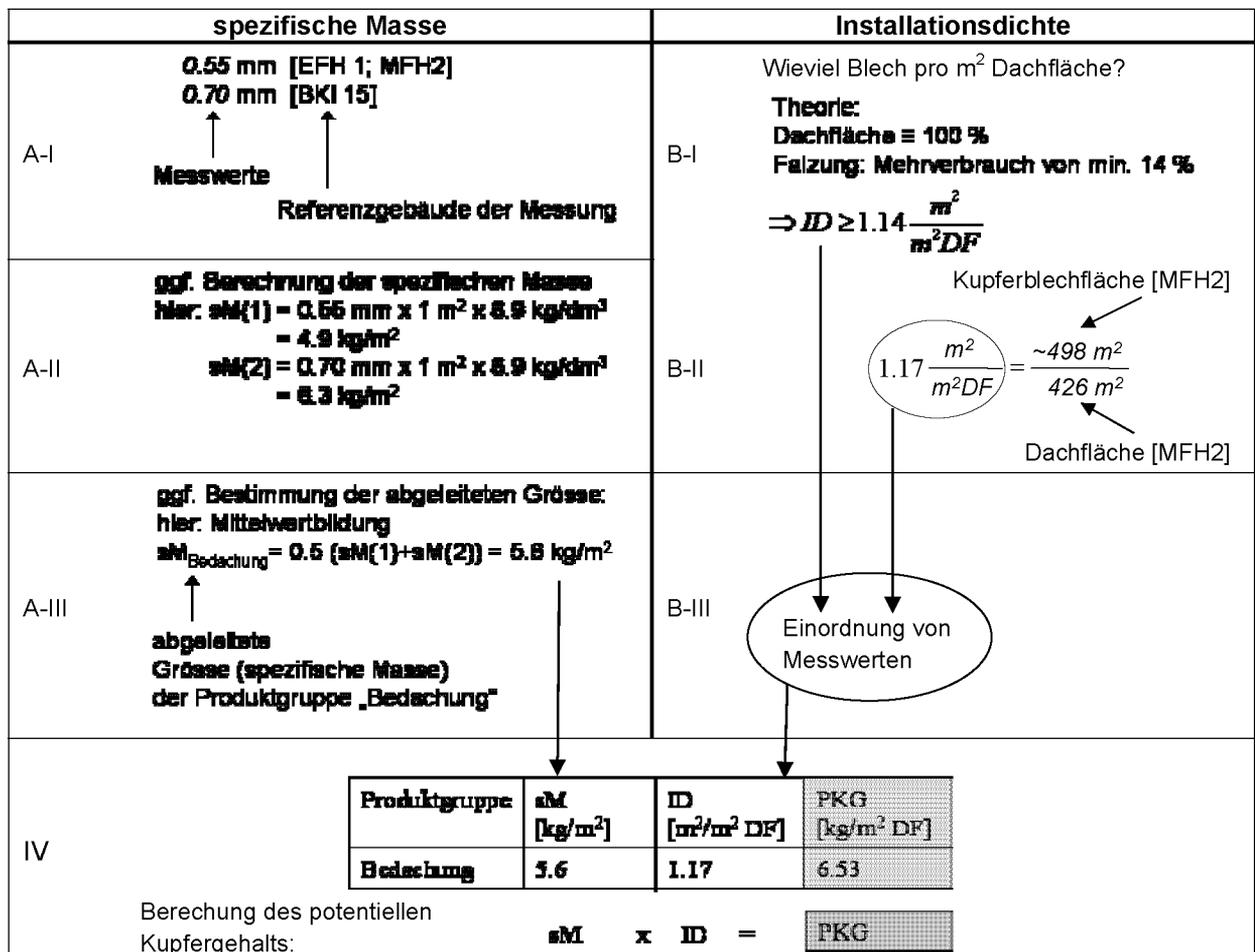


Abb. 3-4: Vorgehen zur Bestimmung des potentiellen Kupfergehaltes (PKG) aus der spezifischen Masse (sM) und der Installationsdichte (ID) am Beispiel *Bedachung*. Erläuterungen: siehe Text.

⁸⁸ Der Anteil der Falzung wird beeinflusst von der Falztechnik (z.B. einfacher oder doppelter Falz, Doppelstehfalz, Winkelstehfalz, Querfalz) und der Breite der Bänder.

Für die Abdeckung von Exponentien werden in einem DFH $0.11 \text{ m}^2/\text{m}^2 \text{ DF}$ eingesetzt [EFH5: Bleche am Steildach, Einfassungen], für ein EFH $0.13 \text{ m}^2/\text{m}^2 \text{ DF}$ [BK115: Anschlussbleche, Einfassungen]. Der Mittelwert ergibt $ID_{\text{Abdeckung}} = 0.12 \text{ m}^2/\text{m}^2 \text{ DF}$ (Tab. 3-1).

Da die Einkleidung von *Dachgaupen* im Gegensatz zur *Bedachung* auch „statisch anspruchslosen Blecheinsatz“ einschliesst und dünnere Bleche kostengünstiger sind, wird eine leicht dünnere durchschnittliche Blechdicke von 0.60 mm angenommen: $sM_{\text{Gaupen}} = 5.4 \text{ kg/m}^2$. Zur Bestimmung der Installationsdichte wird das EFH1 herangezogen: zwei Dachgaupen auf 190 m^2 ergeben eine Installationsdichte von $ID_{\text{Gaupen}} = 0.13 \text{ m}^2/\text{m}^2 \text{ DF}$ (Tab. 3-1).

Tab. 3-1: Spezifische Masse (sM), Installationsdichte (ID) und potentieller Kupfergehalt (PKG) der Produktgruppen *Bedachung/Abdeckung* und *Dachgaupen*.

Produktgruppe	sM [kg/m ²]	ID [m ² /m ² DF]	PKG [kg/m ² DF]
Bedachung	5.6	1.17	6.53
Abdeckung	5.6	0.12	0.67
Dachgaupen	5.4	0.13	0.70

Dachrinnen und Regenfallrohre

Rinnen und Fallrohre werden vom Spengler vor Ort und zunehmend in Vorfabrikation aus flächigen Blechen hergestellt. Trotzdem werden diese als „linear eingesetzte“ Produkte aufgefasst, da sie in fixen Blechbreiten hergestellt werden und ihre Funktion proportional zur Länge verrichten. Die spezifische Masse hängt dabei von der Rinnenform, dem Durchmesser (Abb. 3-5) und der Blechdicke ab, welche ihrerseits von der Dachgrundfläche (wegen der Regenmenge) bzw. dem Material abhängen (vgl. Tab. A-3 im Anhang) (SCHMITT und HEENE 1996).

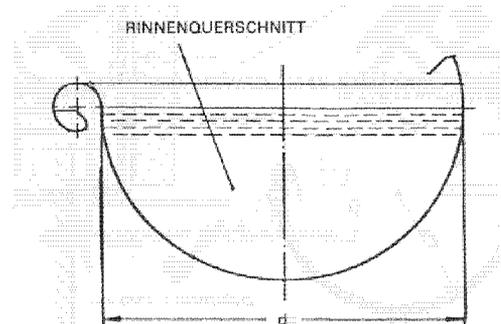


Abb. 3-5: Rinnenquerschnitt einer Dachrinne mit Durchmesser d.

Für Dachrinnen bedeutet dies Blechzuschnitte *zwischen 333 und 500 mm* (SCHRANZ 2002), für Regenfallrohre *zwischen 314 und 471 mm* (entspricht 100 bzw. 150 mm Durchmesser). Übliche Dicken von Rinnen- und Rohrblech sind 0.6 und 0.7 mm (SCHRANZ 2002) (Tab. 3-2).

Tab. 3-2: Zuschnittsbreite und Blechdicke zur Berechnung der spezifischen Masse (sM), sowie der Installationsdichte (ID) und des potentiellen Kupfergehalts (PKG) der Produktgruppen *Dachrinnen* und *Regenfallrohre* (Fallrohre).

Nutzungs- typ	Produkt- gruppe	Zuschnitt [mm]	Dicke [mm]	sM [kg/lfm]	ID [lfm/m ² DF]	PKG [kg/m ² DF]
EFH	Rinnen	333	0.60	1.78	0.20	0.36
	Fallrohre	314		1.68	0.06	0.10
MFH	Rinnen	400	0.70	2.50	0.14	0.35
	Fallrohre	377		2.36	0.10	0.24
DLG	Rinnen	500	0.70	3.13	0.14	0.44
	Fallrohre	471		2.94	0.10	0.29
PRG	Rinnen	500	0.70	3.13	0.14	0.44
	Fallrohre	471		2.94	0.10	0.29

Die Installationsdichten der Dachrinnen werden gemessen zu $0.16 \text{ lfm/m}^2 \text{ DF}$ [EFH1], $0.23 \text{ lfm/m}^2 \text{ DF}$ [EFH5] und $0.18 \text{ lfm/m}^2 \text{ DF}$ [BK115], resultierend in $ID_{\text{Rinnen,EFH}} = 0.20 \text{ lfm/m}^2 \text{ DF}$ (Tab. 3-2). Der Messwert für die MFH von $0.14 \text{ lfm/m}^2 \text{ DF}$ [MFH1] wird auf die DLG und PRG übertragen, da auch deren Dachflächen generell grösser sind als jene der EFH. Die Fallrohrmessungen ergeben $0.05 \text{ lfm/m}^2 \text{ DF}$ [EFH1], $0.08 \text{ lfm/m}^2 \text{ DF}$ [EFH5] und $0.06 \text{ lfm/m}^2 \text{ DF}$ [BK115], resultierend in $ID_{\text{Fallrohr,EFH}} = 0.06 \text{ lfm/m}^2 \text{ DF}$. Aufgrund der Korrelation mit der Gebäudehöhe wird sie für die MFH, DLG und PRG um $\frac{2}{3}$ auf $ID_{\text{Fallrohr,MFH+DLG+PRG}} = 0.10 \text{ lfm/m}^2 \text{ DF}$ erhöht. Für einen Vergleich der Installationsdichten von Rinnen und Fallrohren mit Werten aus der Literatur siehe Kap. A.1.5.1 im Anhang.

Blitzableiter

Die durchschnittliche Drahtdicke der Fangleiter und Ableitungen hängt von der Grösse des Drahtnetzes ab und bewegt sich für Kupfer zwischen 6 und 8 mm Durchmesser (d). Meist werden Drähte mit der Mindestdicke für Kupfer für $d = 6 \text{ mm}$ installiert, doch in manchen Fällen werden die beiden Varianten kombiniert. Mit der vereinfachenden Annahme eines mittleren Durchmessers von 7 mm beläuft sich die spezifische Masse auf $sM_{\text{Blitzableiter}} = 0.35 \text{ kg/lfm}$ (Tab. 3-3). Die Installationsdichte wird mit Hilfe von EFH2 zu $ID_{\text{Blitzableiter}} = 0.38 \text{ lfm/m}^2 \text{ DF}$ bestimmt. Da die minimale „Maschendichte“ des Drahtnetzes als physikalisch-technisch begründete Grösse von den „Leitsätzen des SEV“ für alle Nutzungstypen gleich vorgeschrieben ist, wird sie auf die anderen Nutzungstypen übertragen (TRÄCHSEL 1988)(Tab. 3-3).

Tab. 3-3: Spezifische Masse (sM), Installationsdichte (ID) und potentieller Kupfergehalt (PKG) der Produktgruppe Blitzableiter.

Produktgruppe	sM [kg/lfm]	ID [lfm/m ² DF]	PKG [kg/m ² DF]
Blitzableiter	0.35	0.38	0.13

3.2.1.2 Haustechnik

Strom- und Telekommunikationsanlage

Die Untersuchung beschränkt sich gemäss Tab. 2-6 auf die Leitungen. Die spezifische Masse der gemessenen *Stromleitungen* (Starkstrom) sind einander ähnlich: 0.055 kg/lfm [EFH1], 0.067 kg/lfm [EFH2], 0.058 kg/lfm [EFH4], 0.046 kg/lfm [EFH5]; der Mittelwert ergibt $sM_{\text{Strom}} = 0.057 \text{ kg/lfm}$ (Tab. 3-4). Dieser Wert berücksichtigt neben den Etagenverteilungen bereits anteilmässig die dickeren Steigleitungen (z.B. 0.745 kg/lfm [MFH1]).

Die Installationsdichten von Stromleitungen variieren mit dem Installationsgrad der Gebäude. Die beiden Einfamilienhäuser EFH1 und EFH2 weisen nach Renovation mit Installationsgrad „Standard“ eine Installationsdichte von 1 bis $2 \text{ lfm/m}^2 \text{ BGF}$ auf (1.11 bzw. $2.06 \text{ lfm/m}^2 \text{ BGF}$). Die Neubauten EFH5 und EFH4 mit „gehobenem“ und „hohem Installationsgrad“ haben höhere Installationsdichten (2.60 bzw. $4.52 \text{ lfm/m}^2 \text{ BGF}$). Trotz grossem Anteil an Neubauten wird für die EFH die $ID_{\text{Strom,EFH}} = 2.4 \text{ lfm/m}^2 \text{ BGF}$ ermittelt, da hohe Installationsgrade wie in EFH4 bis heute selten auftreten (Tab. 3-4). Bei gleichem Installationsgrad vermindert sich aus geometrischen Gründen die Installationsdichte vom EFH zum MFH (zum Beispiel in einem rückgebauten MFH $1.7 \text{ lfm/m}^2 \text{ BGF}$ (HERRMANN 1981)): $ID_{\text{Strom,MFH}} = 2.0 \text{ lfm/m}^2 \text{ BGF}$.

Die Installationsdichten in DLG und PRG sind höher als in Wohngebäuden, insbesondere in den Bürogebäuden (RUBLI 2003b). Unter Annahme einer durchschnittlichen spezifischen Masse wie bei den EFH (das ist 0.057 kg/lfm) und einem Kupferanteil in Starkstromkabeln von 50 % (AMSTEIN UND

WALTHERT 1998) beliefe sich die Installationsdichte des Hauptbürogebäudes eines grossen Finanzdienstleisters⁸⁹ auf 10 bis 15 lfm/m² BGF. Da aufgrund eines hohen Stromverbrauchs pro Quadratmeter in Dienstleistungsgebäuden die Kabelquerschnitte und damit die sM grösser als oben angenommen sind und zudem das untersuchte Bürogebäude einen für DLG überdurchschnittlichen Installationsgrad aufweist, wird die Installationsdichte zu $ID_{\text{Strom,DLG}} = 6 \text{ lfm/m}^2 \text{ BGF}$ bestimmt (Tab. 3-4). Die ID von Produktionsgebäuden bewegen sich zwischen den Werten von DLG und Wohngebäuden (RUBLI 2003b).

Beachte: Obwohl die ID der Steigleitungen ungefähr eine Grössenordnung unter der ID der Etagenverteilungen liegt ($ID_{\text{Steigleitung}} = 0.31 \text{ lfm/m}^2 \text{ BGF}$), sind die Steigleitungen aufgrund der vergrösserten Kabeldicken ($sM_{\text{Steigleitung}} = 0.745 \text{ kg/lfm}$) nicht zu vernachlässigen [MFH1].

Tab. 3-4: Spezifische Masse (sM), Installationsdichte (ID) und potentieller Kupfergehalt (PKG) der Produktgruppe *Stromkabel*.

Nutzungstyp	sM [kg/lfm]	ID [lfm/m ² BGF]	PKG [kg/m ² BGF]
EFH	0.057	2.4	0.14
MFH		2.0	0.11
DLG		6.0	0.34
PRG		3.0	0.17

Die spezifische Masse der *Telekommunikationsleitungen* variiert mit dem Kabelmix der Telekommunikationsanlagen⁹⁰, ist jedoch allgemein nur ein Bruchteil derjenigen der Stromleitungen. Für die Einfamilienhäuser wurden folgende sM berechnet: 0.015 kg/lfm [EFH1 und EFH4], 0.009 kg/lfm [EFH2] und 0.013 kg/lfm [EFH5]. Die grosse spezifische Masse des MFH2 mit 0.040 kg/lfm ist auf den hohen Installationsgrad des Kabeltyps *U72* zurückzuführen (breitbandig und moderner Kabelmix mit einem Kabellängenverhältnis *KabelU72 : Coax = 75 : 25*), der allerdings nicht repräsentativ ist. Daher wird die spezifische Masse zu $sM_{\text{Telekomm}} = 0.013$ bestimmt (Tab. 3-5).

Ebenso betragen die Installationsdichten nur einen Bruchteil gegenüber denen der Stromkabel (bis zu Faktor 10 kleiner). Aufgrund eines höheren durchschnittlichen Installationsgrades sind auch hier die Installationsdichten in den EFH höher als in den MFH. Bei EFH mit Installationsgrad „Standard“ werden 0.20 lfm/m² BGF [EFH2] und 0.84 lfm/m² BGF [EFH5] gemessen, bei hohem Installationsgrad die Installationsdichten 0.41 lfm/m² BGF [EFH1] und 1.06 lfm/m² BGF [EFH4]⁹¹. Die niedrigeren ID in den renovierten Gebäuden (EFH1,EFH2) gegenüber den Neubauten (EFH4,EFH5) sind plausibel, da bei den Renovationen lediglich die Telefonleitungen erneuert, bei Neubauten hingegen bereits standardmässig mehr Telefonanschlussbuchsen gelegt und zusätzliche Telekommunikationsleitungen eingebaut werden (vgl. Kap. 2.3.1.3). Auf dieser Grundlage wird die Installationsdichte zu $ID_{\text{Telekomm,EFH}} = 0.8 \text{ lfm/m}^2 \text{ BGF}$ bestimmt (Tab. 3-5). Da die Messung am Neubau des MFH1 mit 0.61 lfm/m² BGF eine sehr komfortable Ausstattung repräsentiert, wird die Installationsdichte in durchschnittlichen MFH zu $ID_{\text{Telekomm,MFH}} = 0.40 \text{ lfm/m}^2 \text{ BGF}$ bestimmt. Für die DLG wird wegen des hohen Installationsgrades bei Telefonen und Computern eine erhöhte ID als plausibel erachtet. Für die PRG wird wegen des hohen Anteils an Lagergebäude auf eine weit niedrigere ID geschlossen.

⁸⁹ Diese Messung wurde mit der *Rückbau-Methode* durchgeführt (vgl. Abb. A-6 im Anhang). Erhebung im Rahmen des Umbaumontoring des „Verwaltungszentrum Werd“, Hauptbürogebäude der UBS AG, Zürich, zu einem kommunalen Verwaltungsgebäude im Jahr 2003 (RUBLI 2003a).

⁹⁰ Dies wird deutlich, wenn man die verschiedenen Schwachstromkabeltypen selektiv betrachtet. Beispielsweise wurde gemessen: $sM_{\text{KabelU72}} \approx 0.009 \pm 0.004 \text{ kg/lfm}$ (bis zu 0.07 kg/lfm), $sM_{\text{Coax}} \approx 0.018 \text{ kg/lfm}$, $sM_{\text{UKV}} \approx 0.023 \text{ kg/lfm}$ und $sM_{\text{Thermostat}} \approx 0.05 \text{ kg/lfm}$. KabelU72: Schwachstromkabeltyp U72; Coax: Koaxialkabel für TV; UKV: universelle Gebäudeverkabelung; Thermostat: Thermostatleitung. Üblich sind ungefähr gleichgrosse Kabellängen der Kabeltypen *U72* und *Coax*.

⁹¹ Die Schwachstrominstallation des EFH4 ist aussergewöhnlich komfortabel: Jedes Zimmer ist mit Kabelfernsehen und einer universellen Gebäudeverkabelung (UKV) ausgestattet.

Tab. 3-5: Spezifische Masse (sM), Installationsdichte (ID) und potentieller Kupfergehalt (PKG) der Produktgruppe Telekommunikationskabel.

Nutzungstyp	sM [kg/lfm]	ID [lfm/m ² BGF]	PKG [kg/m ² BGF]
EFH	0.013	0.8	0.010
MFH		0.4	0.005
DLG		1.2	0.016
PRG		0.04	0.001

Sanitär- und Heizungsanlage

Die Vielzahl an stofflich verschiedenen Ausführungsvarianten in Sanitäranlagen und Heizungsanlagen (vgl. Kap. 2.3.1, Kap. A.1.5.4–9 im Anhang) spiegelt sich auch in den Erhebungen der Einzelgebäude wider.

Wasserrohre und Heizungsrohre

Die spezifische Masse von Wasserrohren und Heizungsrohren hängt von der Wanddicke (1 bis 2 mm) und vom Rohrdurchmesser ab, der zwischen ½" und 4" betragen kann (vgl. Kap. A.1.4.3 im Anhang). Die Verteilung der Wasserrohrtypen des EFH4 zeigt, dass die Feinverteilung bedeutender ist als die Grobverteilung hinsichtlich Rohrmassen und -längen⁹². Dementsprechend wird – bei Anwendung von Kupfer als Rohrmaterial – das Verteilmuster des Gesamtgewichts dominiert von ½"- bis ¾"-Rohren (vgl. Tab. A-4). Die spezifische Masse der Wasserrohre beträgt nach dem Verteilmuster des EFH5 durchschnittlich 0.58 kg/lfm, was auch auf die sM_{Wasserrohre} übertragen wird (Tab. 3-6). Die Durchmesser der kupfernen Verteilleitungen von Heizungen sind häufig etwas grösser bei einer relativ geringen Wanddicke (vgl. Abb. A-5 im Anhang): Die spezifische Masse in EFH5 von 0.76 kg/lfm⁹³ wird auf sM_{Heizungsrohre(Verteilung)} übertragen (Tab. 3-7). Die Rohre der Flächenheizung sind im Durchschnitt schmaler (ca. ½") und teilweise noch dünnwandiger. Der gängige Innendurchmesser von 14 mm ergibt in Kombination mit der Wanddicke 0.8 mm eine spezifische Masse von 0.33 kg/lfm, bei einer Wanddicke von 1.0 mm eine spezifische Masse von 0.42 kg/lfm. Zur Bildung von sM_{Heizungsrohre(Fläche)} wird der Mittelwert 0.38 kg/lfm benutzt (Tab. 3-8).

Die Installationsdichte der Wasserrohre wurde in EFH4 zu 0.83 lfm/m² BGF bestimmt. Da das EFH4 einen überdurchschnittlich hohen Installationsgrad aufweist und durch seine hochgezogene Gebäudegeometrie materialintensiv gestaltet ist, wird die ID_{Wasserrohre.EFH/MFH} zu 0.5 lfm/m² BGF bestimmt (Tab. 3-6). In Nichtwohngebäuden ist die Installationsdichte entsprechend niedriger: Bezogen auf ID_{Wasserrohre.EFH/MFH} wird für die DLG die Hälfte und für die PRG ein Zehntel angenommen.

Tab. 3-6: Spezifische Masse (sM), Installationsdichte (ID) und potentieller Kupfergehalt (PKG) der Produktgruppe Wasserrohre.

Nutzungstyp	sM [kg/lfm]	ID [lfm/m ² BGF]	PKG [kg/m ² BGF]
EFH	0.58	0.50	0.29
MFH			
DLG		0.25	0.15
PRG		0.05	0.03

⁹² Die Grobverteilung verbindet die zentralen Anlagen mit der Feinverteilung, wobei die Steigstränge (inklusive Kellerverteilung) der Grobverteilung angehören und die horizontalen Leitungen der Feinverteilung.

⁹³ Annahme: 1"-Rohr mit Aussen- und Innendurchmesser von 28 mm bzw. 26 mm.

Für die Heizungsanlage wird die ID der Grobverteilung⁹² in EFH5 zu 0.09 lfm/m² BGF bestimmt, die ID der gesamten Verteilungen der Heizung sind mit 0.9 lfm/m² BGF eine Grössenordnung höher (LUTZ 2004)(Tab. 3-7). Für die PRG wird die ID wegen des hohen Anteils an Lagergebäuden tiefer eingestuft: bezogen auf die anderen Nutzungstypen ungefähr 30 %.

Tab. 3-7: Spezifische Masse (sM), Installationsdichte (ID) und potentieller Kupfergehalt (PKG) der Produktgruppe Heizungsrohre(Verteilung).

Nutzungstyp	sM [kg/lfm]	ID [lfm/m ² BGF]	PKG [kg/m ² BGF]
EFH	0.76	0.90	0.68
MFH			
DLG		0.26	0.19
PRG			

Im Bereich der Flächenheizung ist die Installationsdichte für die Heizungsplaner eine feste Grösse zur Kalkulation⁹⁴ (LUTZ 2004). Nach Korrekturabzug von Treppenfläche und Aussenfläche ergeben sich folgende Installationsdichten: $ID_{\text{Heizungsrohre(Fläche),EFH}} = 3.2 \text{ lfm/m}^2 \text{ BGF}$, $ID_{\text{Heizungsrohre(Fläche),MFH}} = 2.9 \text{ lfm/m}^2 \text{ BGF}$, $ID_{\text{Heizungsrohre(Fläche),DLG}} = 3.8 \text{ lfm/m}^2 \text{ BGF}$ und $ID_{\text{Heizungsrohre(Fläche),PRG}} = 2.0 \text{ lfm/m}^2 \text{ BGF}$ (Tab. 3-8).

Tab. 3-8: Spezifische Masse (sM), Installationsdichte (ID) und potentieller Kupfergehalt (PKG) der Produktgruppe Heizungsrohre(Fläche).

Nutzungstyp	sM [kg/lfm]	ID [lfm/m ² BGF]	PKG [kg/m ² BGF]
EFH	0.38	3.2	1.2
MFH		2.9	1.1
DLG		3.8	1.4
PRG		2.0	0.8

Fittings der Sanitäranlage

Die spezifische Masse der Fittings korreliert mit der Fittingsgrösse, welche sich nach den verlegten Rohren richtet. Wasserrohrfittings aus Kupfer sind mit durchschnittlich 75 bis 80 g zu veranschlagen, entsprechend $sM_{\text{Fittings(Sanitär)}} = 0.08 \text{ kg/Stück}$ (GYSIN 2002).

Die Installationsdichte der Fittings in der Sanitäranlage wurde in EFH5 zu 0.10 Stück/m² BGF gemessen. Da die Messung in EFH4 zu 0.19 Stück/m² BGF einen „sehr hohen Installationsgrad“ wiedergibt, wird für die Wohngebäude $ID_{\text{Fittings(Sanitär),EFH/MFH}} = 0.10 \text{ Stück/m}^2 \text{ BGF}$ übernommen (Tab. 3-9). Aufgrund der Korrelation mit der Wasserrohrlänge werden die Installationsdichten in DLG und PRG analog zu Tab. 3-6 angepasst.

⁹⁴ Heizungsplaner erstellen Kostenofferten mit Hilfe von Erfahrungswerten für die Installationsdichte. Sie verwenden dabei als Bezugsfläche die „beheizte Fläche“, welche gegenüber der BGF um die Treppenfläche und die Aussenfläche (5 % bzw. 21 %) vermindert ist. Um die Vergleichbarkeit zu den anderen Produktgruppen durch Bezugnahme auf die BGF zu gewährleisten, müssen die Erfahrungswerte der Heizungsplaner für die ID (EFH: 4.0 lfm/m²; MFH: 3.7 lfm/m²; DLG: 4.0 lfm/m² (Bezugsfläche = BGF – Aussenfläche); PRG: 2.0 lfm/m² (Bezugsfläche = BGF) nach unten korrigiert werden (LUTZ 2004).

Die Variationen der ID sind auf unterschiedliche Anforderungen an die Heizungsanlage zurückzuführen: Zum einen führt ein niedrigeres Aussenwand-Gebäudevolumen-Verhältnis zu geringeren Wärmeverlusten; zum anderen erfordern die Nutzungen an sich bereits unterschiedliche Zieltemperaturen.

Tab. 3-9: Spezifische Masse (sM), Installationsdichte (ID) und potentieller Kupfergehalt (PKG) der Produktgruppe *Fittings(Sanitär)*.

Nutzungstyp	sM [kg/Stück]	ID [Stück/m ² BGF]	PKG [kg/m ² BGF]
EFH	0.08	0.10	0.008
MFH			
DLG		0.05	0.004
PRG		0.01	0.001

Roharmaturen der Sanitäranlage

Da Grösse und Gewicht der Roharmaturen eine grosse Bandbreite aufweisen, hängen die Messwerte (durchschnittliche sM der eingesetzten Roharmaturen) stark davon ab, welche Roharmaturen installiert sind: Die meisten Roharmaturen haben ein Gewicht zwischen 0.4 und 1.0 kg, doch Verteilbatterien können bis zu 10 kg wiegen (MEIER 2002). Die Untersuchung einer Sanitäranlage mit Installationsgrad „Standard“ ergibt eine spezifische Masse von 2.1 ± 3.5 kg/Stück [EFH5]. Die spezifische Masse wird zu 1.5 kg/Stück bestimmt (Tab. 3-10).

Die Messung der Installationsdichte bei den Renovationen EFH1 („karge Ausführung“) und EFH2 ergibt jeweils 0.01 Stück/m² BGF, in EFH5 0.03 Stück/m² BGF und in EFH4 mit „hohem Installationsgrad“ 0.07 Stück/m² BGF. Damit wird die Installationsdichte zu $ID_{Roharmaturen(Sanitär), EFH} = 0.03$ Stück/m² BGF bestimmt. Da die zentral installierten Roharmaturen nicht proportional mit der Gebäudegrösse zunehmen, wird die ID bei den Nutzungstypen mit grösseren ARK-Häusern (MFH, DLG, PRG) um 1/3 vermindert.

Tab. 3-10: Spezifische Masse (sM), Installationsdichte (ID) und potentieller Kupfergehalt (PKG) der Produktgruppe *Roharmaturen(Sanitär)*.

Nutzungstyp	sM [kg/Stück]	ID [Stück/m ² BGF]	PKG [kg/m ² BGF]
EFH	1.5	0.03	0.045
MFH		0.02	0.03
DLG			
PRG			

Fittings der Heizungsanlage

Die spezifische Masse der Fittings wird in Übereinstimmung mit dem Unterschied zwischen Wasserrohr und Heizungsrohr (Faktor 1.3; vgl. Tab. 3-6 und Tab. 3-7) zu 0.10 kg/Stück ermittelt (Tab. 3-11). Die Messung der Installationsdichte in EFH3 von 0.05 Stück/m² BGF wird auf $ID_{Fittings(Heizung)}$ übertragen (Tab. 3-11). Für die PRG wird die $ID_{Fittings}$ – analog zur $ID_{Heizungsrohre(Verteilung)}$ – wegen des hohen Anteils an Lagerhallen um ungefähr 70 % vermindert.

Tab. 3-11: Spezifische Masse (sM), Installationsdichte (ID) und potentieller Kupfergehalt (PKG) der Produktgruppen *Fittings(Heizung)*.

Nutzungstyp	sM [kg/Stück]	ID [Stück/m ² BGF]	PKG [kg/m ² BGF]
EFH	0.10	0.05	0.005
MFH			
DLG		0.01	0.001
PRG			

Roharmaturen der Heizungsanlage

Die Berechnung der spezifischen Masse anhand der Roharmaturen des EFH3 ergibt einen Kupferanteil von 0.40 kg/Stück (Tab. A-5). Der Messwert hängt stark davon ab, welche kleinen Roharmaturtypen eingesetzt und bei der Erhebung erfasst werden: Man erhält 4.2 kg/Stück im EFH5 (nur wenige, grosse Roharmaturen, möglicherweise unvollständig) gegenüber 0.19 kg/Stück in DLG1. Der tiefe Wert lässt sich dadurch erklären, dass durch die detaillierte Aufnahme auch die zahlreichen kleinen Entlüftungsventile und Entleerhähnen (< 30 g) berücksichtigt sind. Damit wird die spezifische Masse zu $sM_{\text{Roharmaturen(Heizung)}} = 0.5 \text{ kg/Stück}$ bestimmt.

In denselben Gebäuden sind auch die Installationsdichten gemessen worden, wobei ein Zusammenhang zwischen sM und ID auffällt; je kleiner die spezifische Masse, desto grösser die Installationsdichte: 0.06 Stück/m² BGF in EFH3, 0.02 Stück/m² BGF in EFH5 und 0.12 Stück/m² BGF in DLG1. Damit wird die Installationsdichte zu $ID_{\text{Roharmaturen(Heizung)}} = 0.07 \text{ Stück/m}^2 \text{ BGF}$ bestimmt. Analog zu den Heizungsrohren wird die ID für die PRG aufgrund des hohen Anteils an Lagerhallen um ungefähr 70 % vermindert.

Tab. 3-12: Spezifische Masse (sM), Installationsdichte (ID) und potentieller Kupfergehalt (PKG) der Produktgruppe *Roharmaturen(Heizung)*.

Nutzungstyp	sM [kg/Stück]	ID [Stück/m ² BGF]	PKG [kg/m ² BGF]
EFH	0.50	0.07	0.035
MFH			
DLG			
PRG		0.02	0.010

3.2.2 Kupfergehalte der ARK-Häuser

Die potentiellen Kupfergehalte aus Kap. 3.2.1 sind zur Übersicht in Tab. 3-13 zusammengestellt⁹⁵. Durch Gewichtung (Multiplikation) des *potentiellen Kupfergehaltes* (PKG) einer bestimmten Ausführung mit den *Häufigkeiten der Produktgruppe* (f_{PG}) und *des Stoffes* ($f_{M_{PG}}$) erhält man den *Kupfergehalt* eines ARK-Hauses (KG) für diese Produktgruppe (vgl. Gl. 17 in Methoden)(Tab. 3-14). Dies ist durch die Gleichung mit den 4 Piktogrammen zwischen den Tabellen auf der nächsten Seite veranschaulicht. Dabei sind alle 4 Tabellen identisch angeordnet, das heisst Zeilen = Produktgruppen, Spalten = Nutzungstypen⁹⁶. Die Häufigkeitstabellen (f_{PG} und $f_{M_{PG}}$) sind im Anhang aufgeführt (Tab. A-18 und A-23).

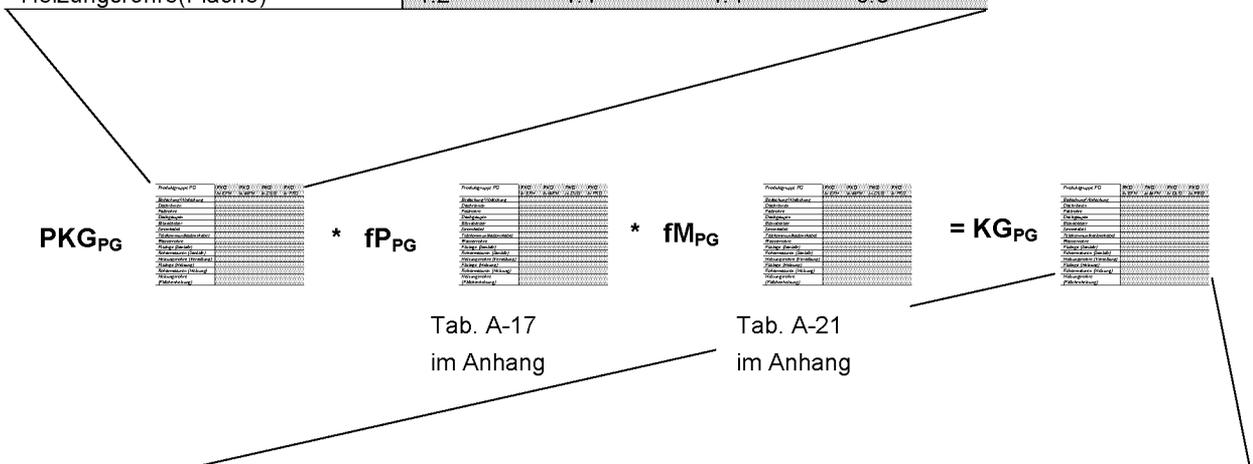
Beachte: Die vergleichende Darstellung der PKG gibt einen Überblick über die Verteilung der Kupfermassen eines Nutzungstyps unter der Annahme, dass die aufgeführten Produktgruppen verwendet und in Kupfer ausgeführt werden. Die Unterschiede in den Häufigkeiten des Auftretens der Produktgruppen sind also erst bei den Kupfergehalten (KG) berücksichtigt.

⁹⁵ Eine Zusammenstellung aller in Kap. 3.2.1 ermittelten Werte für die spezifische Masse der 14 Produktgruppen liefert Tab. A-6 im Anhang.

⁹⁶ Die Multiplikation erfolgt entlang der Tabellen und ist für jedes Tabellenfeld einzeln zu lesen (nicht wie bei einer Matrixmultiplikation!), z. B. $PKG_{\text{Stromkabel,EFH}} \cdot fP_{\text{Stromkabel,EFH}} \cdot fM_{\text{Stromkabel,EFH}} = KG_{\text{Stromkabel,EFH}}$ usf.

Tab. 3-13: Übersicht über die ermittelten *potentiellen Kupfergehalte* (PKG) der 14 untersuchten Produktgruppen in den 4 Nutzungstypen, getrennt nach Funktionsbereichen (Sichtjahr 2000). Einheit: [kg/m² *Bezugsfläche* (DF bzw. BGF)].

Produktgruppe PG	PKG in EFH	PKG in MFH	PKG in DLG	PKG in PRG
Bedachung/Abdeckung	6.53/0.67	6.53/0.67	6.53/0.67	6.53/0.67
Dachrinnen	0.36	0.35	0.44	0.44
Regenfallrohre	0.10	0.24	0.29	0.29
Dachgaupen	0.70	0.70	0.70	0.70
Blitzableiter	0.13	0.13	0.13	0.13
Stromkabel	0.14	0.11	0.34	0.17
Telekommunikationskabel	0.010	0.005	0.016	0.001
Wasserrohre	0.29	0.29	0.15	0.03
Fittings(Sanitär)	0.008	0.008	0.004	0.001
Roharmaturen(Sanitär)	0.045	0.030	0.030	0.030
Heizungsrohre(Verteilung)	0.68	0.68	0.68	0.19
Fittings(Heizung)	0.005	0.005	0.005	0.001
Roharmaturen(Heizung)	0.035	0.035	0.035	0.010
Heizungsrohre(Fläche)	1.2	1.1	1.4	0.8



Produktgruppe PG	KG in EFH	KG in MFH	KG in DLG	KG in PRG
Bedachung/Abdeckung	0.065	0.065	0.131	0.000
Dachrinnen	0.250	0.245	0.306	0.219
Regenfallrohre	0.057	0.082	0.103	0.074
Dachgaupen	0.195	0.223	0.111	0.000
Blitzableiter	0.040	0.027	0.067	0.107
Stromkabel	0.137	0.114	0.342	0.171
Telekommunikationskabel	0.010	0.005	0.013	0.000
Wasserrohre	0.029	0.029	0.015	0.003
Fittings(Sanitär)	0.001	0.001	0.000	0.000
Roharmaturen(Sanitär)	0.041	0.027	0.027	0.026
Heizungsrohre(Verteilung)	0.068	0.034	0.034	0.001
Fittings(Heizung)	0.001	0.000	0.000	0.000
Roharmaturen(Heizung)	0.023	0.023	0.023	0.001
Heizungsrohre(Fläche)	0.289	0.134	0.058	0.006

Tab. 3-14: Übersicht über die berechneten *Kupfergehalte* (KG) der 14 untersuchten Produktgruppen in den 4 Nutzungstypen, getrennt nach Funktionsbereichen (Stichjahr 2000). Einheit: [kg/m² *Bezugsfläche* (DF bzw. BGF)].

Vergleichende Auswertung der Kupfergehalte im Bauelement Dach (Stichjahr 2000)

Der KG des gesamten Dachbereichs beträgt bei den Wohngebäuden zwischen 0.60 und 0.70 kg/m² DF, bei den DLG ist er etwas höher mit 0.72 kg/m² DF. Demgegenüber liegt der KG der PRG (0.40 kg/m² DF) um 1/3 niedriger als jene der Wohngebäude.

In allen Nutzungstypen dominieren die Entwässerungssysteme (50 bis 73 %), wobei die Rinnen ein Mehrfaches der Fallrohre ausmachen (Abb. 3-6). Die Dachgaupen tragen bei den Wohngebäuden ca. ein Drittel des KG bei, nur ca. 15 % bei den DLG und sind vernachlässigbar bei den PRG. Die Bedachungen betragen ein Zehntel des Kupfers im Dachbereich der Wohngebäude und nahezu ein Fünftel bei den DLG, sind jedoch vernachlässigbar bei den PRG. Die Blitzableiter tragen bei den Wohngebäuden ca. 5 %, bei den DLG 10 % und bei den PRG mehr als 1/4 zum Gesamteinsatz bei.

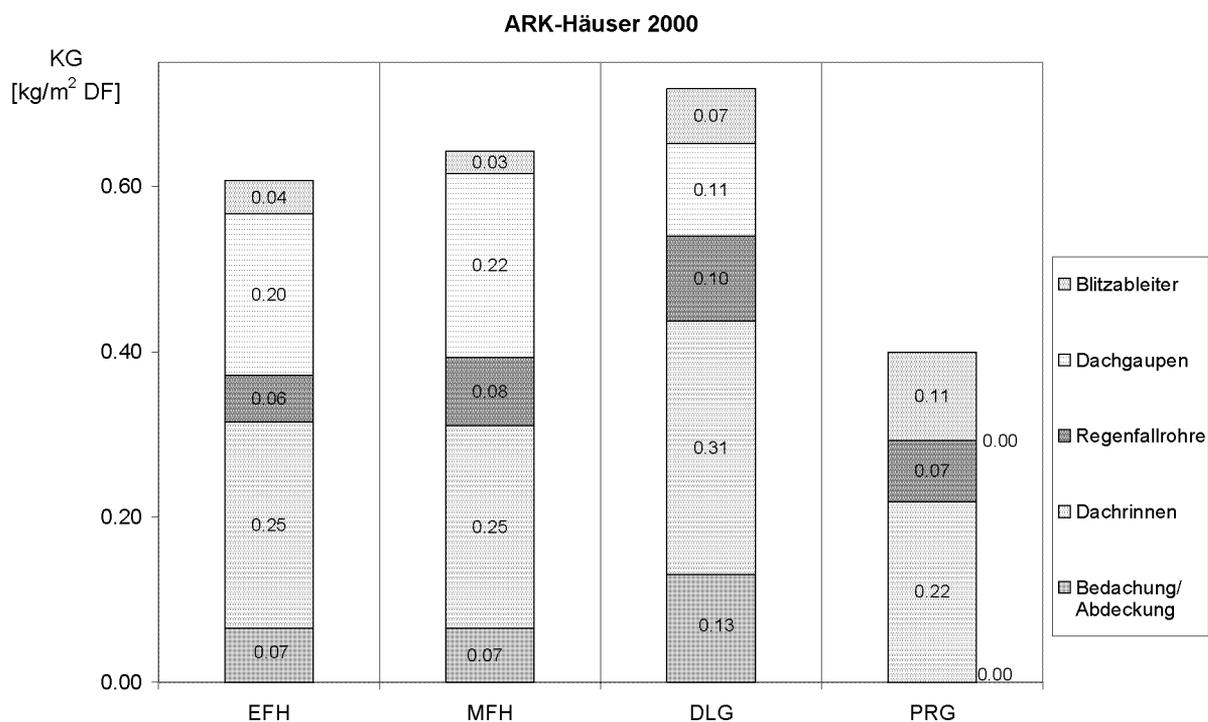


Abb. 3-6: Verteilmuster der Kupfergehalte (KG) pro ARK-Haus für das Bauelement *Dach*. Die Bezugsfläche ist die Dachfläche (DF).

Vergleichende Auswertung der Kupfergehalte im Bauelement Haustechnik (Stichjahr 2000)

In der Haustechnik variiert die Bedeutung der Funktionsbereiche entlang der Nutzungstypen stärker als im Dachbereich (jene der Produktgruppen)(Abb. 3-7). Die EFH weisen die höchsten KG_{HT} auf (0.60 kg/m² BGF). Auffällig ist der hohe KG_{FB} in den Heizungsanlagen, der vor allem auf den hohen Anteil an Flächenheizungen in Eigenheimen beruht. Auch in den anderen Funktionsbereichen sind die KG_{FB} der MFH etwas niedriger als diejenigen der EFH, so dass sie kumuliert nur ca. 1/3 des KG_{HT} in den EFH ausmachen (0.37 kg/m² BGF). Die DLG übersteigen die MFH aufgrund des hohen Einsatzes an Stromkabeln, die anderen Funktionsbereiche sind etwas niedriger als bei den Wohngebäuden. Von allen Nutzungstypen weisen die PRG mangels vergleichbarer Heizungsanlagen die niedrigsten KG in der Haustechnik auf. Auch in den anderen Funktionsbereichen sind die KG bei den PRG am tiefsten, lediglich die Stromkabel liegen über denjenigen der Wohngebäude.

Bei den Wohngebäuden dominiert die Heizungsanlage mit über 50 %, in den DLG und PRG beträgt sie lediglich ca. 20 % bzw. 5 %. Die KG der Sanitäranlagen variieren entlang der Nutzungstypen weniger stark (8 bis 15 %). Die Stromanlagen dominieren die „Nichtwohngebäude“ zu über 2/3 (ca. 70 % bei DLG und 80 % bei PRG), betragen hingegen nur grob ein 1/4 bei den Wohngebäuden (ca. 25 % bei EFH und 30 % bei MFH). Die Bedeutung der Telekommunikationsanlagen ist untergeordnet

und beträgt bei den DLG 2 bis 3 %, bei den Wohngebäuden unter 2 % und ist bei den PRG vernachlässigbar.

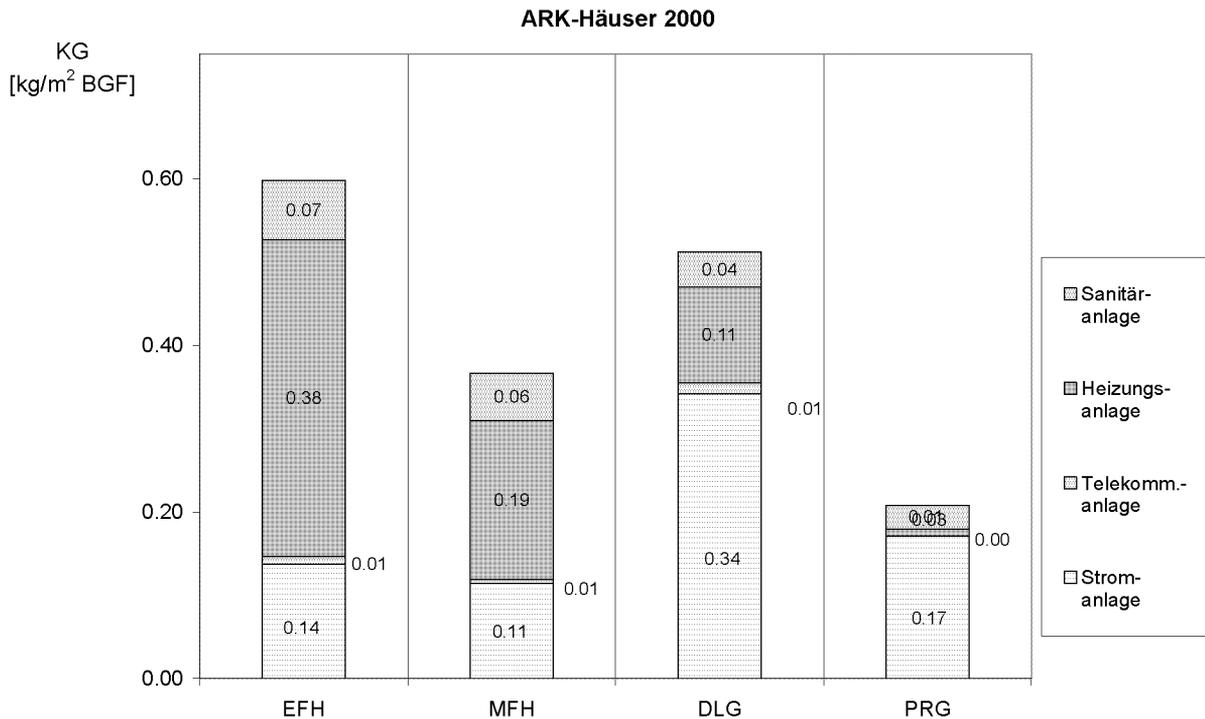


Abb. 3-7: Verteilmuster der Kupfergehalte (KG) pro ARK-Haus für das Bauelement „Haustechnik“. Die Funktionsbereiche Heizungs- und Sanitäranlage umfassen die entsprechenden Produktgruppen (Rohre, Fittings, Roharmaturen). Die Bezugsfläche ist die Bruttogeschossfläche (BGF).

Die Abb. 3-6 und Abb. 3-7 geben die Kupfergehalte in den vier ARK-Häusern an. Aufgrund der Modellannahmen bezüglich der ARK-Häuser (vgl. Kap. 2.4.1.2) ist das Verteilmuster der Produktgruppen bzw. Funktionsbereiche in einem ARK-Haus identisch mit dem Verteilmuster des entsprechenden Gebäudeteilbestandes (Nutzungstyps). Dies gilt für Produktgruppen bzw. Funktionsbereiche **innerhalb** eines Bauelements; ein Vergleich zwischen Kupfergehalten aus beiden Bauelementen ist nicht möglich, da die Bezugsflächen der beiden Bauelemente unterschiedlich sind. Erst durch die nachfolgende Betrachtung der absoluten Kupfermengen ist – trotz der Unterschiede zwischen den DF und BGF der Gebäudeteilbestände – ein Vergleich möglich.

3.2.3 Gesamtmengen an Kupfer in Gebäuden

Die KG des Jahres 2000 überschätzen den Zustand des Gebäudeparks, da im aktuellen Bestand auch ältere Haustechnikanlagen mit geringeren KG genutzt werden (Kap. 2.8.1.2). Durch Berücksichtigung der Erneuerungsverzögerung aufgrund längerer Renovationszyklen (Kap. 3.5.1), erhält man einen angepassten Zustand, der im Folgenden präsentiert wird⁹⁷.

Durch Multiplikation der KG (Tab. 3-14) mit den Bezugsflächen der entsprechenden Nutzungstypen erhält man eine Gesamtmenge des Kupferlagers von ca. 568'000 t in den Gebäuden, was einem Pro-Kopf-Lager von 79 kg entspricht⁹⁸. Diese Menge verteilt sich in den vier Teilbeständen auf die Funktionsbereiche wie in Tab. 3-15 zusammengefasst und in Abb. 3-8 dargestellt.

⁹⁷ Zur Verdeutlichung des Einflusses der Erneuerungsverzögerung ist – analog den folgenden Abbildungen – die Variante mit KG nur vom Jahr 2000 in Kap. A.1.8 dargestellt.

⁹⁸ Die Entwicklung der Bezugsflächen ist in Kap. A.1.1.3 im Anhang gegeben.

Tab. 3-15: Kompendium der Lager in den Gebäuden pro Funktionsbereich nach Teilbeständen (in Tonnen, gerundet auf 1'000 t).

Funktionsbereich	EFH	MFH	DLG	PRG	Total (gerundet)
Bedachung/Abdeckung	6'000	9'000	8'000	-	23'000
Dachentwässerung	28'000	44'000	24'000	34'000	131'000
Dachgaupen	18'000	30'000	6'000	-	55'000
Blitzableiter	4'000	3'000	4'000	13'000	24'000
Stromanlage	24'000	43'000	64'000	40'000	171'000
Telekommunikationsanlage	2'000	2'000	3'000	60	6'000
Sanitäranlage	17'000	31'000	10'000	6'000	63'000
Heizungsanlage	40'000	42'000	13'000	600	96'000
Gebäude gesamt	139'000	204'000	132'000	93'000	568'000

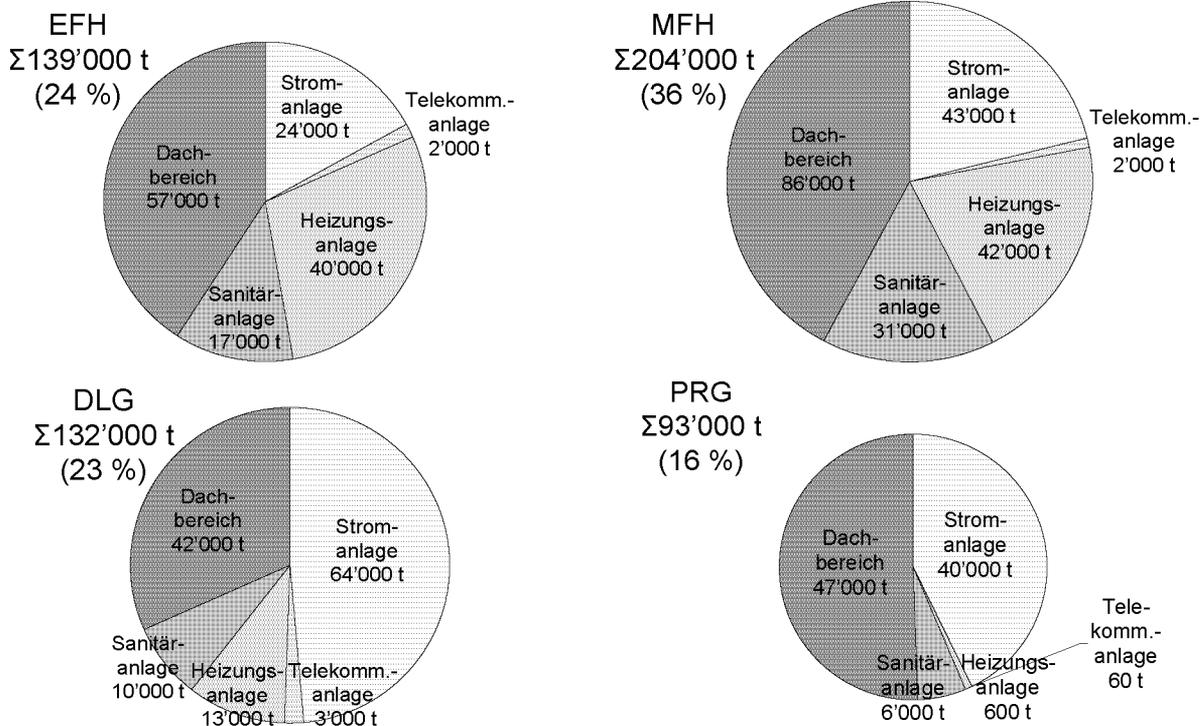


Abb. 3-8: Verteilung des Kupferlagers in den vier Teilbeständen *Einfamilienhaus* (EFH), *Mehrfamilienhaus* (MFH), *Dienstleistungsgebäude* (DLG) und *Produktionsgebäude* (PRG) auf die Funktionsbereiche. Mengenangaben der Funktionsbereiche in Tonnen (gerundet), daneben die Summe aller Funktionsbereiche pro Teilbestand (Σ); die Prozentangaben beschreiben den Anteil des Kupferlagers im Teilbestand bezogen auf den Gesamtbestand der Gebäude ($\Sigma = 100\%$).

Durch Berücksichtigung der DF und BGF der Teilbestände werden die Funktionsbereiche über die Bauelementsgrenze hinweg miteinander vergleichbar, nämlich auf der Ebene der Kupfermassen. Da die BGF die DF übertrifft (bis zu über 3.5mal bei den DLG), werden die KG aus der Haustechnik überproportional stark gewichtet gegenüber denen aus dem Dach (Tab. 3-16), so dass das Lager der Haustechnik – trotz niedrigerer KG – jenes des Dachbereichs jeweils übersteigt (ausgenommen die PRG)(Abb. 3-8). Das Ausmass dieser Verschiebung hängt vom Verhältnis DF/BGF der ARK-Häuser ab: je kleiner das Verhältnis, desto grösser die Verschiebung (Tab. 3-16).

Tab. 3-16: Bezugsflächen der Teilbestände: Bruttogeschossfläche (BGF), Dachfläche (DF) und DF/BGF-Verhältnis⁹⁹. Bezugsflächen gemäss Tab. 2-8.

Teilbestand	BGF [10 ⁶ m ²]	DF [10 ⁶ m ²]	DF/BGF
EFH	189	93	0.49
MFH	414	134	0.32
DLG	207	58	0.28
PRG	261	118	0.45

Ferner unterscheidet sich für jeden Funktionsbereich das Verhältnis der KG zwischen den ARK-Häusern vom Verhältnis der Kupferlager zwischen den Nutzungstypen. Grund hierfür sind die unterschiedlichen Grössen der Teilbestände (BGF bzw. DF, Tab. 3-16). Anschaulich ist dies an der Kupfermenge im Dachbereich: So weisen zwar die DLG einen nahezu doppelt so grossen KG_{Dach} wie die PRG auf (Abb. 3-6: 0.72 vs. 0.40 kg/m² DF)¹⁰⁰, doch wegen der grossen Dachfläche der PRG (Tab. 3-16: 118 vs. 58 · 10⁶ m²) übertrifft das Lager im Dachbereich der PRG jenes der DLG (Abb. 3-8: 47'000 t vs. 42'000 t).

Nach Zusammenfassung der Einzelergebnisse aus den Teilbeständen ist ersichtlich, dass der Dachbereich, die Stromanlage und die Heizungsanlage zusammen mehr als 85 % des Gesamtlagers ausmachen, wobei der Dachbereich mit seinen Blechen (> 40 %) der kupferreichste Funktionsbereich ist (Abb. 3-9). Die Strom- und die Heizungsanlage tragen zu ca. 30 % bzw. 15 % zum Gesamtlager bei. Die verbleibenden 10–15 % werden massgeblich durch die Sanitäranlage aufgebaut (11 %), wohingegen die Telekommunikation mit ca. 1 % vernachlässigbar bleibt. Das Kupferlager in den Gebäuden befindet sich demnach zu ca. 40 % im Aussenbereich und zu 60 % in der Haustechnik.

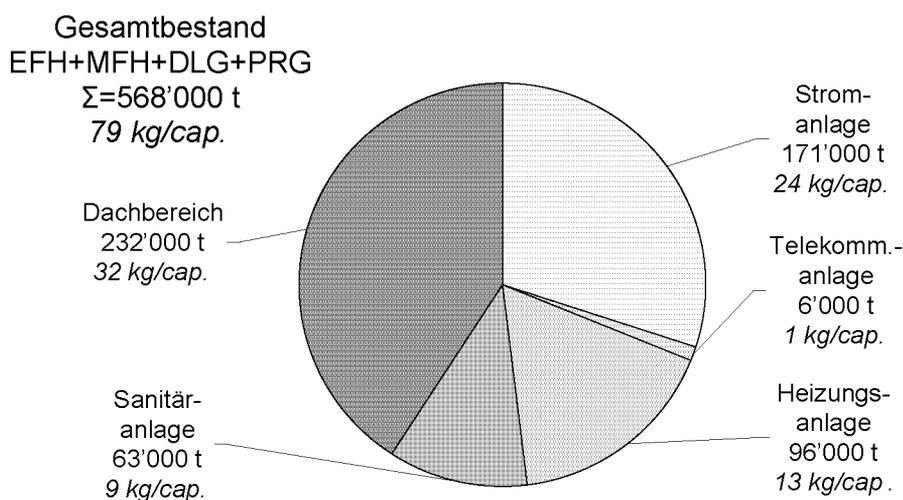


Abb. 3-9: Verteilung des Kupferlagers im Gebäudebestand der Schweiz auf die Funktionsbereiche. Mengenangaben in [t] (gerundet) bzw. in [kg/capita] (kursiv).

⁹⁹ Das Verhältnis von Dachfläche zu Bruttogeschossfläche (DF/BGF) ist überwiegend durch die durchschnittliche Geschosshöhe geprägt, wird aber auch von der durchschnittlichen Dachneigung und der Grundrissfläche beeinflusst.

¹⁰⁰ Dienstleistungsgebäude dienen überdurchschnittlich häufig repräsentativen Funktionen und setzen dabei aus ästhetischen Gründen die Kupferpatina ein (bei Kirchen, Theatern, Amtsgebäuden usw.). Die Kirchendächer, insbesondere der Kirchtürme, könnten wegen der starken Dachneigung unterschätzt werden. Andererseits haben Bürogebäude häufig Flachdächer ohne Kupferbedachung. Im verwendeten Datensatz wird der Einfluss der repräsentativen Gebäude höher eingestuft und die Häufigkeit $f_{\text{Bedachung,DLG}}$ zu 0.02 (2 %) bestimmt, gegenüber 0.01 (1 %) bei den Wohngebäuden. Der KG_{Dach,DLG} wird jedoch allgemein von Dachrinnen und Gaupen dominiert, daher bewirkt die genannte Verdoppelung der KG_{Bedachung,DLG} eine Erhöhung des KG_{Dach,DLG} von weniger als 10 %.

3.3 Kupferlager im Infrastrukturbereich

Die Kupferlager in den drei Teilbereichen der Infrastruktur, *Starkstrom*, *Telekommunikation* und *Stromversorgung von Transportmitteln*, werden kapitelweise besprochen. Im Wesentlichen beschränkt sich die Erfassung auf die Leitungsnetze.

3.3.1 Starkstrom

Stranglängen

Die Gesamtlänge der Leitungssysteme des Höchstspannungsnetzes beträgt knapp 6'700 km, wovon weniger als 1 % in Form von Kupferkabeln verlegt ist (Tab. 3-17).

Tab. 3-17: Stranglängen des Höchstspannungsnetzes der Schweiz, Stand 1.07.2003. – * Die 380/400 kV-Leitungen bestehen aus Aluminium. Quelle: Auskunft der ETRANS (SCHMID 2003).

Nennspannung [kV]	Stranglänge gesamt [km]	Stranglänge Kupfer [km]
380/400	1'641	0*
220	5'047	15,2

Das Ergebnis der Stranglängenerhebung bei sechs Elektrizitätsverteilern der Schweiz (Tab. 2-13) ist in Abb. 3-10 dargestellt. Die grösserflächigen kantonalen Verteilwerke (EKZ, CKW, SAK) übertreffen die städtischen Verteilwerke (ewz, iw, ewb) an Stranglänge deutlich.

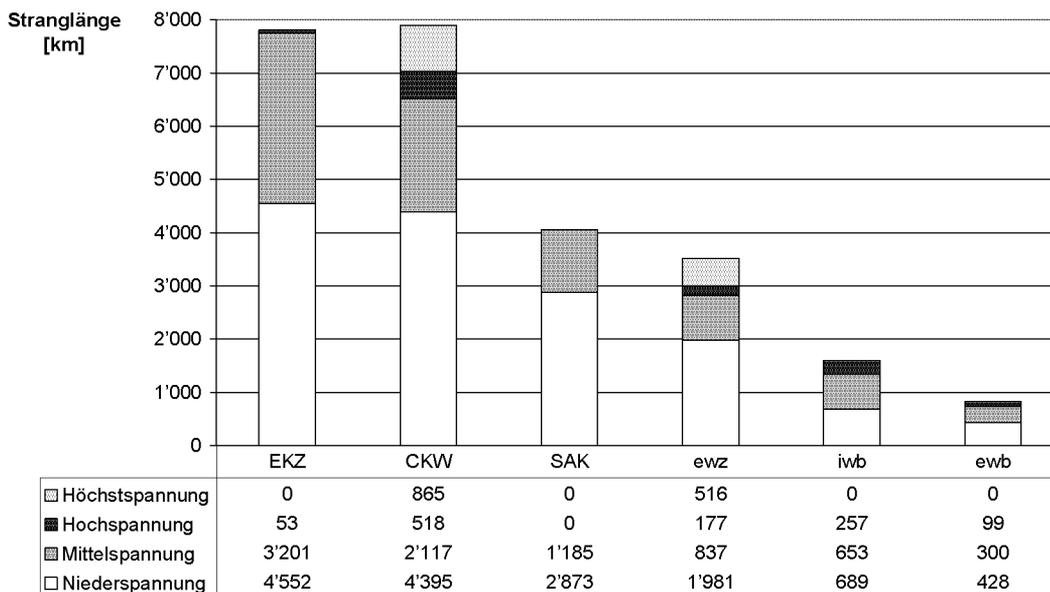


Abb. 3-10: Stranglängen der Starkstromverteilnetze sechs ausgewählter wichtiger Elektrizitätswerke der Schweiz. Quelle: eigene Erhebungen.

Damit lässt sich für jeden Elektrizitätsverteiler die Flächennetzdichte (ND_A) der vier Spannungsebenen separat berechnen (Abb. 3-11).

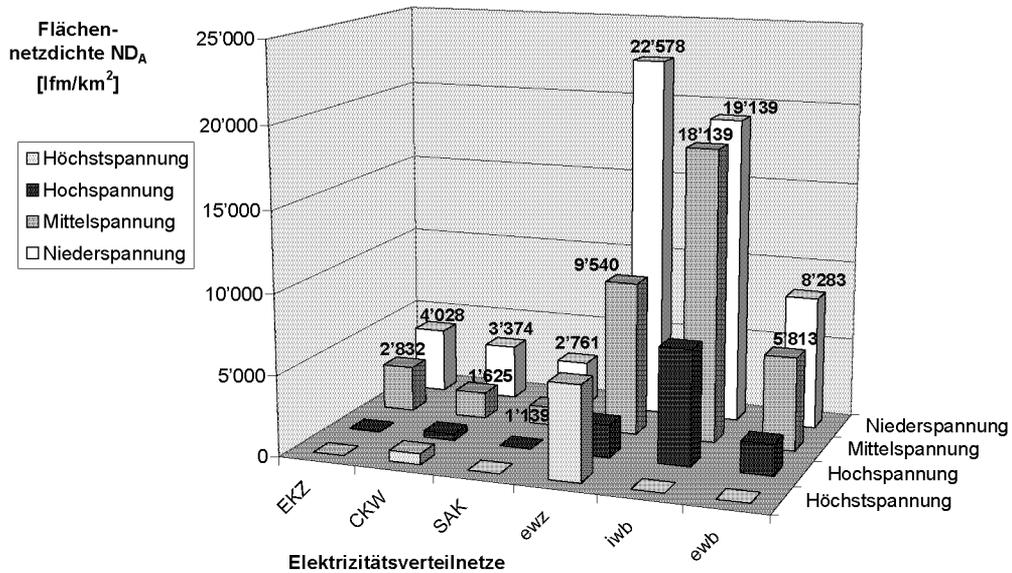


Abb. 3-11: Flächenbezogene Netzdichte (ND_A) von sechs ausgewählten Elektrizitätsverteilern der Schweiz, bezogen auf die versorgte Fläche. Quelle: eigene Erhebungen.

Aus den Erhebungen werden zur Lagerberechnung folgende Netzdichten geschlossen und durch Gewichtung der Landschaftszonen auf die Schweiz hochgerechnet (Tab. 3-18).

Tab. 3-18: Durchschnittliche flächenbezogene Netzdichten des städtischen (ND_{A-S}) und ländlich-kantonalen Gebietes (ND_{A-L}) für die drei unteren Spannungsebenen. Angaben in [lfm/km^2]. Quelle: eigene Erhebungen.

Spannungsebene	ND_{A-L} EKZ, CKW, SAK	ND_{A-S} ewz, iwB, ewb	ND_{A-CH}
Hochspannung	164	3'040	308
Mittelspannung	1'871	10'208	2'287
Niederspannung	3'395	17'665	4'108

Analog lässt sich die Einwohnernetzdichte (ND_{EW}) der vier Spannungsebenen berechnen (Abb. 3-12) und daraus durch Gewichtung auf die Schweiz hochrechnen (Tab. 3-19).

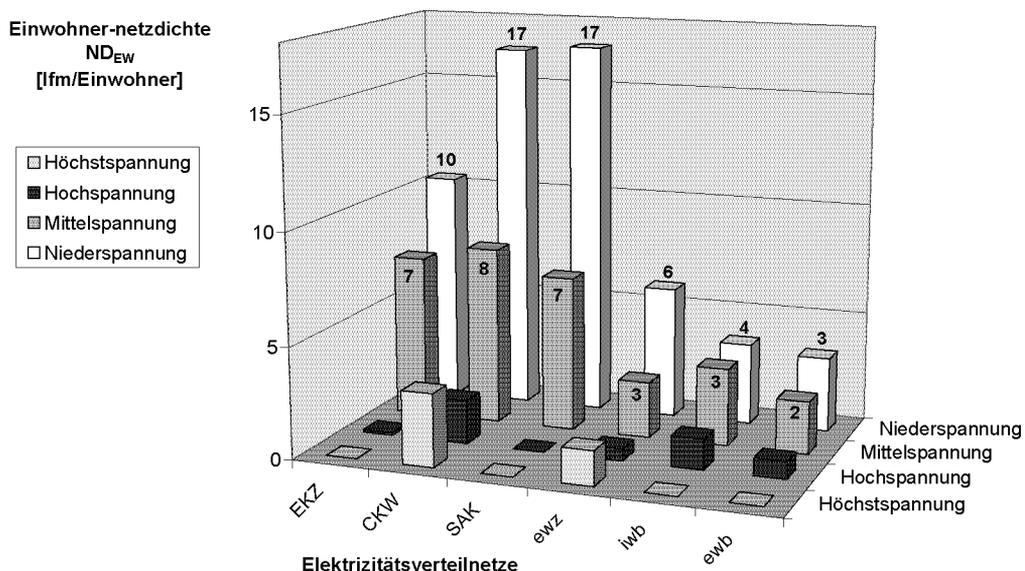


Abb. 3-12: Einwohnerbezogene Netzdichte (ND_{EW}) von sechs ausgewählten Elektrizitätsverteilern der Schweiz, bezogen auf die versorgten Einwohner. Quelle: eigene Erhebungen.

Aus den Erhebungen werden zur Lagerberechnung folgende Netzdichten geschlossen und durch Gewichtung der Landschaftszonen auf die Schweiz hochgerechnet (Tab. 3-19).

Tab. 3-19: Durchschnittliche Einwohnernetzdichten der Stadt (ND_{EW-S}) und des Landes (ND_{EW-L}) für die drei unteren Spannungsebenen. Angaben in [lfm/Einwohner]. Quelle: eigene Erhebungen.

Spannungsebene	ND_{EW-L} EKZ, CKW, SAK	ND_{EW-S} ewz, iwz, ewb	ND_{EW-CH}
Hochspannung	1	1	1
Mittelspannung	7	3	5
Niederspannung	13	5	10

Die Ergebnisse der Hochrechnungen via Flächen- und Einwohnerbezug sind in Abb. 3-13 gegenübergestellt und dabei mit dem Mittelwert der beiden Hochrechnungen versehen.

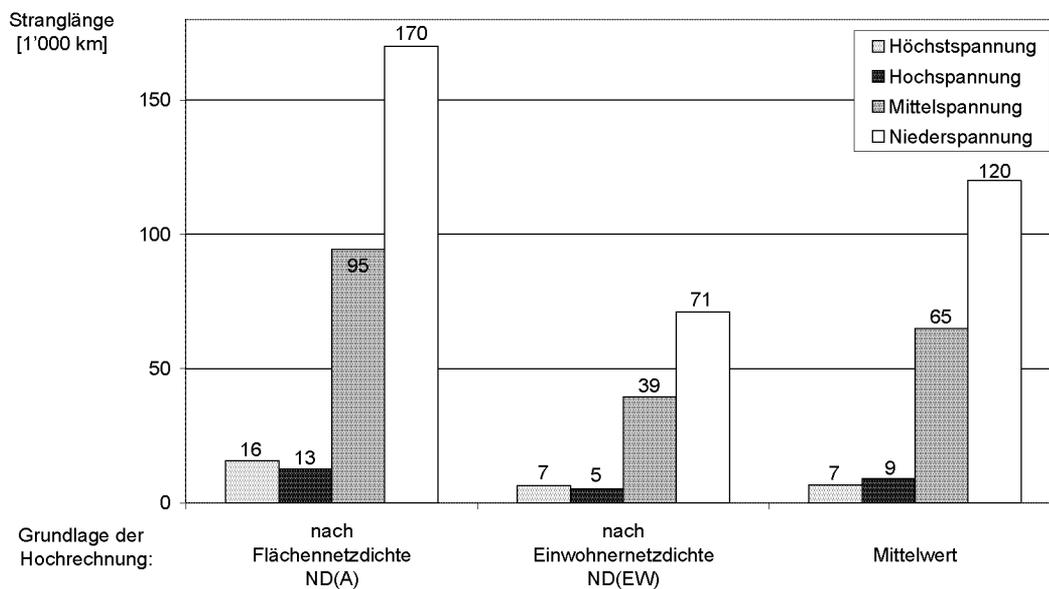


Abb. 3-13: Stranglängen des schweizerischen Stromnetzes, geordnet nach den vier Spannungsebenen *Höchstspannung* (HöS), *Hochspannung* (HoS), *Mittelspannung* (MS) und *Niederspannung* (NS). Die Hochrechnung erfolgte zum einen auf Basis der Flächennetzdichte, zum andern auf der Basis der Einwohnernetzdichte. Quelle: eigene Erhebungen.

Die Stranglängen der Schweiz lassen sich durch Bildung des Mittelwertes der Hochrechnungen nach der Flächennetzdichte und der Einwohnernetzdichte (Abb. 3-13) und durch Heranziehen der Berechnung für das Höchstspannungsnetz (Tab. 3-17) näherungsweise wie folgt bestimmen:

- Höchstspannung 6'700 km¹⁰¹
- Hochspannung 9'000 km
- Mittelspannung 65'000 km
- Niederspannung 120'000 km

¹⁰¹ Die Netzlänge der Höchstspannungsleitungen (HöS) wird direkt aus Tab. 3-17 übernommen.

Verlegeart

Nach Auswertung der Literaturangaben in Kombination mit eigenen Erhebungen lassen sich die Kabelanteile bestimmen (Tab. 3-20).

Tab. 3-20: Kabelanteil des schweizerischen Starkstromverteilnetzes: Literaturwerte und gemittelte Werte, die für die Hochrechnung eingesetzt werden. Angaben in Prozent der gesamten Stranglänge. – * folgt direkt aus Tab. 3-17; # wird durch Dreisatz ermittelt (vgl. Abb. 2-11).

Spannungsebene	Stranglänge [km]	Kabelanteil [%]			Kabel [km]	Freileitung [km]
		nach EGGENBERGER (1990)	nach KNOEPFEL (1995)	gemittelte Werte		
Höchstspannung	6'700	1	1	0.2*	67	6'633
Hochspannung	9'000	11	11	11	990	8'010
Mittelspannung	65'000	56	45	51	33'150	31'850
Niederspannung	120'000	70	95	73 [#]	87'600	32'400

Leitungsmaterial

Für den Kabelanteil wird ausschliesslich von Kupferleitern ausgegangen (HAEMMERLE 2001; DKI 1992), doch bei den Freileitungsdrähten nimmt der Kupferanteil mit zunehmender Spannungsebene ab. Die Auswertung von Expertenaussagen ist in Tab. 3-21 abgebildet.

Tab. 3-21: Prozentualer Kupferanteil der Kabel und Freileitungen in den verschiedenen Spannungsebenen des schweizerischen Starkstromnetzes. Durch Multiplikation der Leitungslängen aus Tab. 3-20 werden die Stranglängen der „Kupferkabel“ und „Kupferfreileitungen“ berechnet. Quelle: Expertenbefragung (IMBAUMGARTEN 2003b).

Spannungsebene	Kupferanteil [%]		Stranglänge [km]	
	Kabel	Freileitung	Kupferkabel	Kupferfreileitung
Höchstspannung	100	0	67	–
Hochspannung	100	10	990	801
Mittelspannung	100	90	33'150	28'665
Niederspannung	100	100	87'600	32'400

Strangquerschnitt – spezifische Masse

Kabel

Die spezifische Masse von Starkstromkabeln korreliert bis auf wenige Abweichungen linear mit dem Leiterquerschnitt (Abb. 3-14). Verschiedene Kabeltypen gleichen Leiterquerschnitts, die in den häufigen Leiterquerschnitten 50 mm², 95 mm², 150 mm² und 240 mm² auftreten, weisen jeweils eine Bandbreite spezifischer Massen auf. Grund hierfür sind die verschiedenen Ausführungsvarianten der Abschirmungsader¹⁰². Fernerhin zeigt Abb. 3-14, dass mit steigender Spannungsebene grössere Leiterquerschnitte eingesetzt werden. Die Leiterquerschnitte der „Normkabel“ einer Netzebene

¹⁰² Die abgeschirmten Kabel sind stets schwerer als die unabgeschirmten (plus 13 % bis 24 %), wobei die Abschirmung der MS-Kabel (Einleiterkabel) relativ kleiner ist als diejenige der NS-Kabel (Mehrleiterkabel)(bis zu 8 %).

variieren über mehrere Grössenordnungen, wobei die Leiterquerschnittsbereiche der verschiedenen Netzebenen einander stark überlappen (BRUGG KABEL 1996).

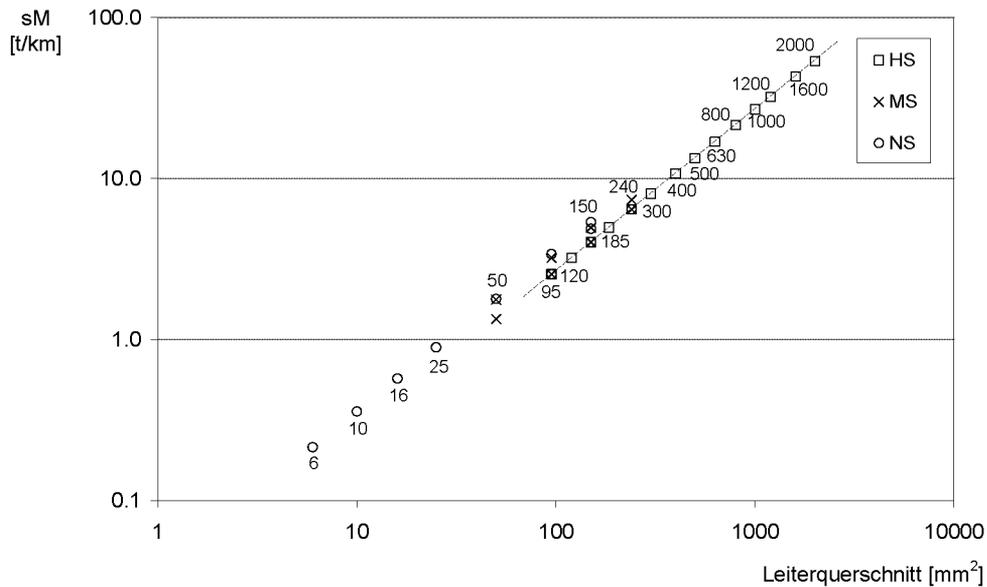


Abb. 3-14: Spezifische Masse (sM) von Kabelsträngen von Starkstromnormkabeln in Abhängigkeit ihrer Leiterquerschnitte (doppellogarithmische Darstellung). Die Kabeltypen sind nach Spannungsebene sortiert (HS: Hochspannung; MS: Mittelspannung; NS: Niederspannung). Quelle: Kabelkatalog (BRUGG KABEL 1996).

Die dominanten Leiterquerschnitte sind per Spannungsebene in drei ausgewählten Elektrizitätswerken untersucht worden (Tab. 3-22).

Tab. 3-22: Einsatz verschiedener Leiterquerschnitte in den Spannungsebenen Hochspannung, Mittelspannung und Niederspannung dreier ausgewählter Elektrizitätswerke (ohne Höchstspannung) * teilweise mit zusätzlichem Kabelmantel aus Kupfer (ca. 120 mm²). Quelle: eigene Erhebung.

Spannungsebene	Netzbetreiber	Länge [km]	Anteil der Leiterquerschnitte [mm ²] an Gesamtlänge [%]								
			25	50	95	150	185	240	300	400	800
Hochspannung	ewz	81								100*	
	iwb	88								100	
	ewb	24								50	50
Mittelspannung	ewz	807		1	2	69	22	5	1		
	iwb	653			100						
	ewb	298		3	32	33		32			
Niederspannung	ewz	1900				60	40				
	iwb	680				100					
	ewb	419		5		95					

Daraus werden die durchschnittlichen Leiterquerschnitte für Höchstspannung und Hochspannung zu 400 mm², bei Mittelspannung zu 150 mm² und bei Niederspannung zu 120 mm² bestimmt.

Standardkabel haben drei Adern, Ceanderkabel haben eine zusätzliche Abschirmungsader bzw. einen PEN-Leiter, also vier Adern. Eine Untersuchung des Strangaufbaus der Starkstromkabel eines Elektrizitätsverteilers (CKW-Netz mit Σ = 3651 km) ergibt einen Anteil abgeschirmter Leitungen von 77 %, also eine durchschnittliche Aderzahl von ca. 3.8 Ader/Strang (Tab. 3-23).

Tab. 3-23: Aufbau des Verteilnetzes eines Elektrizitätsverteilers (CKW) nach Leiterquerschnitten mit Angabe des Anteils der Ceanderkabel am gesamten Kabelnetz. Quelle: eigene Erhebung.

	Leiterquerschnitte							Gesamt-länge [km]
	6	25	50	95	150	240	400	
Länge Kupferkabel [km]	312	2'078	415	202	476	115	53	3'651
Anteil Ceanderkabel [km]	253	1'953	137	186	181	115	0	2'825
Anteil Ceanderkabel [%]	81	94	33	92	38	100	0	77

Für das Niederspannungs- und Mittelspannungsnetz werden 3.8 Adern/Strang zugrunde gelegt. Für das Hoch- und Höchstspannungsnetz werden keine Ceanderkabel hergestellt, daher werden 3.0 Adern/Strang angenommen (BRUGG KABEL 1996).

Damit erhält man pro Strang folgende spezifische Massen für die vier Spannungsebenen (Tab. 3-24):

Tab. 3-24: Spezifische Masse der Kabel für die vier Spannungsebenen.

Spannungsebene	spezifische Masse [t/km]
HöS	10.72
HS	10.72
MS	5.09
NS	4.07

Freileitung

Bei Freileitungen besteht ein Strangsystem aus drei massiven Drähten mit Leiterquerschnitten zwischen 16 und 600 mm² (bei Aldrey bis 1000 mm²)(NEXANS 2004). Üblich sind für die NS- und MS-Ebene Drähte mit Durchmesser von 6 oder 8 mm bzw. Leiterquerschnitten von 28 oder 50 mm² (AEGERTER 2003). Unter der Annahme eines durchschnittlichen Leiterquerschnitts von 40 mm² ergibt dies eine spezifische Masse von 1.07 t/km Strang.

Transformatoren

Das Kupferlager der Transformatoren ist gleich dem Produkt aus der Anzahl Transformatoren und deren spezifischen Massen. Je nach Funktion (Stations- oder Verteilungstransformatoren) variiert auch die Transformatorengrösse. Hier werden drei Transformatorengrössen unterschieden (Tab. 3-25).

Tab. 3-25: Kupferlager in den Transformatoren des Starkstromnetzes der Schweiz. Quelle: Literatur (KNOEPFEL 1995).

Trafoleistung [MVA]	Anzahl	spezifische Masse [t/Anlage]	Gesamtmasse [t]
< 2.5	45'000	0.6	27'000
2.5 – 50	800	6	4'800
> 50	200	15	3'000
Total	-	-	34'800

Zusammenfassung Starkstrom

Für die Kabel- und Freileitungen sowie die Transformatoren ergibt sich folgende Lagerverteilung (Abb. 3-15):

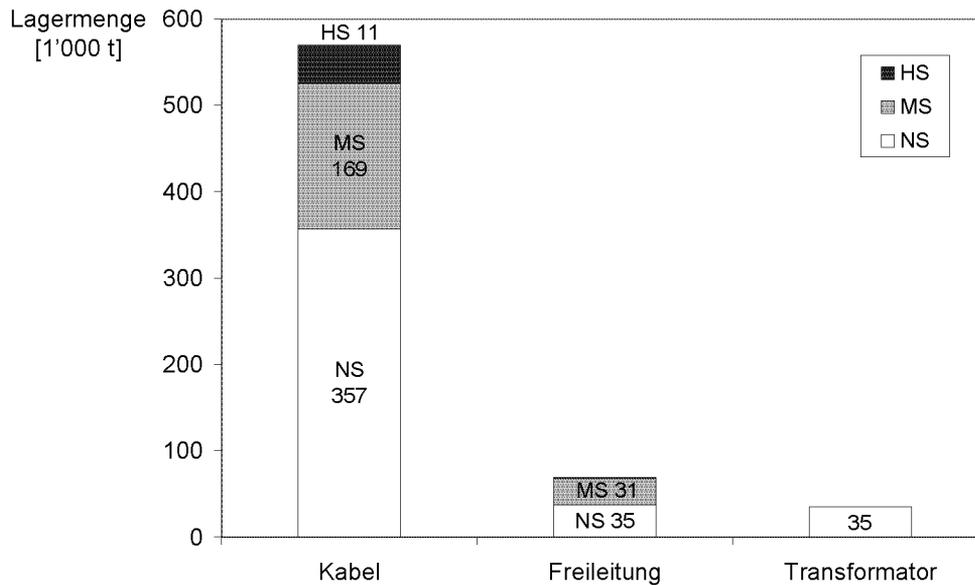


Abb. 3-15: Die Kupferlager im Starkstromnetz (in 1'000 t), segmentiert nach Spannungsebenen. Die Lager der Kupferkabel im Höchstspannungsbereich sind zu gering zur Darstellung. Quelle: eigene Berechnung.

3.3.2 Telekommunikation

Das Kupferlager in Telekommunikationsanlagen beläuft sich auf ca. 120'000 t und verteilt sich ungefähr gleich auf das Fern- und Regionalnetz sowie das Anschlussnetz. Über 90 % davon bestehen aus Fernmeldekabeln, der Rest aus Koaxialkabeln (Abb. 3-16).

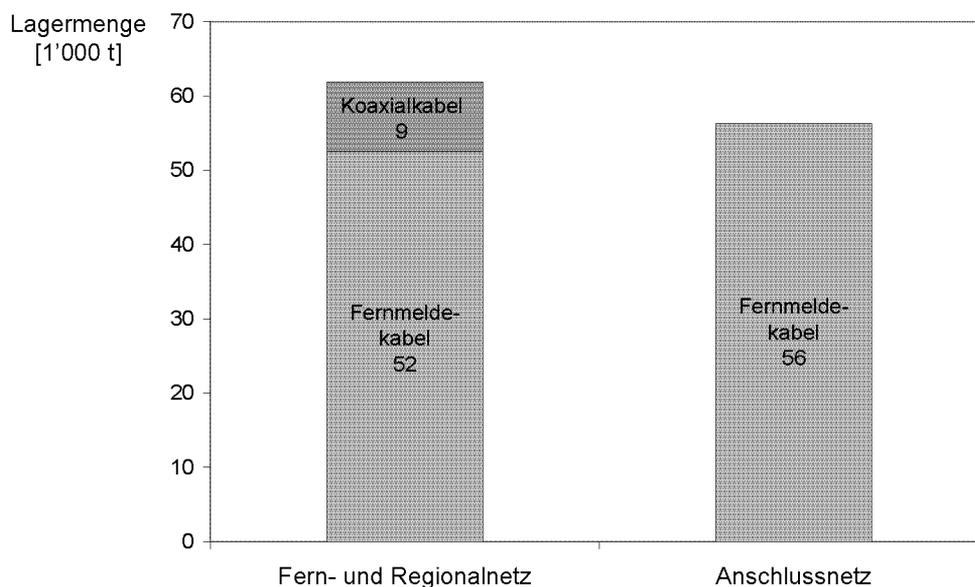


Abb. 3-16: Kupferlager in Telekommunikationsanlagen, segmentiert nach Leitungsnetzebenen.

3.3.3 Stromversorgung von Transportmitteln

Das Kupferlager im Transportbereich (Stromversorgung) beläuft sich auf ca. 12'000 t (Abb. 3-17). Das Gros von über 90 % ist in den Bahnoberleitungen gebunden, wobei sich diese auf SBB und Privatbahnen im Verhältnis 2:1 aufteilen. Der Rest verteilt sich auf Tram und Bus, der grössere Anteil davon in den Trolleybus-Oberleitungen.

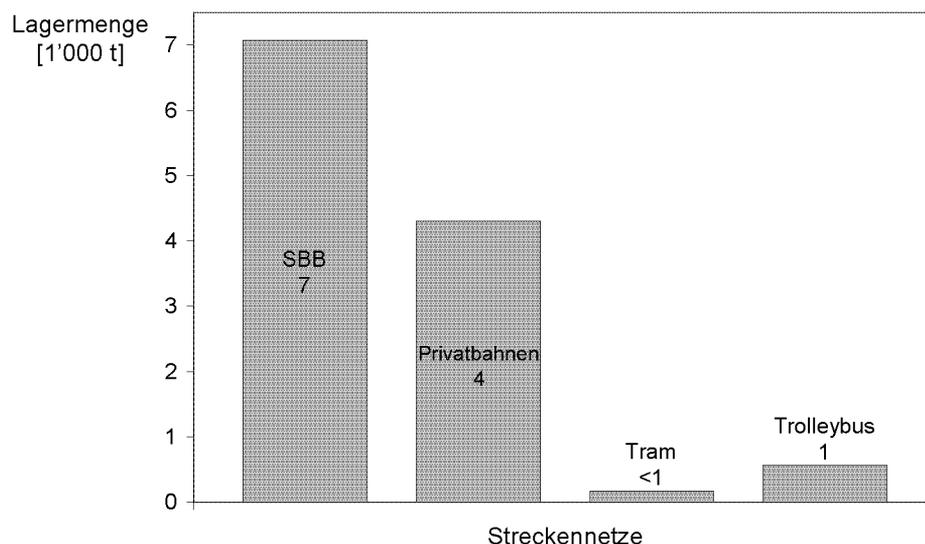


Abb. 3-17: Kupferlager in den Oberleitungen der öffentlichen Transportmittel, segmentiert nach Verkehrsnetzen.

3.3.4 Gesamtmengen an Kupfer in der Infrastruktur

Die Gesamtmenge des Kupfers in der Infrastruktur wird zu ca. 767'000 t bestimmt, was einem Pro-Kopf-Lager von 106 kg/capita entspricht. Der weitaus grösste Teil, mehr als 80 %, befindet sich im Starkstromnetz der Schweiz (Abb. 3-18). Der Rest ist in den Telekommunikationsanlagen und nur ein geringer Teil dient der Stromversorgung des öffentlichen Transportwesens (< 2 %). Innerhalb des Stromnetzes dominieren die Kabel, nur 10 % sind in den Freileitungen und 5 % in den Transformatoren enthalten.

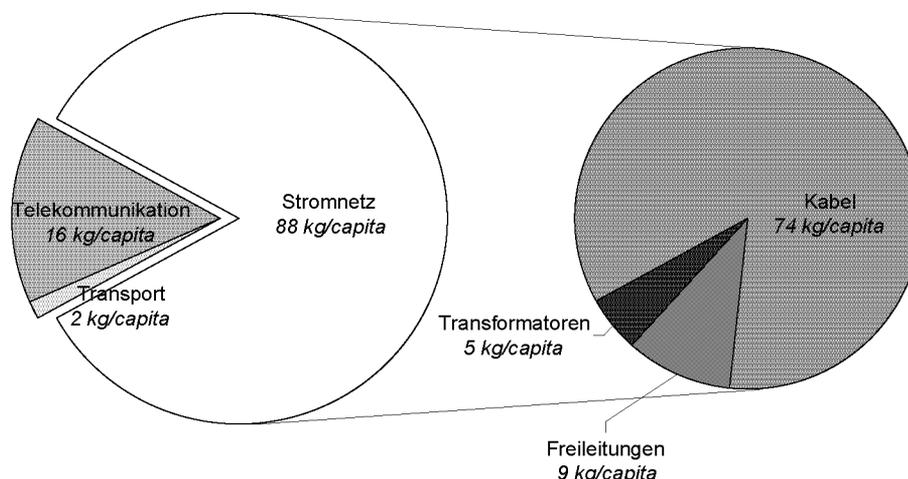


Abb. 3-18: Pro-Kopf-Kupferlager in der Infrastruktur, mit genauerer Betrachtung des Stromnetzes („Zoom“ in rechtes Kuchendiagramm).

3.4 Weitere Kupferlager

3.4.1 Mobilien

In der Summe aller Mobilien (Gütergruppen) erhält man ein Lager von ca. 245'000 t; das Pro-Kopf-Lager beträgt damit 34 kg. Die Ausgangsdaten sind in Tab. 3-26 aufgeführt.

Tab. 3-26: Kupferführende Mobilien: Anzahl, Masse, Konzentration und Lagermenge. Quelle: Literatur und plausibilitätsgeprüfte Abschätzungen.

Produkt/Gut	Stückzahl n_i	Stückgewicht m_i [t]	Gütermasse M_i [1000t]= $n_i \times m_i$	Kupferkonzentration c_i [%/100]	Kupfermenge pro Gut $m_{Cu}[t]=M_i \times c_i$
Lokomotiven	2'100	80.000	168	0.080	13'440
Personenwagen (Schiene)	5'200	50.000	260	0.020	5'200
Güterwagen (Schiene)	26'000	20.000	520	0.000	0
Personenwagen (Pw, inkl. Kleinbusse)	3'500'000	1.000	3'500	0.007	24'500
Lastkraftwagen, inkl. Traktoren und Motorkarren	500'000	2.400	1'200	0.020	24'000
Motorräder, inkl. Motorfahrräder	730'000	0.100	73	0.010	730
Tram	900	22.000	20	0.070	1'386
Velo	4'000'000	0.015	60	0.010	600
Waschmaschinen	2'000'000	0.100	200	0.010	2'000
Tumbler/Trockner	1'000'000	0.035	35	0.030	1'050
Kühlgeräte	3'300'000	0.050	165	0.010	1'650
Kochherd	4'000'000	0.060	240	0.010	2'400
Geschirrspüler	1'287'000	0.060	77	0.020	1'544
Lampen	3'000'000	0.100	300	0.010	3'000
Diverse (Föhn, Staubsauger etc)	3'300'000	0.050	165	0.040	6'600
Unterhaltungselektronik	7'200'000	0.060	432	0.040	17'280
Büromatik	3'600'000	0.030	108	0.040	4'320
Geschirr und Besteck	3'000'000	0.050	150	0.030	4'500
Münzgeld	7'200'000	0.003	22	0.750	16'200
Schlüssel	7'200'000	0.002	11	0.700	7'560
Werkzeug, Nägel, Schrauben, Beschläge	7'200'000	0.005	36	0.700	25'200
Sonstiges (Sport, Kerzenständer, Dekorationen, Kunstwerke, Schreibgeräte, Schmuck)	7'200'000	0.002	14	0.700	10'080
Produktionsmaschinen (inkl. Landwirtschaft)	7'200'000	1.000	7'200	0.010	72'000
Summe					245'240

3.4.2 Deponien

Die Kupfermenge in den Deponiekörpern der Schweiz wird über die jährlich anfallenden Abfälle berechnet (Kap. 2.6.2). Unter der Annahme einer über 50 Jahre konstant anfallenden Schlackemenge von 0.5 Mt/a beträgt die Schlackendeponiemenge 25 Mt. Durch Multiplikation mit der Kupferkonzentration von 10 ± 3 g Cu/kg Schlacke ist dies eine Kupfermenge von $250'000 \pm 75'000$ t.

Zwar waren die Deponiemengen vor 1970 geringer als heute, doch wird angenommen, dass die vor 1950 anfallenden Mengen den Unterschied näherungsweise ausgleichen.

Die Kupferfracht der „sonstigen Abfälle“ wird in Tab. 3-27 anhand der vier kupferrelevanten Abfallfraktionen berechnet. Die jährliche Kupferfracht beträgt ca. 2'100 t/a. Unter der Annahme einer über 50 Jahre konstant anfallenden Menge „sonstiger Abfälle“ sind dies ca. $110'000 \pm 25'000$ t.

Tab. 3-27: Kupferrelevante Abfallfraktionen in der Schweiz (ausgenommen KVA-Schlacken). Kupferfracht als Produkt aus der anfallenden Abfallmenge und deren Kupferkonzentration, bezogen auf die Trockensubstanz (TS). Die angegebenen Werte sind gerundete Werte. Quelle: Mengenangaben: BUWAL (1999a); Konzentrationen: siehe Tabelle.

Abfallfraktion	anfallende Menge [10 ³ t/a]	Kupferkonzentration [g/kg TS]	Quelle der Kupferkonzentration	Kupferfracht [t/a]
deponiertes Bausperrgut ¹⁰³	1'440	0.5	AMT FÜR UMWELTSCHUTZ UND ENERGIE BL (1991; 1991)	720
RESH ¹⁰⁴	40	23	BUWAL (1999a), KELLER (1999)	920
Sonderabfälle ¹⁰⁵	500	0.9	BUWAL (1999a)	450
Klärschlamm	100 ¹⁰⁶	0.5	BUWAL (1999a) ¹⁰⁷	50
Total	ca. 2'100	Ø = 1.0		ca. 2'100

Die jährlich deponierte Kupfermenge beträgt somit ca. 7'100 ± 1'800 t/a (± 25 %). Die Summe aller am Ende des 20. Jahrhunderts deponierten Abfälle – Siedlungsabfälle und „sonstige Abfälle“ – beinhaltet damit ca. 350'000 ± 90'000 t Kupfer. Dies bedeutet auf die heutige Bevölkerung bezogen ein Lager in den Deponien von 49 ± 12 kg/capita.

¹⁰³ Bausperrgut wird in der Schweiz vor der Deponierung in Bausperrgutsortieranlagen sortiert. Dabei werden ca. 2/3 der Metalle entnommen.

¹⁰⁴ vgl. Fussnote ⁸⁰.

¹⁰⁵ Die Sonderabfälle sind eine Sammelfraktion. Menge und Konzentration werden anhand der mengenmässig bedeutendsten Sonderabfallarten abgeschätzt (BUWAL 1999a). Es wurde berücksichtigt, dass nur ein Teil der 970'000 t/a Sonderabfälle kupferrelevant ist.

Rechnung: Altlastenverunreinigtes Erdreich 198'000 t/a zu 1 g/kg (BUWAL 1999b; PÜTTMER 2003); Strassensammlerschlämme 70'000 t/a zu 0.3 g/kg (COLOMBI SCHMUTZ DORTHE AG 1998), Stäube und Flugaschen 28'000 t/a zu 1.7 g/kg (BUWAL 1998b). Sonstige (geschätzt) 200'000 t/a zu 0.9 g/kg. Alle Müllmengen aus (BUWAL 1999a).

¹⁰⁶ Die jährlich anfallende Menge Klärschlamm beträgt 200'000 t/a. Bis zum Jahr 2000 wurde ca. die Hälfte davon in der Landwirtschaft als Dünger eingesetzt (nach 2000 sank der Anteil wegen der BSE-Krise auf 40 %). Seit Mai 2003 ist der Eintrag in die Landwirtschaft gesetzlich verboten (stufenweise Anwendung des Gesetzes bis 2008).

¹⁰⁷ Der Kupfergehalt in Klärschlamm nimmt seit den 80er-Jahren ab. Umfangreiche Untersuchungen in der Schweiz ergaben Konzentrationen von durchschnittlich 0.58 g/kg Trockensubstanz (TS) (SCHÄRER 1975). Untersuchungen über einen längeren Zeitraum ergaben in den 80er-Jahren Werte von 0.60 ± 0.13 g/kg TS (LICHTENSTEIGER *et al.* 1988). Einige Klärschlämme haben stark erhöhte Werte mit 5.58 ± 0.69 g/kg TS, die anzeigen, dass die Konzentration vom Einzugsgebiet abhängig ist. Vermutlich entstammen höhere Werte aus Kläranlagen mit einem höheren Anteil gewerblicher und industrieller Abwässer (ARPACI 1995). Jüngere Arbeiten ergeben tiefere Konzentrationen um 0.40 g/kg TS (KISTLER (1986): 0.39 g/kg TS; KILGA (1999): 0.395 ± 0.055 g/kg TS).

3.5 Historische Entwicklung der anthropogenen Kupferlager

Durch die retrospektive Untersuchung der Lager wird der historische Aufbauprozess im System verdeutlicht. Die Lager der *Gebäude* (Kap. 3.5.1), *Infrastruktur* (Kap. 3.5.2) und *Mobilien* (Kap. 3.5.3) sind heute gekennzeichnet von einem Lagerzuwachs. Jedes Lager nahm ausgehend von einem relativ tiefen Anfangsniveau (um 1900) bis zum Ende des 20. Jahrhunderts sukzessive zu. Mit der zeitlichen Auflösung von 25 bzw. 10 Jahren zeigt sich für die Lager bereits ein jeweils unterschiedlicher Verlauf des Lageraufbaus.

3.5.1 Gebäudebereich

Bei der historischen Entwicklung der Kupferlager in Gebäuden sind die drei wichtigsten Parameter *Installationsdichte* (ID), *Häufigkeit der Produktgruppe* (fP) sowie *Häufigkeit des Stoffes* (fM) einbezogen worden. Da die Entwicklung dieser Parameter in der Regel unabhängig voneinander und zumindest für jeden Funktionsbereich individuell fortschreitet¹⁰⁸ und zusätzlich die Datenlage inhomogen ist, werden an dieser Stelle zur Verdeutlichung des Vorgehens zwei Parameter exemplarisch detailliert besprochen:

a) ID_{PG} : Beispiel $ID_{Stromkabel}(t)$

Um 1900 begann die Elektrifizierung in Schweizer Häusern und stieg über die Quartale hinweg an, bis sie den heutigen Stand erreichte (BLUMER-ONOFRI 1994); noch zur Jahrhundertmitte waren beispielsweise „Fertigbauküchen“ inklusive „fertiger Elektrobrennstellen“ eine ausländische Seltenheit (NEUFERT 1961). In erster Näherung wird für jeden Gebäudennutzungstyp ein linearer Anstieg angenommen (Abb. 3-19). Diese Lagerentwicklung wird der Produktgruppe *Stromkabel* zugrunde gelegt.

b) fM_{PG} : Beispiel $fM_{Heizungsrohr(Fläche)}(t)$

Die Entwicklung der *Häufigkeiten* (hier: *Häufigkeit des Stoffes*) wird am Beispiel der Flächenheizung ($fM_{Heizungsrohr(Fläche)}$) verdeutlicht. Durch Experteninterviews und Literaturrecherche wird der „Installationsanteil“ (das ist der Marktanteil der Kupferrohre an der gesamten Flächenheizungsrohrinstallation) für jene Zeit rekonstruiert, seitdem Flächenheizungen in der Schweiz bedeutsam geworden sind (Abb. 3-20).

Kupferlager

Auf diese Weise werden die ID und die Häufigkeiten fP und fM für die vier Stichjahre 1900, 1925, 1950 und 1975 (Quartale I–IV) generiert und daraus für jedes ARK-Haus bzw. jeden Nutzungstyp separat die Kupfergehalte gemäss Kap 2.8.1.2 berechnet (Tab. A-24). Die Kupfergehalte steigen in allen Funktionsbereichen¹⁰⁹ für die vier Nutzungstypen EFH, MFH, DLG und PRG während des 20. Jahrhunderts an, ebenso die Kupferlager in den vier Teilbeständen (Abb. 3-21 bis Abb. 3-24), wobei die Aufbaudynamik produktgruppenspezifisch ist. Zur Berechnung werden die Renovationszyklen gemäss Abb. 2-12 berücksichtigt.

¹⁰⁸ Die Gründe für die Entwicklung sind so vielschichtig wie diejenigen der Kaufentscheidungen. Beeinflussend wirken: steigende Ansprüche; materialwissenschaftliche und ästhetische Materialvorteile, Rohstoffpreisschwankungen, „Modebewusstsein“ usw.

¹⁰⁹ Im Folgenden wird der Dachbereich aufgrund seiner Bedeutung auf Produktgruppenebene präsentiert (Ausnahme: *Dachrinnen* und *Regenfallrohre* sind zu „Dachentwässerung“ zusammengefasst).

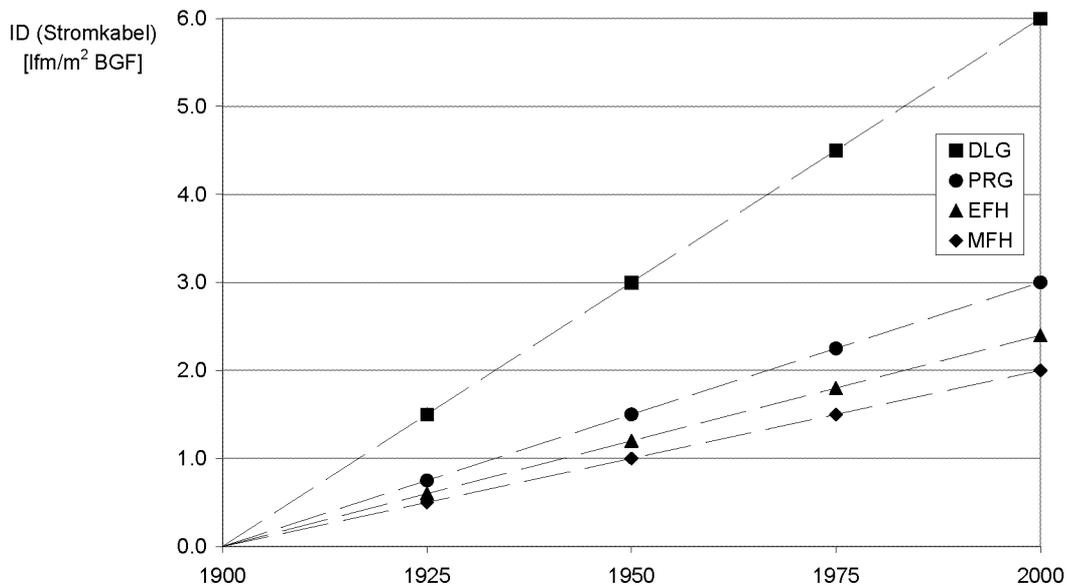


Abb. 3-19: Schematischer zeitlicher Verlauf der Installationsdichte der Starkstromkabel ($ID_{\text{Stromkabel}}$) im Verlauf des 20. Jahrhunderts für die vier Nutzungstypen *Einfamilienhaus* (EFH), *Mehrfamilienhaus* (MFH), *Dienstleistungsgebäude* (DLG) und *Produktionsgebäude* (PRG).

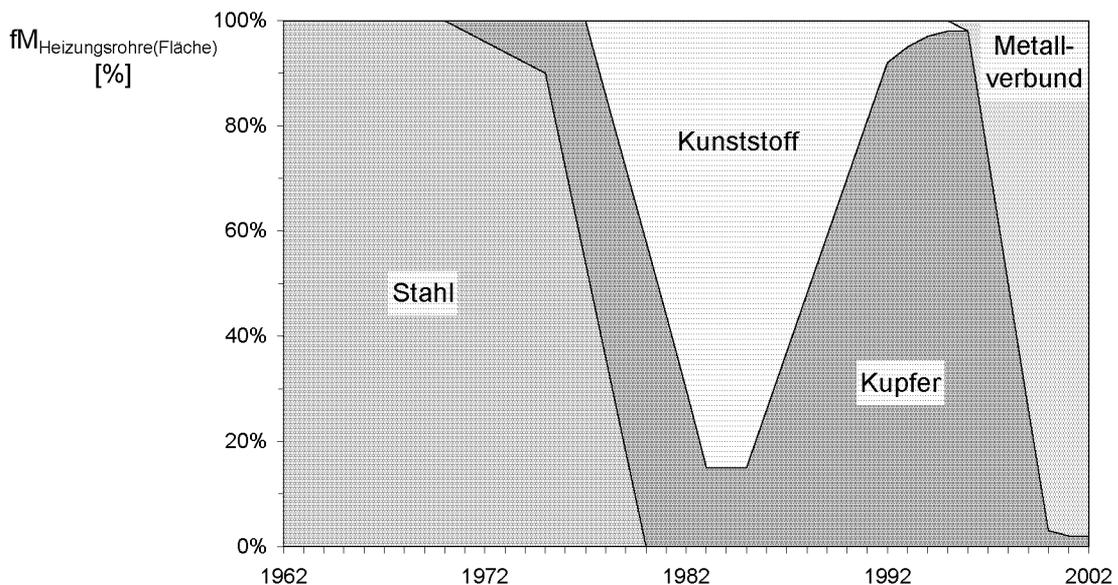


Abb. 3-20: Schematischer zeitlicher Verlauf der Marktanteile verschiedener Rohrmaterialien bei der Installation von Flächenheizungen seit deren Einführung (Zeitraum 1962–2002). Dargestellt sind Rohre aus Stahl (ggf. verzinkt), Kupfer (gelötet und gepresst), Kunststoff und Metallverbundrohre (Kunststoffrohre mit Aluminium-Diffusionssperre). Vor 1962 war Stahl der übliche Werkstoff für die Rohre von Flächenheizungen. Quelle: Experteninterview (SELM 2002) und Literatur.

Die Kupferlager waren zu Beginn des 20. Jahrhunderts nur ein Bruchteil von heute und wuchsen in jeder Produktgruppe an (Abb. 3-21 bis Abb. 3-24). Der höhere Anfangswert des Lagers im Dach zu Beginn des Jahrhunderts ist dadurch erklärbar, dass Kupfer dort bereits seit vielen Jahrhunderten eingesetzt wurde (SCHMITT und HEENE 1996). Das Dach wird ungefähr im III. Quartal durch einen schnelleren Anstieg in der Haustechnik in der Summe übertroffen. In den Wohngebäuden ist dies durch die Strom- und die Heizungsanlage begründet, in den Nichtwohngebäuden fast ausschliesslich durch die Stromanlage. Insbesondere bei den DLG dominiert die Stromanlage sehr stark. Gegenüber der Haustechnik waren die Lager im Dach im I. Quartal bei allen Nutzungstypen dominierend, und

innerhalb des Daches die Dachentwässerung. An zweiter Stelle sind die Dachgaupen, gefolgt von der Bedachung und den Blitzableitern; lediglich bei den PRG fehlen Bedachung und Dachgaupen, so dass die Blitzableiter an zweiter Stelle stehen.

Die tiefen Anfangswerte der Lager in der Haustechnik und die stark ansteigenden Werte im III. und IV. Quartal, die das Lager im Dach aktuell übertreffen (Ausnahme PRG), zeichnen eine ungefähr exponentielle Wachstumskurve; hingegen wachsen die bedeutenden Lager im Dach regelmässiger, annähernd linear.

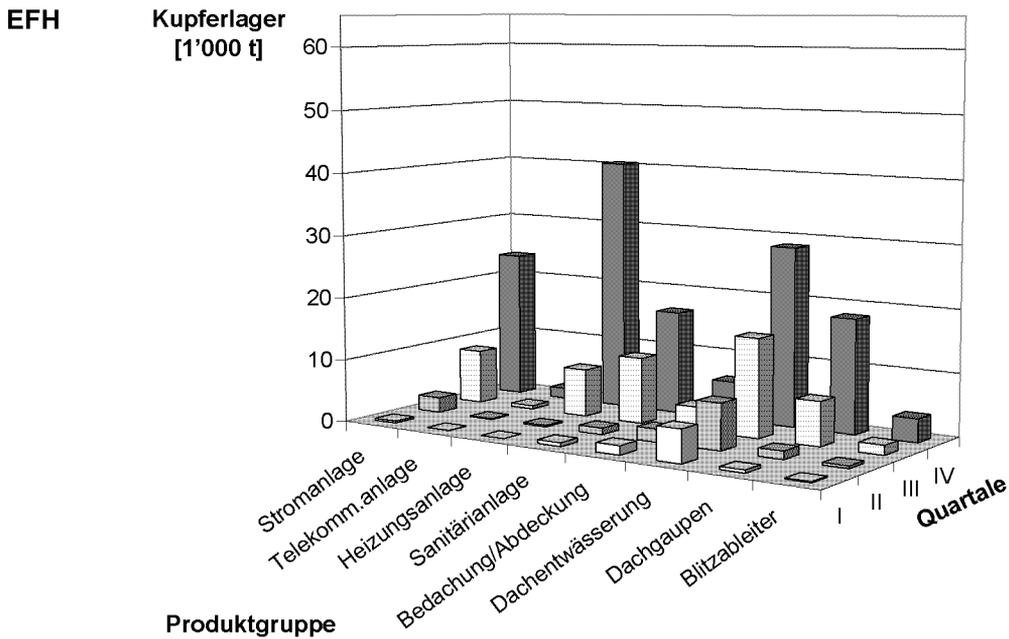


Abb. 3-21: Entwicklung der Kupferlager der Einfamilienhäuser (EFH) in den 4 Quartalen des 20. Jahrhunderts (I-IV), basierend auf der historischen Hochrechnung.

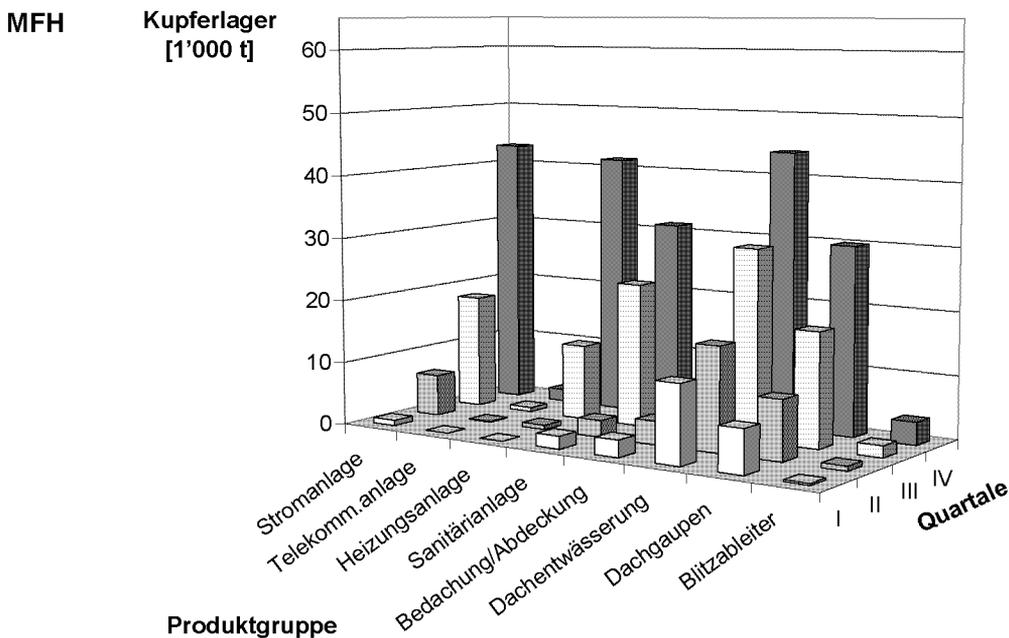


Abb. 3-22: Entwicklung der Kupferlager der Mehrfamilienhäuser (MFH) in den 4 Quartalen des 20. Jahrhunderts (I-IV), basierend auf der historischen Hochrechnung.

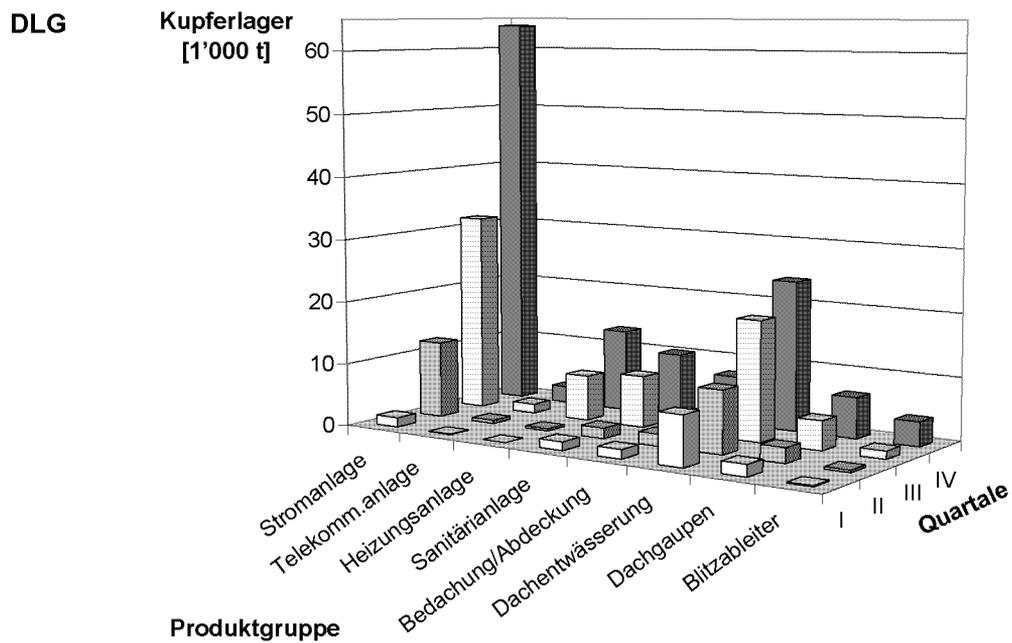


Abb. 3-23: Entwicklung der Kupferlager der Dienstleistungsgebäude (DLG) in den 4 Quartalen des 20. Jahrhunderts (I-IV), basierend auf der historischen Hochrechnung.

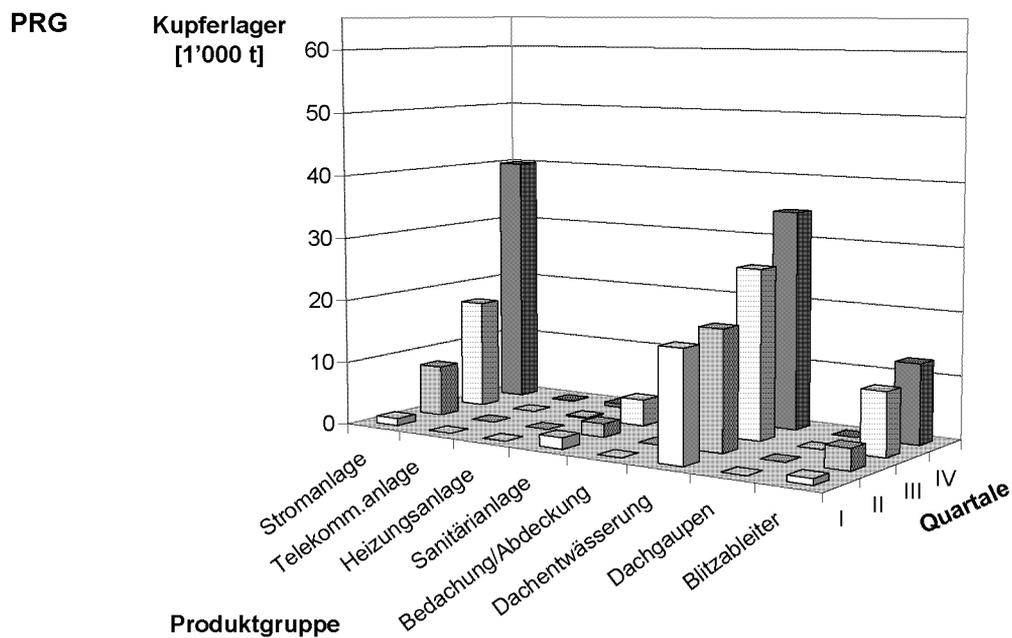


Abb. 3-24: Entwicklung der Kupferlager der Produktionsgebäude (PRG) in den 4 Quartalen des 20. Jahrhunderts (I-IV), basierend auf der historischen Hochrechnung.

Summiert über die vier Gebäudeteilbestände zeigt sich in allen Funktionsbereichen ein Wachstum, jedoch mit unterschiedlicher Geschwindigkeit (Tab. 3-28):

Tab. 3-28: Kupferlager des Gebäudebestandes im Verlauf des 20. Jahrhunderts in [1'000 t] mit Angabe ihrer prozentualen Verteilung für das Jahr 2000.

in 1'000 Tonnen	Stand 1900	1925	1950	1975	2000	[%] 2000
Stromanlage	1.3	3.8	29.1	75.6	170.6	30.0
Telekomm.anlage	0.1	0.1	0.7	2.6	6.2	1.1
Heizungsanlage	0.0	0.0	1.3	26.9	95.7	16.8
Sanitäranlage	4.9	5.7	7.4	45.6	63.5	11.2
Bedachung/Abdeckung	0.0	5.6	7.6	12.9	22.5	4.0
Dachentwässerung	21.2	42.9	52.5	91.4	131.1	23.1
Dachgaupen	6.3	9.2	13.1	29.7	54.7	9.6
Blitzableiter	1.3	1.5	4.9	14.7	23.8	4.2
Gebäude gesamt	35.1	68.9	116.5	299.3	568.0	100.0

Die Pro-Kopf-Lager entwickeln sich wegen des Bevölkerungswachstums im Betrachtungszeitraum in geringerem Masse als die absoluten Lager, insbesondere in der Nachkriegszeit, als die Bevölkerung stark anwuchs. Bezogen auf die Zeitreihe der Bevölkerung (Abb. A-11 im Anhang) erhält man folgende Pro-Kopf-Lager für die Funktionsbereiche (Tab. 3-29):

Tab. 3-29: Pro-Kopf-Kupferlager des Gebäudebestandes im Verlauf des 20. Jahrhunderts in [kg/capita] mit Angabe ihrer prozentualen Verteilung für das Jahr 2000.

in kg/capita	Stand 1900	1925	1950	1975	2000	[%] 2000
Elektroinstallation	0.4	1.0	6.2	11.8	23.7	30.0
Telekomm.anlage	0.0	0.0	0.2	0.4	0.9	1.1
Heizungsanlage	0.0	0.0	0.3	4.2	13.3	16.8
Sanitäranlage	1.5	1.5	1.6	7.1	8.8	11.2
Bedachung/Abdeckung	0.0	1.4	1.6	2.0	3.1	4.0
Dachentwässerung	6.4	11.0	11.2	14.3	18.2	23.1
Dachgaupen	1.9	2.4	2.8	4.6	7.6	9.6
Blitzableiter	0.4	0.4	1.1	2.3	3.3	4.2
Gebäude gesamt	10.6	17.6	24.8	46.7	78.8	100

Die Kupfermenge steigt in allen Funktionsbereichen und ergibt durch Summenbildung für die beiden Bauelemente *Haustechnik* und *Dach* zwei verschiedene Wachstumskurven (Abb. 3-25). Das Wachstum lässt sich mit drei Wachstumstypen charakterisieren:

- (α) beschleunigtes Wachstum $\frac{d}{dt}M$ ansteigend
- (β) gleichförmiges Wachstum $\frac{d}{dt}M$ konstant
- (γ) gebremstes Wachstum $\frac{d}{dt}M$ abnehmend

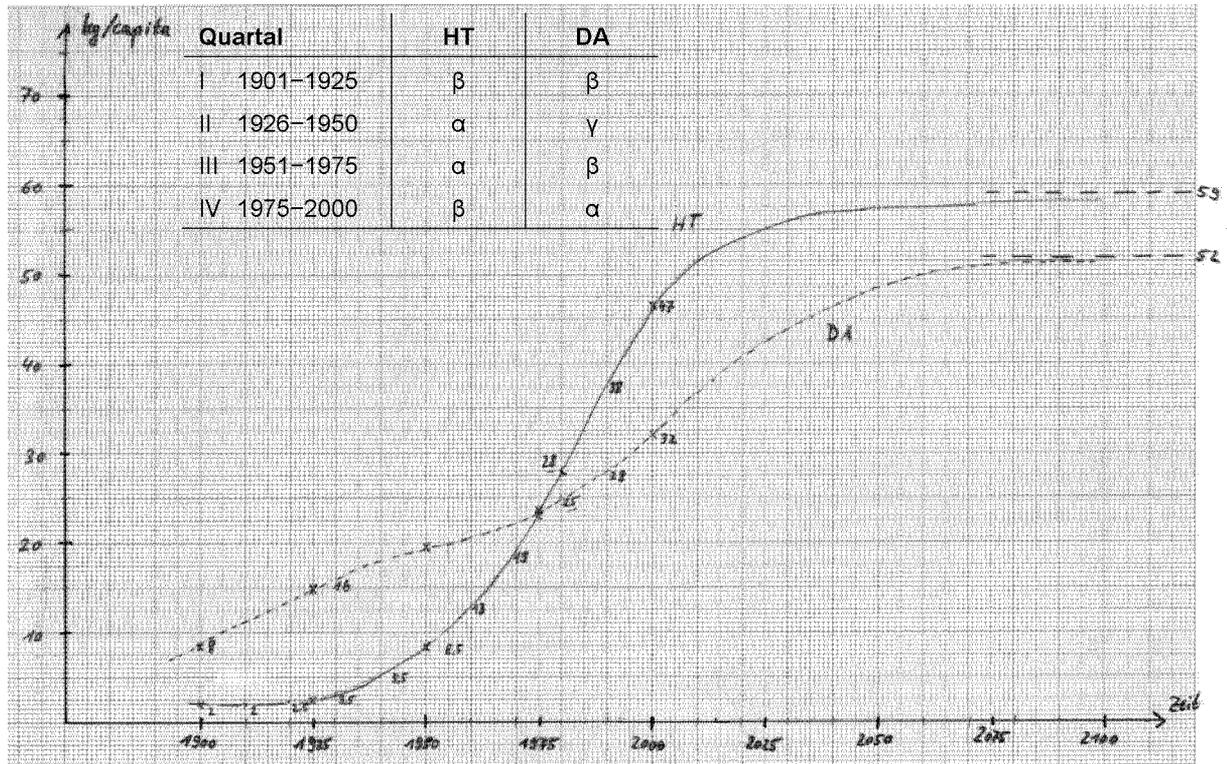


Abb. 3-25: Sigmoidale Entwicklungen der Pro-Kopf-Lager [kg/capita] in den Bauelementen *Haustechnik* (HT) und *Dach* (DA) im 20. Jahrhundert (manuelle Interpolation der Lagerkurven als „Spline“). Die Kurven zeigen Phasen von beschleunigtem Wachstum (α), gleichförmigem Wachstum (β) und gebremstem Wachstum (γ). Tabellarisch ist der dominante Wachstumstyp der Bauelemente pro Quartal gegeben.

Aufgrund der Unterschiede in der sigmoidalen Kurvenform sind verschiedene Funktionstypen notwendig, um die Messpunkte bestmöglich zu „fitten“ (vgl. Kap. 5.2.3.1). Die Wachstumskurven lassen sich empirisch durch mathematische Funktionen adäquat beschreiben¹¹⁰. Die berechneten bzw. geschätzten Werte sind mit den zugehörigen Funktionen für die Lager in den Gebäuden (Dach, Haustechnik), der Infrastruktur und den Mobilien im Folgenden dargestellt (Abb. 3-26 bis Abb. 3-30).

¹¹⁰ Eingesetzte Software: SIMBOX (siehe Kap. 5.1).

Dach

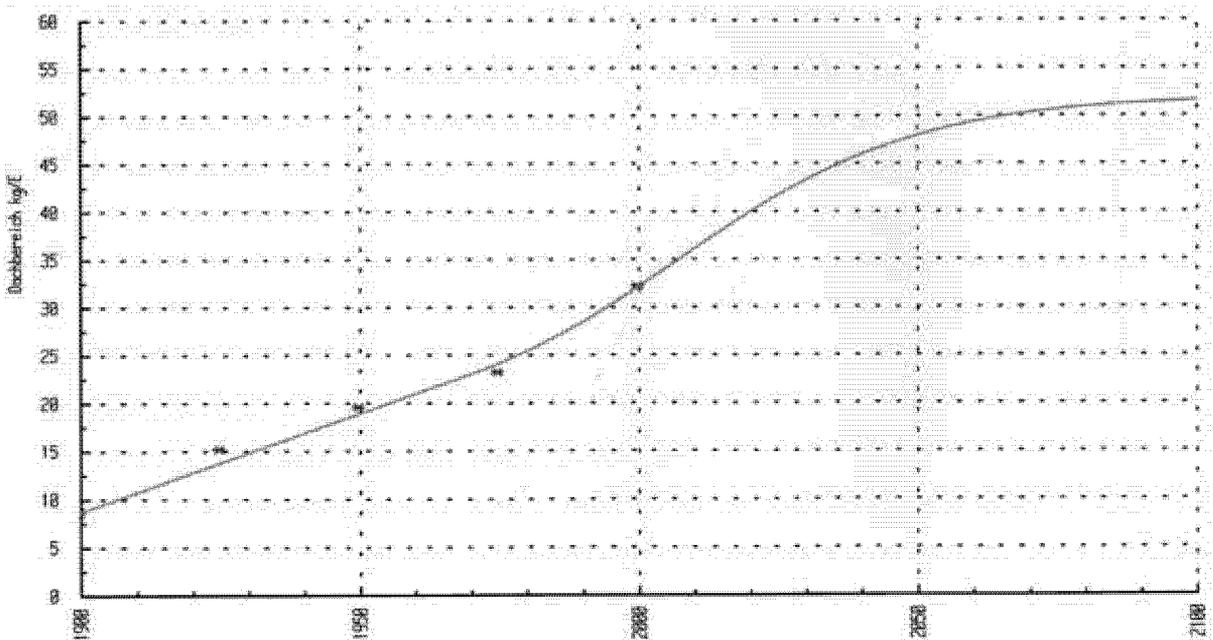


Abb. 3-26: Sigmoidale Entwicklung des Pro-Kopf-Lagers [kg/capita] im *Dach* im 20. Jahrhundert. Die linearlogistische Funktion ist dem berechneten Lagerwachstum angepasst.

Haustechnik

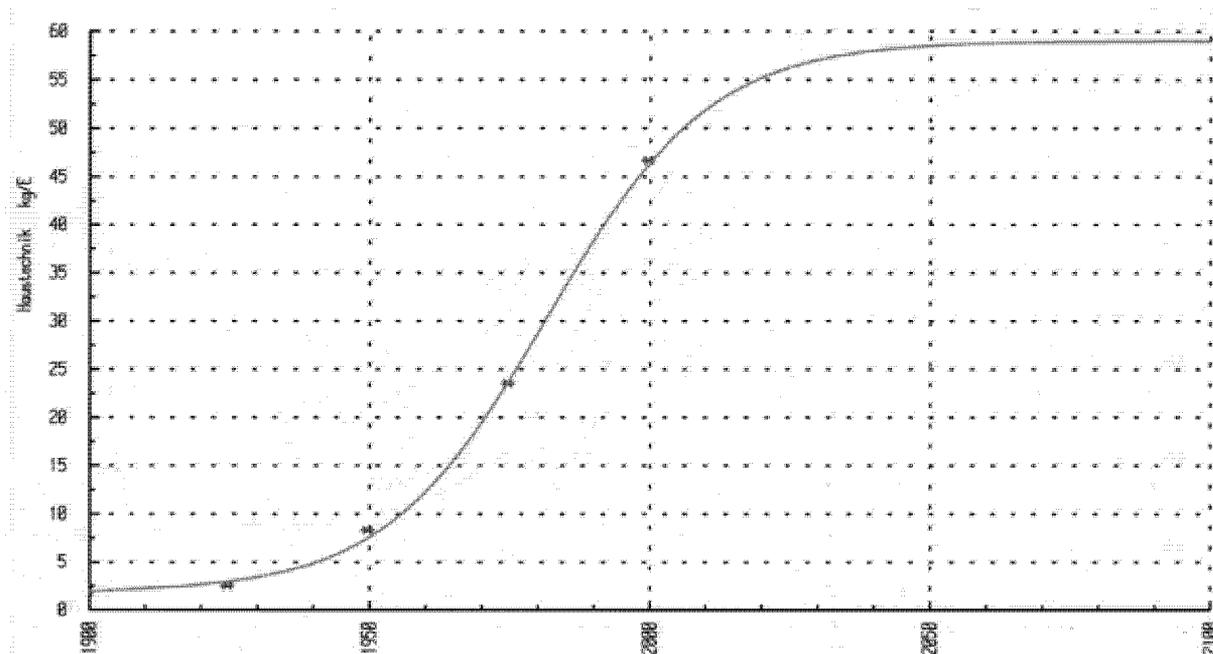


Abb. 3-27: Sigmoidale Entwicklung des Pro-Kopf-Lagers [kg/capita] in der *Haustechnik* im 20. Jahrhundert. Die linearlogistische Funktion ist dem berechneten Lagerwachstum angepasst.

Gebäude gesamt

Die Wachstumskurven Gebäude (gesamt), Dach und Haustechnik lassen sich jeweils durch eine linearlogistische Funktion näherungsweise beschreiben (Abb. 3-28 bis Abb. 3-27).

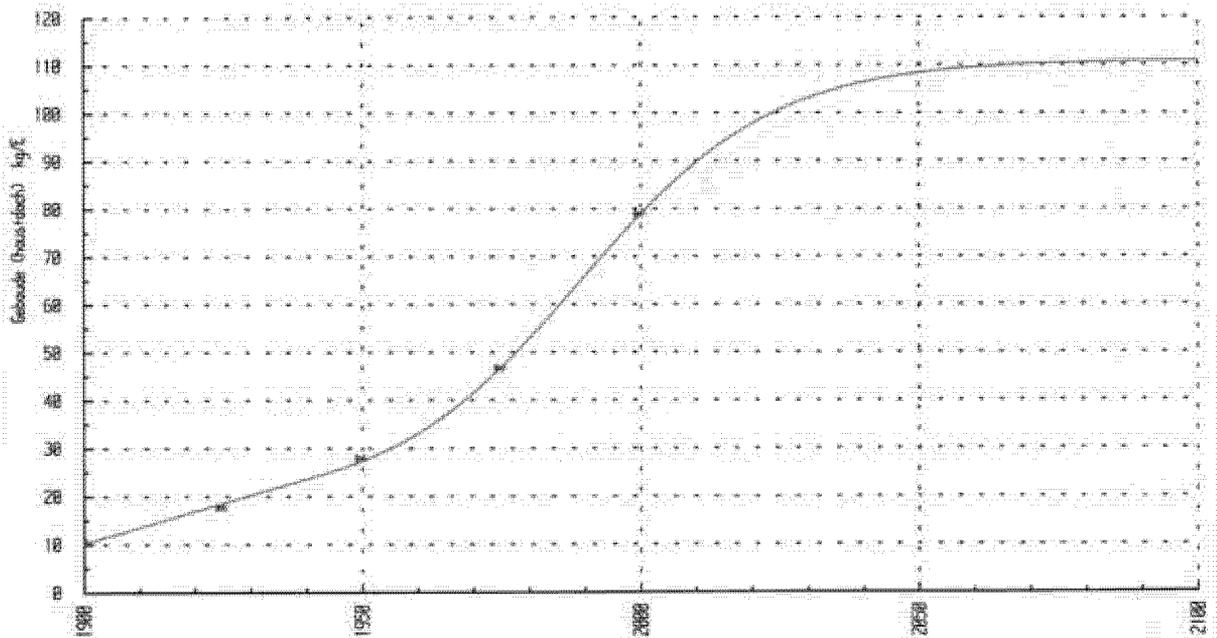


Abb. 3-28: Sigmoidale Entwicklung des Pro-Kopf-Lagers [kg/capita] in den *Gebäuden (gesamt)* im 20. Jahrhundert. Die Punkte (x) sind die Summe der Lager im Dach und in der Haustechnik, die linearlogistische Funktion ist diesen Punkten angepasst.

3.5.2 Infrastrukturbereich

Die Rekonstruktion des Kupferlagers im Infrastrukturbereich basiert auf Plausibilitätsüberlegungen zum Stromnetz, das das Gros des Lagers ausmacht (vgl. Abb. A-10). Dementsprechend lässt sich die Wachstumskurve der Infrastruktur aufgrund der zwei Entwicklungsschübe im Betrachtungszeitraum durch eine doppeltlogistische Funktion näherungsweise beschreiben (Abb. 3-29).

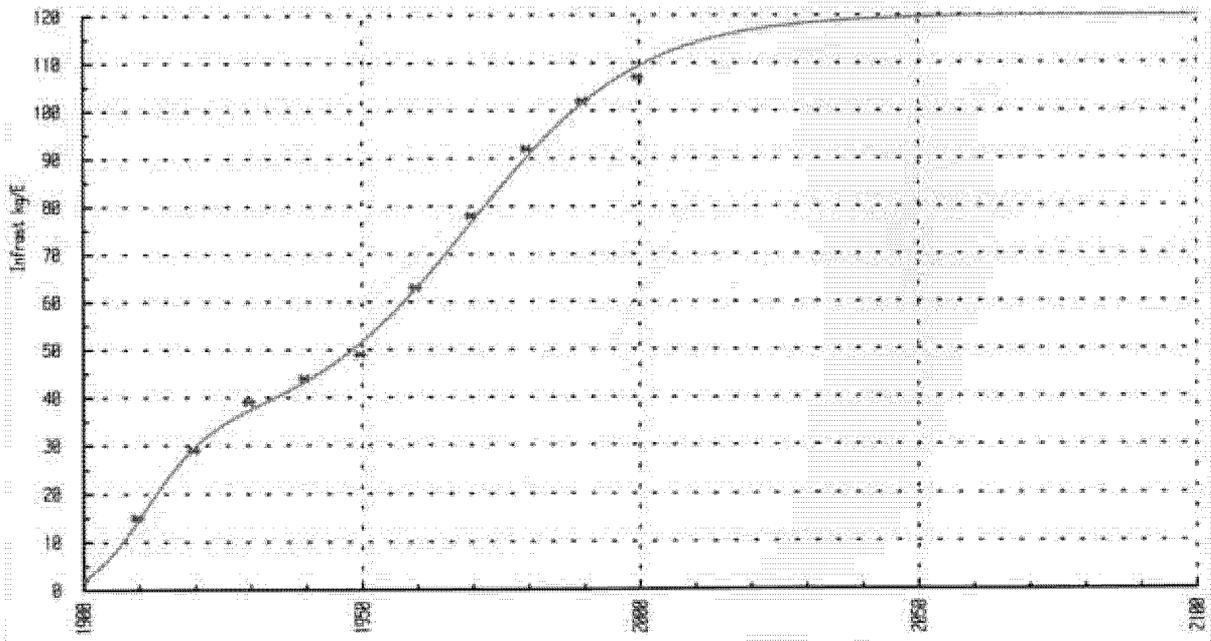


Abb. 3-29: Doppelt-sigmoidale Entwicklung des Pro-Kopf-Lagers [kg/capita] in der *Infrastruktur* im 20. Jahrhundert. Die doppeltlogistische Funktion ist dem abgeschätzten Lagerwachstum angepasst.

3.5.3 Mobilien

Der rekonstruierte Verlauf des Mobilienlagers der Schweiz wird durch eine linearlogistische Näherungsfunktion abgebildet (Abb. 3-30).

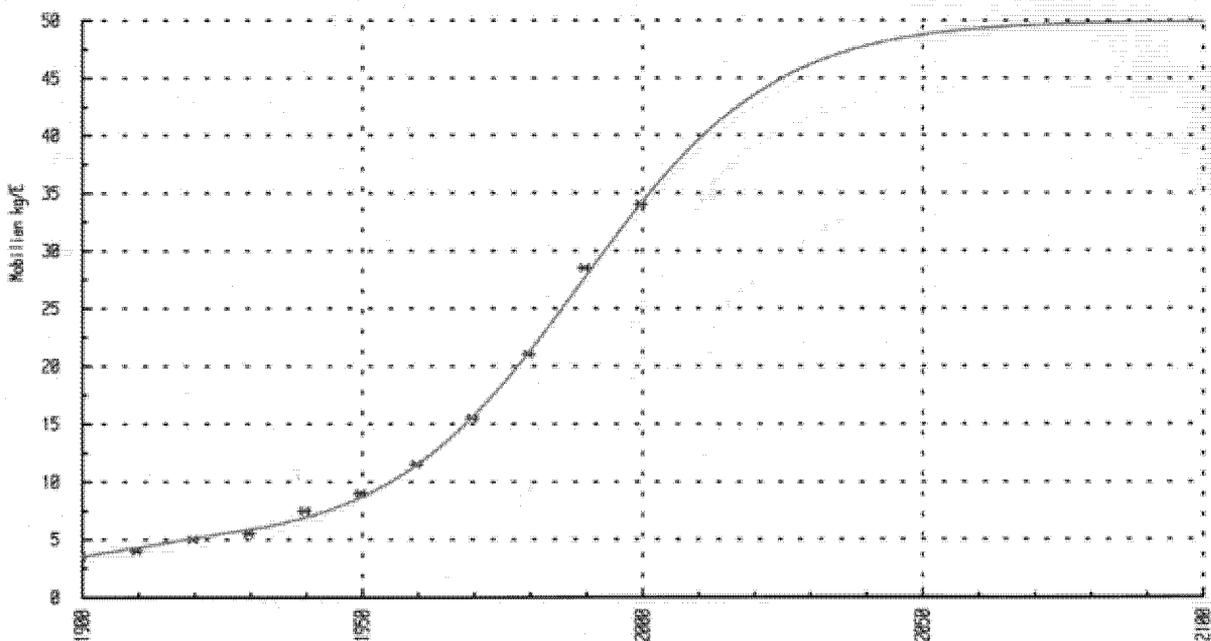


Abb. 3-30: Sigmoidale Entwicklung des Pro-Kopf-Lagers [kg/capita] in den *Mobilien* im 20. Jahrhundert. Die linearlogistische Funktion ist dem abgeschätzten Lagerwachstum angepasst.

4 Diskussion

4.1 Aufbau der urbanen Kupferlagerstätten der Schweiz

Gebäudelager

Über das gesamte Gebäudelager betrachtet ist der bedeutendste Funktionsbereich der *Dachbereich* (Dach) mit ca. 40 % Mengenanteil, gefolgt von 30 % in *Stromanlagen* (Elektroanlagen), 15 bis 20 % in *Heizungsanlagen*, 10 % in *Sanitäranlagen* und nur 1 % in *Telekommunikationsanlagen* (Abb. 3-9); Letztere wird im Weiteren vernachlässigt. Die Resultate zum Gebäudelager aus Kap. 3.2.3 erlauben eine Ortung, in welchem Gebäudeteilbestand die Lager der Funktionsbereiche aufzufinden sind (Abb. 4-1).

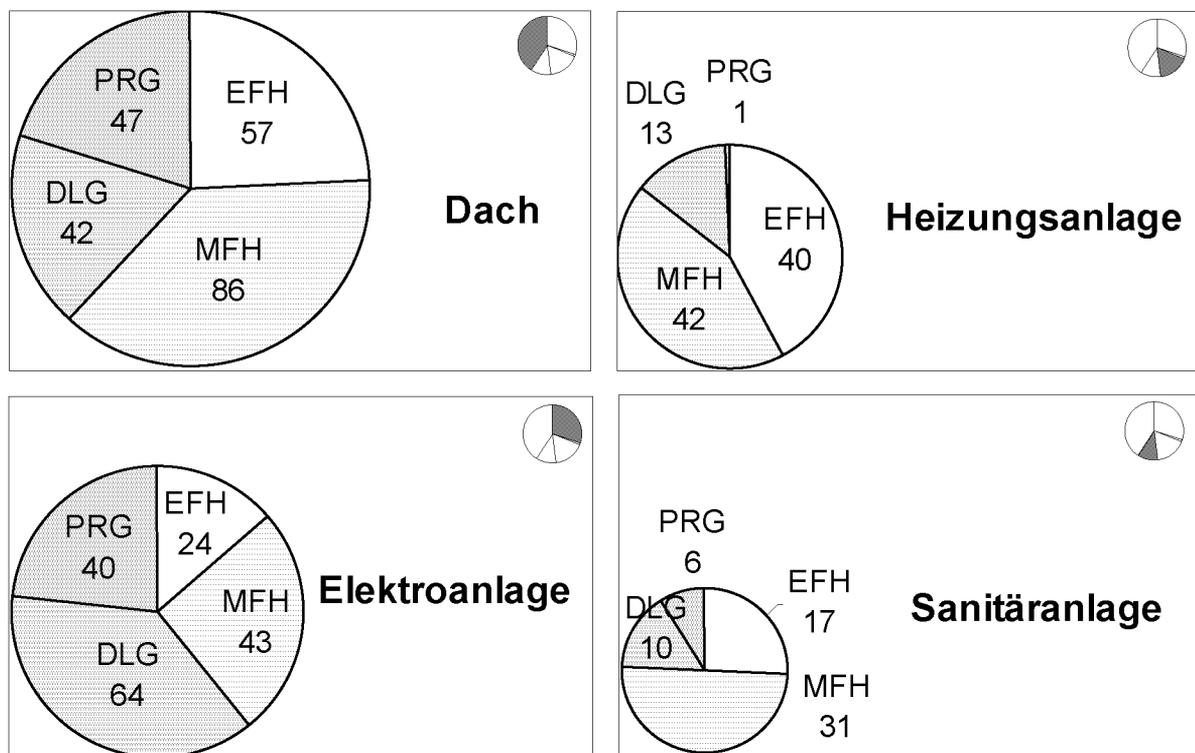


Abb. 4-1: Verteilung der Kupferlager in den bedeutenden Funktionsbereichen auf die vier Teilbestände *Einfamilienhaus* (EFH), *Mehrfamilienhaus* (MFH), *Dienstleistungsgebäude* (DLG) und *Produktionsgebäude* (PRG). Die Mengenangaben sind in tausend Tonnen. Die rechts oben abgebildeten Kuchenstücke zeigen den Anteil des jeweiligen Funktionsbereichs am gesamten Gebäudelager an (gemäss Abb. 3-9). – Die Bleche im *Dachbereich* (Dach) befinden sich zu ca. $\frac{2}{3}$ in den Wohngebäuden, der grössere Teil davon in den MFH. Die *Stromkabel* (Elektroanlage) sind zu über 60 % in den Nicht-Wohngebäuden, vor allem in den DLG mit ihren relativ hohen Kabel-Installationsdichten. Über 85 % des Lagers in *Heizungsanlagen* und 75 % des Lagers in *Sanitäranlagen* befinden sich in den Wohngebäuden¹¹¹.

¹¹¹ Die Anforderungen an die Heizung und die Wasserversorgung sind in den Wohngebäuden bedeutend höher als in den Nicht-Wohngebäuden, und entsprechend sind auch die jeweiligen Installationsdichten grösser. Einerseits ist der Heizbedarf im Wohnbereich erhöht: Die EFH erlangen gar die gleiche Lagergrösse wie die MFH, da bei den EFH die höchste Bereitschaft zur Investition in Bodenheizungen besteht. Andererseits weisen die PRG (einschliesslich der landwirtschaftlichen Gebäude) kaum oder nur kleine Heizungsanlagen auf, so dass dort kaum Kupfer anzutreffen ist.

Hinsichtlich der Klassierung in vier Gebäudeteilbestände befindet sich das grösste Teillager – mehr als 35 % des Gebäudelagers – in den Mehrfamilienhäusern (MFH) (Abb. 3-8). Es wird fast zur Hälfte dominiert vom *Dachbereich*, der Rest verteilt sich ungefähr gleichmässig auf *Strom-*, *Heizungs-* und *Sanitäranlage*. Die Lager in den Einfamilienhäusern (EFH) und den Dienstleistungsgebäuden (DLG) sind ungefähr gleich gross (20 bis 25 % des Gebäudelagers). Das Lager in den EFH teilt sich ähnlich auf die Funktionsbereiche auf wie das der MFH, allein der erhöhte Einbau an Bodenheizungen führt zu einer stärkeren Bedeutung der *Heizungsanlage* bei den EFH.

Im Unterschied zu den Wohngebäuden trägt bei den Nicht-Wohngebäuden die Stromanlage stärker zum Teillager bei. In Kombination mit verminderten Rohrinstallationen befinden sich dadurch über 80 % der Teillager in den beiden Funktionsbereichen *Dachbereich* und *Stromanlage* (Abb. 3-8). DLG weisen mit erhöhten technischen Anforderungen eine erhöhte Installationsdichte auf, so dass allein die *Stromanlage* bei ihnen knapp die Hälfte des Lagers ausmacht. Bei den Produktionsgebäuden (PRG) fällt eine Konzentration von über 90 % des Lagers im *Dachbereich* und der *Stromanlage* auf. Dies ist im Wesentlichen auf die verminderte Ausführung der *Sanitär-* und *Heizungsanlagen* zurückzuführen.

Beurteilung der Erhebung des Gebäudelagers

Das methodische Vorgehen bei der Erhebung der Kupferlager in den Gebäuden zielt auf die Untersuchung eines Gebäudebestandes als Ganzes, doch die Schlüsselgrössen sind verschiedener Natur: So sind die *Häufigkeiten* (fM, fP) Eigenschaften der Gebäudeteilbestände. Demgegenüber sind die *Installationsdichte* und die *spezifische Masse* Eigenschaften von Referenzgebäuden, aus denen die *potentiellen Kupfergehalte* der Modellgebäude gebildet werden. Voraussagen zu Einzelgebäuden sind mit den vorliegenden Ergebnissen nicht zu leisten.

Das Instrumentarium zur Erhebung der Kupfergehalte in den ARK-Häusern (KG) umfasst die vier Schlüsselgrössen *spezifische Masse*, *Installationsdichte* sowie die *Häufigkeiten der Produktgruppe* und *des Materials*¹¹². Jede der vierzehn Produktgruppen erfordert die Ermittlung dieser vier Grössen. Im Folgenden werden Eigenheiten der 4 x 14 Faktoren hinsichtlich ihrer Erfassung und der Grösse ihrer Unsicherheiten erläutert.

Die *spezifische Masse* (sM) eines Produktes lässt sich mit Kenntnis des Produktaufbaus berechnen. Häufig sind verschiedene Produkttypen mit unterschiedlichem Aufbau verfügbar, so dass als sM_{PG} die „durchschnittlich eingebaute sM“ zu ermitteln ist. Einige Produktgruppen erlauben oder erfordern gar im selben Gebäude verschiedene Produkttypen nebeneinander; für andere Produktgruppen wird in der Regel nur ein Produkttyp eingesetzt (oder zwei, wobei einer deutlich dominiert). Dementsprechend ist die Priorität bei der Erfassung entweder auf allgemeinere Quellen oder die Referenzgebäude zu lenken:

- a) In der **Haustechnik** erfordern die Funktionsbereiche aufgrund ihrer Netzstruktur in der Regel in einem Gebäude stets **verschiedene Produkttypen** (z.B. verschiedene Typen von Stromkabeln)¹¹³. Da sich dadurch die Unterschiede zwischen verschiedenen Gebäuden teilweise ausgleichen, ist die hauptsächliche Unsicherheit der spezifischen Masse durch detaillierte Gebäudeaufnahmen zu vermindern, die die Spannweite und die Häufigkeit eingesetzter Produkttypen beleuchten.
- b) Demgegenüber gilt in Näherung, dass für den **Dachbereich** eines Gebäudes pro Produktgruppe nur **ein ausgewählter Produkttyp** eingesetzt wird (z.B. eine Blechdicke, ein Rinnentyp oder ein Durchmesser). Einzelerhebungen sind hier unzureichend; die Häufigkeiten der existierenden diversen Produkttypen sind über Produktionszahlen von Firmen, Handwerkerankünfte usw. zu bestimmen.

¹¹² Die Zusammenfassung der *spezifischen Masse* und der *Installationsdichte* zum *potentiellen Kupfergehalt* ist nur zur Veranschaulichung der Ergebnisse vonnöten.

¹¹³ Eine Ausnahme sind die Heizungsrohre von Flächenheizungen, für die oft nur **ein Produkttyp** eingesetzt wird.

Zu den beiden *Häufigkeiten* existieren bisher keine systematischen Untersuchungen. Eine Möglichkeit der Erhebung ist die Siedlungsbegehung, bei der man die Produktgruppen im *Dachbereich* nach der *Häufigkeit der Produktgruppe* und *des Stoffes (Materials)* Kupfer untersucht. In einer Gemeindebegehung in Bettingen BS wurde die Machbarkeit einer Begehung untersucht, bei der pro Objekt die Ausführung der Spenglerarbeiten aufgenommen wurde. Für eine Aufnahme der Materialwahl und der Dimensionen konnten ca. 15 Objekte pro Stunde aufgenommen werden, was vermutlich noch durch Routine gesteigert werden kann¹¹⁴. Da bei einigen Produktgruppen regionale Unterschiede zu erwarten sind (vgl. Kap. 4.5), eine flächendeckende Begehung aber unpraktikabel ist, erfordert eine systematische Untersuchung mit *bottom-up*-Ansatz eine überlegte Erhebungsstrategie und ist vermutlich sehr zeitaufwendig. Die Gemeindebegehung müsste zudem danach geprüft werden, ob eine optische Materialbeurteilung fehlerfrei ist, denn eine natürliche Kupferpatinierung durchläuft zahlreiche Farbstufen, die jenen anderer Metalloxidationen teilweise ähneln¹¹⁵. Da dieses Vorgehen nicht auf die Haustechnik anwendbar ist, wurden die *Häufigkeiten* einheitlich überwiegend auf der Basis von Handwerkerbefragungen geschätzt und die Gemeindebegehungen nicht fortgeführt.

Infrastrukturlager

Das Kupfer im *Stromnetz* ist mit über 80 % des Infrastrukturlagers das grösste Teillager in der Infrastruktur. Aufgrund zusätzlicher Anforderungen wird es in Zukunft voraussichtlich weiter zunehmen:

- a) Durch anhaltende Erschliessungen in Neubaugebieten wird die Stranglänge der Verteilleitungen (Niederspannung und Mittelspannung) wachsen.
- b) Zur Verminderung von Leitungsverlusten – insbesondere bei wachsenden Leitungslängen (siehe a) – sind vergrösserte Leiterquerschnitte erforderlich.

Das zweite wichtige Lager ist mit ca. 15 % Anteil das *Telekommunikationsnetz*. Zwar führt auch hier die Erschliessung von Neubaugebieten zu einem Wachstum der Stranglänge, doch der Ersatz von Kupferleitungen durch die leistungsfähigeren Glasfaserkabel führt schliesslich zu einer Abnahme der „kupfernen Stranglänge“. Die zunehmende Nutzung der Mobilfunknetze wird voraussichtlich nicht direkt das Kupferlager beeinflussen, da Telekommunikationsleitungen daraufhin nur in Ausnahmefällen rückgebaut werden.

Die Stranglänge ist eine Schlüsselgrösse für die Berechnung des Infrastrukturlagers, aber auch für die Bewirtschaftung der Stromnetze. Trotzdem ist die Stranglänge des schweizerischen Stromnetzes nicht hinreichend bekannt; vielmehr differieren die beiden bisherigen Untersuchungen bei der Stranglänge der Feinverteilung (Niederspannung) um den Faktor 3 (Abb. 4-2)¹¹⁶. Es liegt nahe, dass hier teilweise statt der Stranglänge die Leiterlänge erfasst wurde; jedoch können die Basisdaten beider Erhebungen nicht eingesehen und damit die Ergebnisse auch nicht nachvollzogen werden. Eine tabellarische Leitungslängen-Übersicht der beiden Literaturquellen ist in Tab. A-28 im Anhang gegeben.

Die eigene Berechnung des Kupferlagers im Starkstromnetz erfolgte über eine gewichtete Kombination von Stranglängen aus zwei Hochrechnungsgrössen, der *Flächennetzdichte* ND_A und der *Einwohnernetzdicke* ND_{EW} ¹¹⁷. Die Stranglängen, die aus den beiden Netzdichten separat berechnet

¹¹⁴ Ein Vorschlag für eine Vorlage zur Gebäudebegehung ist als Tab. A-20 im Anhang abgebildet.

¹¹⁵ Als Hilfe kommen Farbtafeln zur Kupferpatinierungsabfolge in Betracht, wie sie in der Literatur zu finden sind (PROTZER und RÖBBERT 1997).

¹¹⁶ EGGENBERGER (1990) beschreibt das Stromnetz hinsichtlich der Verteilung von Kabeln und Freileitungen, greift dabei aber auf verbandsinterne Erhebungen des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätswerke (VSE) zurück. MAIBACH (1995) bezieht sich auf Auskünfte des VSE für die Erstellung der schweizerischen Lebenszykleninventar-Datenbank *Ecoinvent*.

¹¹⁷ In einer Frühphase der Arbeit wurde zu Testzwecken eine *endkundenbezogene Netzdichte* [km/Anzahl Endkunden] angewendet. Da die Endkundenzahl eine betriebsrelevante Grösse der Elektrizitätsverteiler ist, sind die Daten häufig besser verfügbar als die Einwohnerzahl der versorgten Gebiete (N.B.: Die Versorgungsgebiete fallen nicht unbedingt mit Verwaltungseinheiten zusammen). Der Vergleich zwischen Elektrizitätsverteilern erwies *cont.*

wurden, differieren um die Faktoren 2.3 bis 2.6 (je nach Spannungsebene, vgl. Abb. 4-2). Erklären lässt sich diese Differenz durch die Unsicherheit einerseits der *Netzdichten* und andererseits der *Gewichtungsfaktoren*; Letztere sind abgeschätzt und daher relativ unsicher (Tab. 2-12).

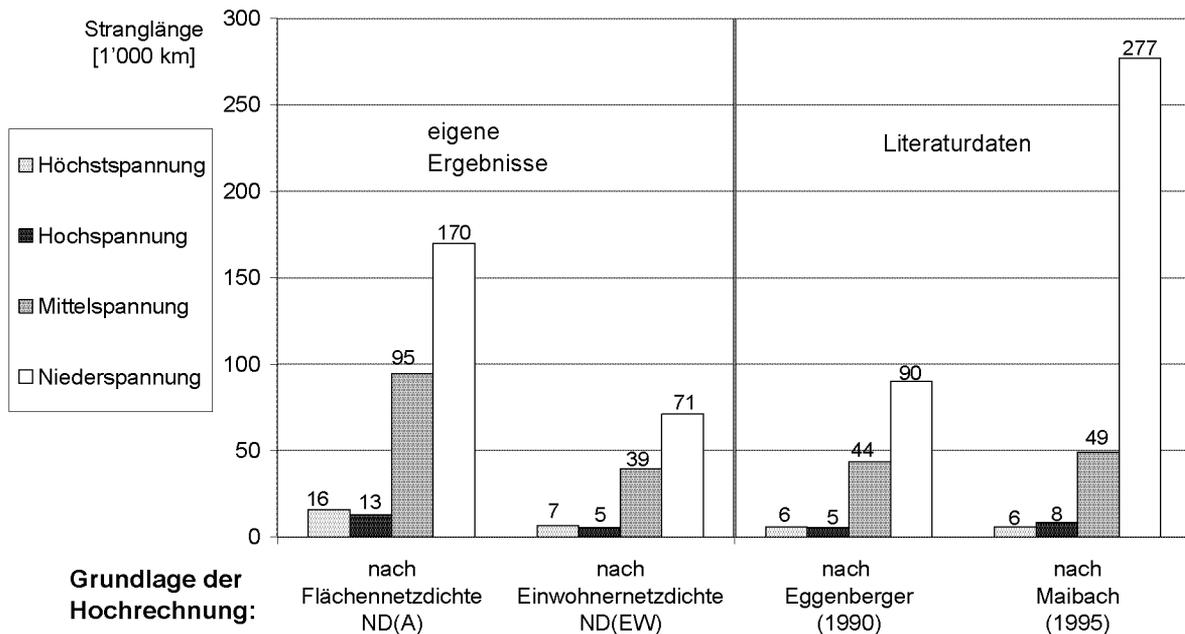


Abb. 4-2: Stranglängen des schweizerischen Stromnetzes geordnet nach den vier Spannungsebenen *Höchstspannung*, *Hochspannung*, *Mittelspannung* und *Niederspannung*: Gegenüberstellung der eigenen Ergebnisse mit Literaturwerten (EGGENBERGER 1990; MAIBACH et al. 1995).

Die Berechnung auf Basis der *Flächennetzdichte* ND_A weist im Vergleich zu den anderen Ergebnissen die grössten Stranglängen für alle vier Spannungsebenen auf (mit Ausnahme der NS, die Maibach (1995) doppelt so hoch angibt). Möglicherweise ist die *Flächennetzdichte* der Schweiz (ND_{A-CH}) in dieser Arbeit systematisch zu hoch bestimmt (Tab. 3-18), da neben den städtischen und überwiegend ländlichen Gebieten auch fast unbewohnte Gebiete in der Schweiz existieren (hochalpine Regionen), doch bisher nicht ausreichend beachtet sind. Vermutlich sind die Bergregionen mit ihren geringen ND_A in den untersuchten Elektrizitätswerken untervertreten. Dies wird dadurch gestützt, dass die ländlichen Versorgungsgebiete mit abnehmender Bevölkerungsdichte auch geringere ND_A aufweisen (Abb. 4-3). Folglich ist zu erwarten, dass die hochalpinen Regionen sehr niedrige ND_A aufweisen. Durch Abzug der hochalpinen Fläche würde die über die ND_A berechnete Stranglänge entsprechend geringer ausfallen.

Aus dem gleichen Grund fällt die Stranglängenberechnung nach der *Einwohnernetzdichte* ND_{EW} möglicherweise etwas zu gering aus, denn in den untervertretenen ländlichen Gebieten mit ihrer geringen Bevölkerungsdichte sind erhöhte ND_{EW} zu erwarten – mangels Synergieeffekten im Infrastrukturbau. Dies kann durch die Zuordnung der Verteilstrukturen der Agglomerationen zu den städtischen Gebieten (statt zu den ländlichen) verstärkt werden, denn das unkorrigierte Übertragen der städtischen *Einwohnernetzdichte* ND_{EW-S} auf die Agglomerationen (Annahme: insgesamt 3/7 der Bevölkerung) würde demnach die städtischen Lager überschätzen (Tab. 2-12). Ausserdem ist durch weitere empirische Untersuchungen und Erhebungen zum Stromnetz zu beurteilen, ob die Grobklassierung in „Stadt“ und „Land“ ausreichend ist und wo hinsichtlich des Materialisierungsaufwands

sich als problematisch, da der Begriff „Endkunde“ nicht einheitlich verwendet wird. In Näherung bildet die „Anzahl Endkunden“ die „Anzahl Haushalte/Gebäude“ ab und korreliert damit indirekt mit der „Anzahl der versorgten Einwohner“. Abschliessend ist diese „endkundenbezogene Netzdichte“ als ungeeignet zur Exploration einzustufen.

die Klassengrenze zu ziehen ist. Entsprechend sind die Gewichtungsfaktoren zu korrigieren bzw. genauer zu bestimmen, die die Näherungswerte in Tab. 2-12 ersetzen.

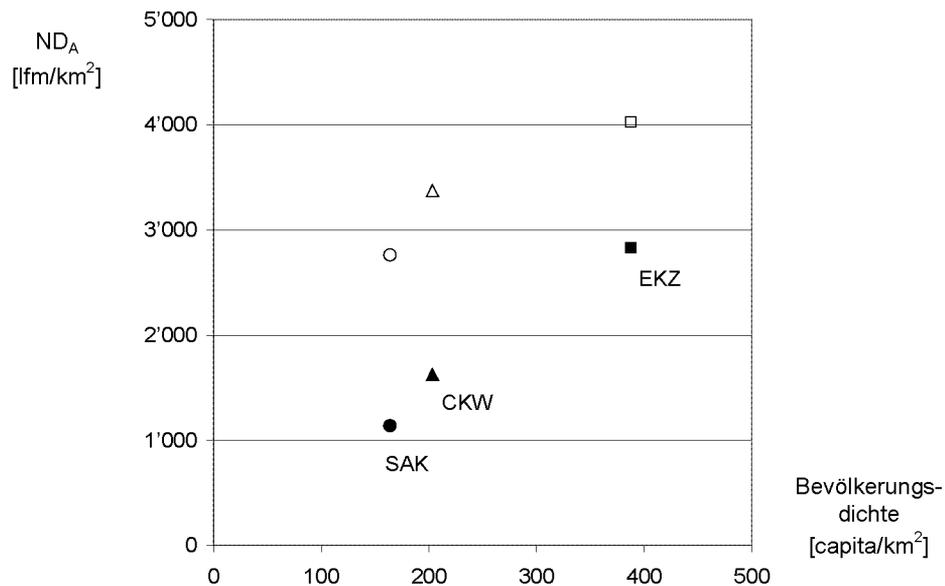


Abb. 4-3: Korrelation von *Flächennetzdichte* ND_A und Bevölkerungsdichte. Mit abnehmender Bevölkerungsdichte ($EKZ > CKW > SAK$) nimmt auch die flächenbezogene Netzdichte ab: ($ND_A(EKZ) > ND_A(CKW) > ND_A(SAK)$). Dies gilt sowohl für die Niederspannung (hohle Formen) als auch für die Mittelspannung (ausgefüllte Formen). Die Formen stehen für die untersuchten Elektrizitätswerke: ● St. Gallisch-Appenzellische Kraftwerke AG (SAK); ▲ Central-schweizerische Kraftwerke (CKW); ■ Elektrizitätswerke des Kantons Zürich (EKZ).

Beurteilung der Erhebung des Infrastrukturlagers

Von den Infrastrukturnetzen ist für Kupfer das Starkstromnetz am bedeutsamsten und am besten untersucht worden. Die Starkstromnetze verschiedener Regionen variieren je nach versorgtem Gebiet und der Geschichte des Gebietes. Die Ausgestaltung des Netzes mit den Schlüsselgrößen *Leiterquerschnitt* der homogenen Strangabschnitte, *Leitungsführung* und *Materialwahl* ist direkt und/oder indirekt von mehreren Parametern abhängig (Abb. 4-4). Die äusseren Einflussparameter sind im Allgemeinen regionsspezifisch (mit Ausnahme der Leitungspreise, da die Kabel problemlos weit transportiert werden können).

Einen zentralen starken Einfluss auf die Ausgestaltung des Netzes hat die angestrebte übertragene Strommenge bzw. Stromstärke. Diese und weitere, mit ihnen verknüpfte technisch-physikalische Parameter wirken auf die Wahl des Leiterquerschnitts und der Leitungsführung ein. Die Wahl der Leitungsführung wird auch massgeblich durch die Geomorphologie und die Siedlungsdichte mitbestimmt. Die Leitungsführung limitiert ihrerseits die Materialwahl, welche auch durch die unterschiedlichen Preise der Leitermaterialien beeinflusst wird. Bei gegebenem Leiterwiderstand wirkt sich so die Materialwahl über den spezifischen Widerstand auf den erforderlichen Leiterquerschnitt aus. Die Abbildung zeigt somit die verschiedenen Einflussparameter auf, die auf die Schlüsselgrößen einwirken bzw. wie sie sich gegenseitig beeinflussen.

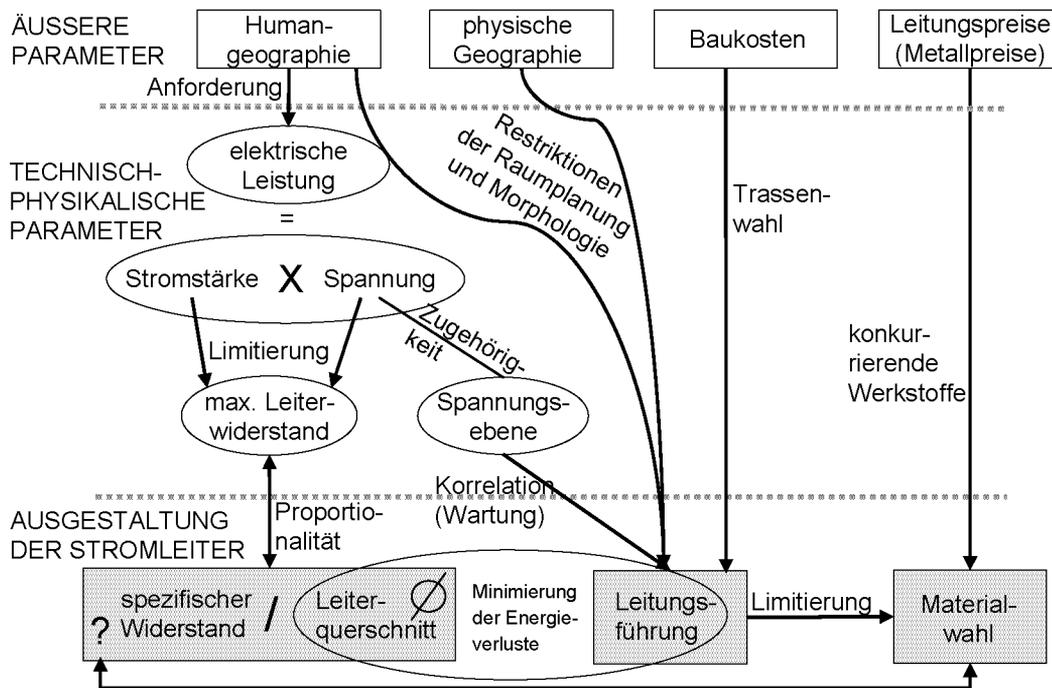


Abb. 4-4: Schema der äusseren und technisch-physikalischen Einflussparameter (Rechtecke oben bzw. Ellipsen) bei der Ausgestaltung der Stromleiter von Starkstromleitungen: Darstellung des Zusammenhangs zwischen den Einflussparametern und den Schlüsselgrössen (graue Rechtecke) durch Pfeile, wobei Stichworte die Art des Zusammenhangs beschreiben.

Bei der Ausgestaltung der einzelnen Teilnetze sind grosse Unterschiede auszumachen, was sich in den Schlüsselgrössen widerspiegelt: Die Stranglängen variieren um mehr als drei Grössenordnungen, die spezifische Masse um eine Grössenordnung (Abb. 4-5). Künftige Untersuchungen sind verstärkt auf die Stranglänge der Teilnetze zu konzentrieren, da dort grössere Unsicherheiten zu erwarten sind.

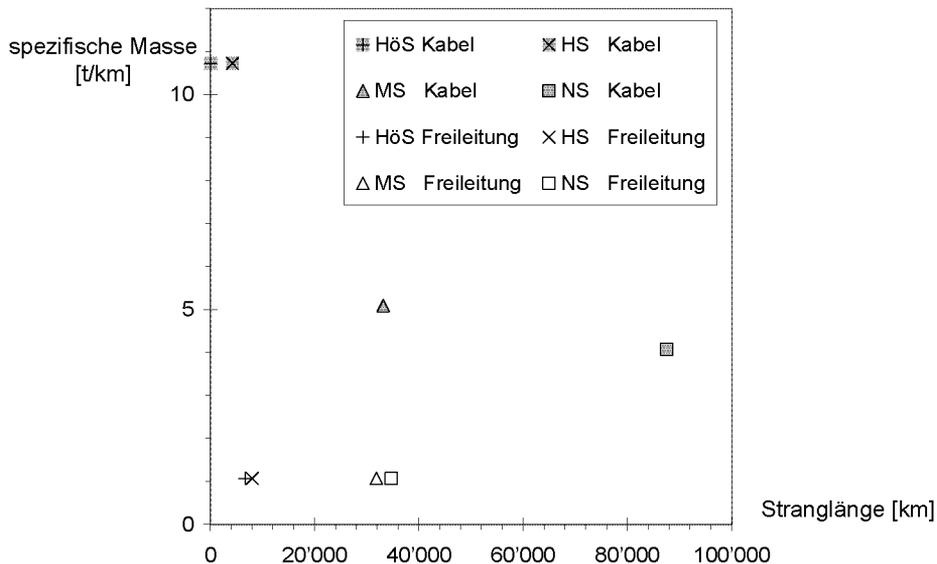


Abb. 4-5: Zusammenfassende Darstellung von Stranglänge und spezifischer Masse (pro Strang) der Starkstromleitungen in verschiedenen Netzebenen und nach Verlegeart.

Es besteht die Aussicht, dass die Verfügbarkeit und Genauigkeit von digitalisierten Leitungsplänen und Daten der Leitungsinventare innerhalb der nächsten Jahre zunimmt. Zur Zeit erstellen die ersten Netzbetreiber Datenbankstrukturen, die für einen Einsatz mit geographischen Informationssystemen

(GIS) geeignet sind, so genannte Netzinformationssysteme (NIS). Bisher können einzig die „Central-schweizerischen Kraftwerke“ eine Gesamtaussage zu ihrem Netz machen, die anderen Betreiber haben aus Kostengründen nur grobe Querschnitts-Klassierungen im Rahmen ihrer Substanzwerterhebungen angewendet. Mit einem flächendeckenden Verbund von NIS wäre die Erfassung wesentlich zu beschleunigen.

Mobilien

Das Kupferlager in den Mobilien ist mit ca. 245'000 t das kleinste und vielfältigste der drei Hauptlager. Wegen der geringeren mittleren Lebensdauer sind die Mobilienflüsse ähnlich gross wie jene der anderen Hauptlager und daher nicht vernachlässigbar.

Durch Auftragen der statistischen Angaben und der Schätzungen zur Gütermasse sowie zur Kupferkonzentration der Güter wird die Bedeutung der einzelnen Gütergruppen ersichtlich (Abb. 4-6). In einer Auswahl von nur 8 der 23 untersuchten Gütergruppen werden mehr als 80 % des Kupfers in den Mobilien erfasst. Mit abnehmender Bedeutung für das Kupferlager sind dies: die Produktionsmaschinen (inkl. landwirtschaftlichen Maschinen); Werkzeug, Schrauben, Beschläge, Nägel etc.; die Personenwagen; die Lastkraftwagen (inkl. Traktoren und Motorkarren); die Unterhaltungselektronik; das Münzgeld; die Lokomotiven; die Sammelbezeichnung „Sonstiges“ (Dekorationen, Kerzenständer, Sportgeräte, Schreibgeräte, Schmuck, Kunstwerke).

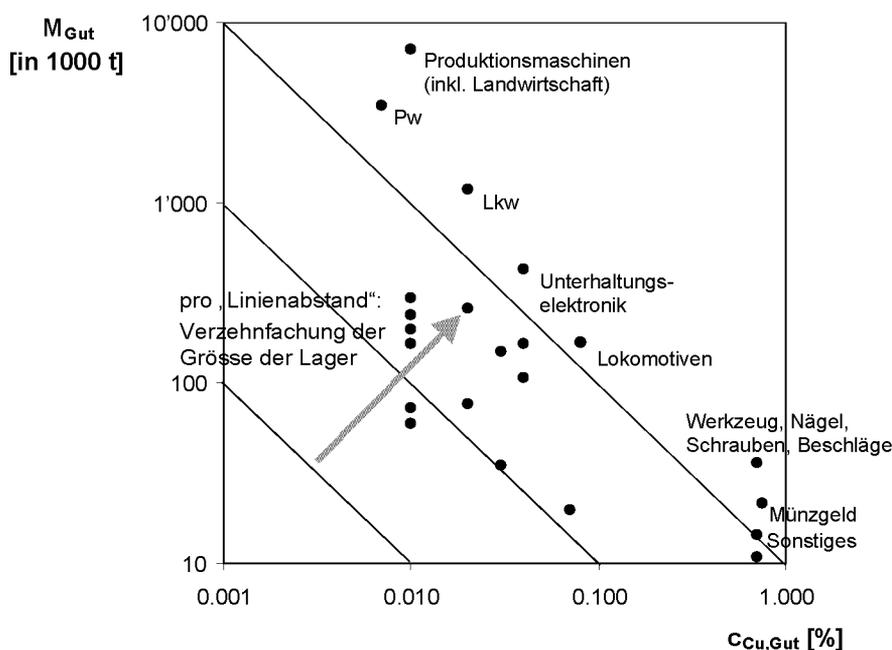


Abb. 4-6: Gütermasse (M_{Gut} , Gesamtmasse pro Gut) versus Kupferkonzentration ($C_{\text{Cu,Gut}}$) für die 23 untersuchten Gütergruppen der *Mobilien*. Die diagonalen Linien geben jeweils Lager gleicher Grösse an. Die Pfeilrichtung zeigt auf, dass sich ein Lager von Linie zu Linie verzehnfacht. Die benannten Gütergruppen beinhalten insgesamt 80 bis 85 % der Kupfermenge in den Mobilien. – Sonstiges: Dekorationen, Kerzenständer, Sportgeräte, Schreibgeräte, Schmuck, Kunstwerke.

Deponie

Der Elektronikschrottanteil der zu entsorgenden Güter ist in den vergangenen Jahren gestiegen, was sich auch auf die Kupferkonzentration im Siedlungsabfall auswirkt. Als steuernde Massnahme zielt die „Verordnung über die Rückgabe, die Rücknahme und die Entsorgung von elektrischen und elektronischen Geräten“ auf eine Verminderung des Metallanteils im Siedlungsabfall (BUWAL 2000). Die

stufenweise Einführung der Gratisrückgabe¹¹⁸ ausgedienter elektrischer und elektronischer Geräte, so genannten EE-Schrotts, begann im Jahr 1999 und hat sich über mehrere Jahre erstreckt. Seitdem steigt der wiederverwertete Anteil des EE-Schrotts an.

Befunde bisheriger Arbeiten

Bisher haben sich drei Arbeiten explizit mit der Kupferlagersituation in der Schweiz auseinandergesetzt, die teilweise auf denselben Literaturquellen beruhen:

- In einer Vorläuferarbeit aus einer frühen Phase dieser Dissertation erhält man als Ergebnis für das Infrastrukturlager quasi identische und für das Gebäudelager um ein Drittel erhöhte Werte (WITTMER *et al.* 2003)¹¹⁹. Das methodische Vorgehen war ähnlich, doch berücksichtigte nicht in ausreichendem Masse, dass der Kupfereinsatz im Dachbereich primär von der Dachfläche abhängig ist (und nicht vom Bruttorauminhalt des Gebäudes) und die Aktualisierung der Installationsgrade aufgrund langer Renovationszyklen verzögert stattfindet.
- Der Schwerpunkt der zweiten Untersuchung liegt auf dem Mobilienlager bzw. den EE-Schrotten der Schweiz (SUTER *et al.* 2003). Dabei wird das Mobilienlager als Teil des gesamten Kupferhaushalts betrachtet. Das Gesamtlager wird mit 240 kg/capita um ca. 10 % geringer eingeschätzt. Die relative Verteilung der Hauptlager ist ähnlich der in der vorliegenden Arbeit¹²⁰. Mit Hilfe einer Stoffflussanalyse wird der Lagerzuwachs berechnet, wobei infolge eines geringeren Importüberschusses alle Lagerzuwächse geringer ausfallen, insbesondere bei der Deponie, aber auch bei den Immobilien. Jene Arbeit schätzt das Gebäudelager im Gegensatz zur vorliegenden Arbeit durch einen *top-down*-Ansatz grob ab.
- Der Bericht „Kupfer in der Schweiz“ des Bundesamts für Umwelt, Wald und Landschaft beschreibt die Kupferemissionen in die Umweltkompartimente und untersucht ausgewählte Teillager als Schadstoffquellen (VON ARX 2006). Zur Schadstoffbetrachtung werden die Lager nicht systematisch untersucht, weswegen die Diversifizierung von Gebäuden und Mobilien weitgehend unberücksichtigt bleibt.

Komposition des gesamten Lagers in der Nutzungsphase

Die drei Hauptlager unterscheiden sich neben ihrer Grösse auch wesentlich in ihrer Heterogenität (Abb. 4-7). Deutlich ist zu erkennen, dass die Infrastruktur als grösstes Lager nur wenige, aber grosse Teillager¹²¹ hat. Demgegenüber sind die Mobilien als kleinstes Lager in viele, aber teilweise sehr kleine Teillager unterteilt. Die Gebäude nehmen in dieser Hinsicht eine mittlere Stellung ein.

¹¹⁸ Die Rückgabe des EE-Schrotts ist in der Schweiz gratis, da die Entsorgungsgebühr bereits beim Produktkauf geleistet wird.

¹¹⁹ Das Vorgehen der Vorläuferarbeit hatte weniger kupferrelevante Produktgruppen berücksichtigt und war seither massgeblich überarbeitet und um die Lager der „Mobilien“ und der „anorganischen Ressourcen“ erweitert worden. In der vorliegenden Dissertationsarbeit sind die Ergebnisse zudem fundierter und ihre Unsicherheiten geringer (statt ca. $\pm 30\%$ nun $\pm 10\%$).

¹²⁰ Immobilienlager von ca. 180 ± 14 kg/capita, davon fast $\frac{2}{3}$ in der Infrastruktur und $\frac{1}{3}$ in den Gebäuden. Die Infrastrukturberechnung beruht im Wesentlichen auf überhöhten Literaturwerten (MAIBACH *et al.* 1995). In den Gebäuden wird das Lager um fast $\frac{1}{4}$ geringer geschätzt, da im Dachbereich Untersuchungen aus Deutschland auf die Schweiz übertragen wurden. Die Mobilien wurden zu 28 ± 7 kg/capita bestimmt.

¹²¹ Hier wird der Begriff Teillager erweitert verstanden, das bedeutet, dass neben den Teillagern – je nach Homogenität – teilweise auch Teilmengen von ihnen verstanden werden. Es sind dies bei der *Infrastruktur*: die Stromkabel, die Transformatoren und die Freileitungen, die Telekommunikationskabel und die Bahnoberleitungen; bei den *Gebäuden*: die vier Funktionsbereiche der Haustechnik plus vier Produktgruppen des Daches; bei den *Mobilien* die 23 untersuchten Produktgruppen.

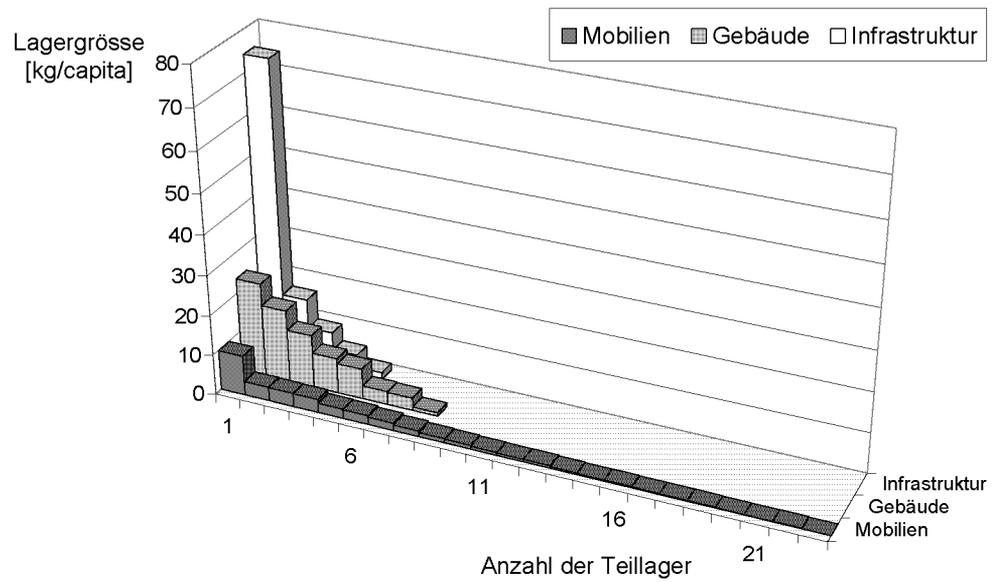


Abb. 4-7: Visualisierung der Heterogenität der drei Hauptlager *Infrastruktur*, *Gebäude* und *Mobilen*. hinsichtlich ihrer Aufteilung in Teillager. Dargestellt sind jeweils die zugehörigen Teillager bzw. Teilmengen von ihnen in absteigender Grösse.

4.2 Qualitative Ursachen für den Aufbau eines Teillagers

Beim Einsatz in Gebäuden sind der Innenbereich (Haustechnik) und der Aussenbereich (Dach) gesondert zu betrachten, denn in Letzterem hat neben den technischen Eigenschaften auch die Ästhetik einen grossen Einfluss auf die Materialentscheidung. In der Schweiz geniesst Kupfer im Aussenbereich bei Bauherren und Baugewerbe traditionell einen guten Ruf und wird auch aufgrund seiner Dauerhaftigkeit bevorzugt eingesetzt. Zwar sind die Fertigungskosten für ein Entwässerungssystem aus Kupferblech meist höher als aus alternativen Materialien¹²², doch werden diese durch die Beständigkeit des Kupfers kompensiert. Gleiches gilt in noch grösserer Masse für ein Kupferdach im Vergleich zu einem Stahlblechdach. Solche Bedachungen aus Stahlblech sind im Alpenraum sehr verbreitet; und gerade dort, wo diese günstigeren Varianten verbreitet sind, werden sie zunehmend nach ihrer Nutzungszeit durch Kupferdächer ersetzt. Eine Entscheidung für eine Kupferausführung trotz der Mehrkosten ist in dieser Hinsicht eine „Investition in die Zukunft“ (SCHMITT und HEENE 1996), deren Amortisation unter Umständen erst nach ein bis mehreren Generationen stattfindet – insofern ist der Einfluss der Dauerhaftigkeit auf die Kaufentscheidung wie selbstverständlich auch jener der Ästhetik abhängig von den Werten und Rahmenbedingungen einer Gesellschaft (und damit indirekt von der Region).

Für die Materialentscheidung in der Haustechnik sind die technischen Eigenschaften relevant, die die gewünschte Funktion am besten erfüllen, und das Preis-Leistungsverhältnis (vgl. Kap. A.1.5.11 im Anhang). Im Bereich der Stromkabel ist Kupfer in verschiedenen niedriglegierten Varianten das einzige eingesetzte Material. Anders bei den Rohrleitungen und Fittings, wo Kupfer direkt mit den günstigeren Substituenten in Konkurrenz steht. Hier obliegt die Materialentscheidung (meist sogar in EFH) dem ausführenden Handwerker. Die kleineren Handwerkerfirmen, die in der Summe einen grossen Teil des Marktvolumens kontrollieren, konzentrieren sich nicht selten auf ein bestimmtes Material, auf das man sich in puncto Verlegetechnik und Bearbeitungsausstattung ausgerichtet hat (Presswerkzeuge, Schellen etc.). Bei Sanitäranlagen legt sich der Installateur überdies häufig auf ein bestimmtes Sanitärsystem fest, das von einer Firma produziert und vertrieben wird und aus Garantiegründen keine Mischung mit anderen Sanitärsysteme zulässt. Jedes System hat dabei eine bestimmte Kombination von Rohr-, Fittings- und Roharmaturen-Materialien (vgl. Tab. A-21 im Anhang).

Aufgrund teilweise langzeitiger Nutzung von Materialien ist es für die Bedeutung urbaner Systeme als Ressourcenlager wichtig, die Aufenthaltszeiten zu berücksichtigen. Die Aufenthaltszeiten von vielen Materialien sind häufig nicht technisch bedingt, sondern durch die Nutzungsdauer des Produktes, in dem sie eingesetzt werden. Ferner wird die Nutzungszeit des Materials durch seine Weiter- und Wiederverwendung und durch Rezyklierung verlängert. Die Nutzungsdauer von Immobilien ist im Gegensatz zu der von Mobilien bedeutend höher, zum Beispiel bei Gebäuden durchschnittlich zwischen 60 und 100 Jahren. Die Gebäude, die in den vergangenen Dekaden gebaut wurden, sind daher zum Grossteil heute noch erhalten und werden genutzt¹²³. Johnstone zeigte in einem Alterungsmodell für Wohngebäude in Neuseeland, dass das Alter der Individuen (Bauwerke) und ihre durchschnittliche Nutzungsdauer relevante Einflussgrössen eines Bestandes sind (JOHNSTONE 1994,2001a); diese Aussage gilt auch für Bestände von ausgewählten Produktgruppen (VAN DER VOET *et al.* 2000).

¹²² Ausgenommen Kupfertanzink, das in modernen Gebäuden eingesetzt wird, „Uginox“ (Edelstahl) und zinnbeschichtetes Kupferblech (COUTALIDES *et al.* 2000).

¹²³ In der Schweiz ist die Verteilung der Gebäudealter aufgrund der nur geringen Zerstörungen im 2. Weltkrieg weit homogener als in den umliegenden Ländern.

Die Nutzungsintensität¹²⁴ physischer Ressourcen ist in der Schweiz als hoch einzustufen. In gewisser Weise hängt die Nutzungsintensität von der Region und ihrer „Lebensstruktur“ ab (Stoffflüsse, die innerhalb der Region gewonnen oder nur zur Produktion importiert werden, um später wieder in andere Regionen ausgeführt zu werden, sollten jenen Regionen zugeordnet werden). Der hohe Lebensstandard und das relativ ausgewogen verteilte Kapital (WRI 1996) ermöglichen fast allen Bevölkerungsschichten in der Schweiz eine erhöhte Ausstattung an Mobilien und bei den Gebäuden. Die Infrastruktur hingegen ist auch vom Grad der übergeordneten Instanzen abhängig. In der Schweiz ist eine flächendeckende Infrastruktur gewährleistet, in einigen Bereichen gar gesetzlich verankert (zum Beispiel „letzte Meile“ der „swisscom“). Unterstützend beim Aufbau eines flächendeckenden, dichten Netzes des öffentlichen Verkehrs wirkt wohl zum einen die ausgewogen dichte Besiedlung des schweizerischen Mittellandes zwischen Voralpen und dem Jura und zum andern die zwangsweise „Kanalisation“ der Verkehrswege durch die Täler im Alpenraum.

¹²⁴ Unter Nutzungsintensität von (physischen) Ressourcen wird hier die Menge der Ressourcen verstanden, die im Leben der Region eingesetzt werden. Sie hängt weniger als die jährlichen Verbrauchsmengen von der schwankenden Konjunktur ab, sondern dem Profil des „Unterbaus“ der Gesellschaft und Wirtschaft.

4.3 Unsicherheiten der Kupferlager

4.3.1 Methode

Die genauen Werte der Eingangsdaten zur Berechnung der Kupferlager sind nicht bekannt. Meist sind die Werte nur innerhalb eines bestimmten Bereiches bekannt, dem so genannten Unsicherheitsbereich. Diese Unsicherheiten der Eingangsdaten führen zu Unsicherheiten bei denjenigen Grössen, die aus ihnen berechnet werden, den Lagern (vgl. Kap. A.3.2, Gl. 1–3, im Anhang).

Zur Abschätzung der Unsicherheiten der Kupferlager in den *Gebäuden*, der *Infrastruktur* und den *Mobilien* werden jeweils die Gauss'sche Fehlerfortpflanzung und die Monte-Carlo-Methode angewendet, um die Anwendbarkeit der Gauss'schen Fehlerfortpflanzungsmethode zu prüfen. Hierzu wurden die Unsicherheiten der Eingangsdaten abgeschätzt. Die Eingangsdaten (Mittelwert \pm Unsicherheit bzw. Standardabweichung) sind in den Tabellen A-31 bis A-36 im Anhang zu finden (identisch für beide Fehlerfortpflanzungsmethoden¹²⁵). Aus praktischen Gründen wird die Unsicherheit der *Gebäude* für den vereinfachten Fall ohne Berücksichtigung der Renovationszyklen bestimmt (Kap. 3.2) und die relative Unsicherheit anschliessend für das mathematische Modell auf den komplexeren Fall mit Berücksichtigung der Renovationszyklen übertragen.

a) Gauss'sche Fehlerfortpflanzung

Die Gauss'sche Fehlerfortpflanzung ist eine Berechnung erster Ordnung, die für relativ kleine Unsicherheiten geeignet ist (BACCINI und BADER 1996; CIROTH *et al.* 2004)¹²⁶. In dieser Näherung werden die Unsicherheiten der Lager nach der Gauss'schen Fehlerfortpflanzungs-Formel berechnet:

Gl. 26

$$\text{Gauss'sche Fehlerfortpflanzung} \quad (\sigma_x)^2 = \sum_{j=1}^M \left(\frac{\partial x_i}{\partial p_j} \right)^2 \cdot \sigma^2(p_j)$$

mit $x_i = x_i(p_1, \dots, p_M)$
 p_1, \dots, p_M : Parameter (Eingangsdaten)

Die Formeln zur Berechnung der drei Hauptlager (Gebäude, Infrastruktur, Mobilien), auf welche die Gauss'sche Fehlerfortpflanzung angewendet wurde, sind in Kap. A.3.2, Gl. 1–3, im Anhang aufgeführt.

b) Monte-Carlo-Simulation

Zur Berechnung der Wahrscheinlichkeitsverteilung der Lagergrössen – und nicht nur des Mittelwerts und der Standardabweichung – wurde die Monte-Carlo-Simulation angewendet. Als Stichprobenumfang wurde $N = 20'000$ gewählt. Die vorhandenen Informationen erlaubten keine genaue Ableitung der Wahrscheinlichkeitsverteilung der Eingangsdaten. Daher wurden aus Plausibilitätsgründen normalverteilte Häufigkeitsmuster gewählt.

Die Berechnungen wurden mit der Software SIMBOX¹²⁷ durchgeführt.

¹²⁵ Der Begriff Fehlerfortpflanzung ist in der Literatur gängig, doch eigentlich ist der Begriff Unsicherheitsanalyse in diesem Arbeitsgebiet gebräuchlicher. „Fehler“ umfassen sowohl systematische als auch statistische Fehler. In dieser Arbeit werden jedoch ausschliesslich statistische Fehler behandelt.

¹²⁶ Eine Faustregel besagt die Anwendbarkeit bei relativen Fehlern $(\sigma_{p_i} / \bar{p}_i) \leq 30\%$.

¹²⁷ Die Software SIMBOX wurde auch zur dynamischen Modellierung verwandt. Für weitere Informationen siehe Kap. 5.1.

Sonderfall Deponie

Die Unsicherheit des Lagers in den Deponien wird nach der *Gauss'schen Fehlerfortpflanzung* manuell berechnet. Da die Eingangsdaten keine Angaben zu Unsicherheiten enthalten, werden die Unsicherheiten hierfür abgeschätzt.

4.3.2 Resultate

Nach der Gauss'schen Fehlerfortpflanzung betragen die resultierenden Standardabweichungen $\sigma_{\text{Gebäude}} = 80'500 \text{ t}$ (11 kg/capita)¹²⁸, $\sigma_{\text{Infrastruktur}} = 175'000 \text{ t}$ (24 kg/capita), $\sigma_{\text{Mobilien}} = 59'500 \text{ t}$ (8 kg/capita) und $\sigma_{\text{Deponie}} = 87'600 \text{ t}$ (12 kg/capita). Damit betragen die relativen Standardabweichungen zwischen 14 % und 24 % (Abb. 4-8). Der kleinste relative Fehler ist bei den Gebäuden zu finden, der grösste bei den Deponien. Für das Gesamtlager verringert sich die relative Unsicherheit auf 11 %.

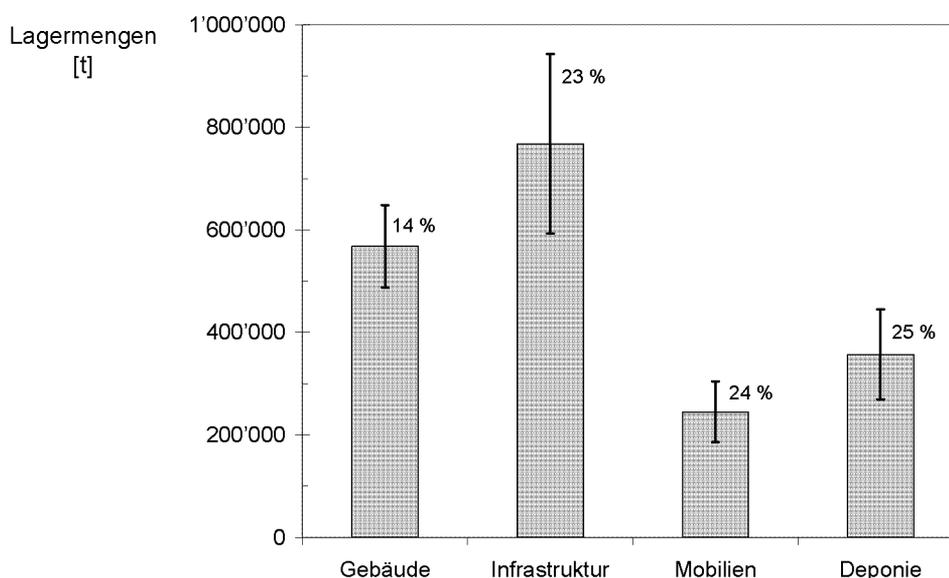


Abb. 4-8: Die Teillager mit ihren Unsicherheiten nach der Gauss'schen Fehlerfortpflanzung (die Standardabweichungen sind als Fehlerbalken mit Angabe der relativen Unsicherheit dargestellt). Das Lager der Gebäude berücksichtigt den Renovationszustand der Funktionsbereiche (vgl. Kap. 3.2.3). Lagerangabe in Tonnen Kupfer.

Neben dem Mittelwert und der Standardabweichung illustriert die Monte-Carlo-Simulation auch die Häufigkeitsverteilung (Wahrscheinlichkeitsverteilung) der Lager (Abb. 4-9). Je nach Lagerberechnungsgleichung (vgl. Kap. A.3.2, Gl. 1-3, im Anhang) variieren die Formen der Unsicherheitsverteilung. Es ist zu beachten, dass für die Berechnung der Unsicherheit des Gebäudelagers nicht das zeitliche Stufenmodell der Renovationen in den Funktionsbereichen berücksichtigt wurde (vgl. Kap. 4.3.1).

Die Monte-Carlo-Simulationen ergeben Mittelwerte, die geringfügig von den Mittelwerten der Gauss'schen Fortpflanzung abweichen (Differenz < 0.3 %). Die Standardabweichungen der Monte-Carlo-Simulation sind etwas grösser als jene der Gauss'schen Fehlerfortpflanzung (vgl. Abb. 4-9, Tab. A-37). Die Lagerergebnisse betragen pro Kopf ($\bar{x} \pm \sigma$):

- $M_{\text{Gebäude}} = 79 \pm 11 \text{ kg/capita}$ (Übertrag des relativen Fehlers von 14.2 %; Originalwert: $91 \pm 13 \text{ kg/capita}$)
- $M_{\text{Infrastruktur}} = 107 \pm 24 \text{ kg/capita}$
- $M_{\text{Mobilien}} = 34 \pm 8 \text{ kg/capita}$

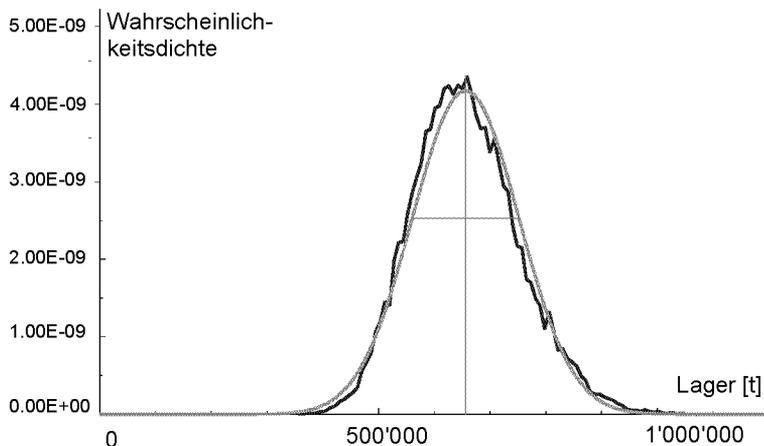
¹²⁸ Original berechnet ohne Berücksichtigung der Renovationszyklen: $93'100 \text{ t}$ (13 kg/capita).

Insgesamt stimmen die Histogramme gut mit den abgeleiteten Normalverteilungen überein, können also in Näherung durch sie wahrheitsgetreu abgebildet werden. Beim Vergleich der Histogramme mit den Normalverteilungen wird deutlich, dass sie linksschief sind (Abb. 4-9). Das bedeutet, dass der Modalwert kleiner ist als der Mittelwert. Den Histogrammen ist gemeinsam, dass sie – vereinfacht – mit der Normalverteilung drei Schnittpunkte haben, die die Kurven also in vier Intervalle teilen. Die Kurven liegen im ersten Intervall $x=[0; \bar{x}-1.5\sigma]$ unterhalb der Normalverteilung, im zweiten Intervall $x=[\bar{x}-1.5\sigma; \bar{x}]$ oberhalb, im dritten Intervall $x=[\bar{x}; \bar{x}+1.5\sigma]$ erneut unterhalb und im vierten Intervall $x \geq \bar{x}+1.5\sigma$ schliesslich oberhalb (der Faktor 1.5 ist ein unterer Richtwert zur Veranschaulichung des Kurvenverlaufs ohne Anspruch auf Genauigkeit). Die Abweichungen sind bei den Mobilien am grössten.

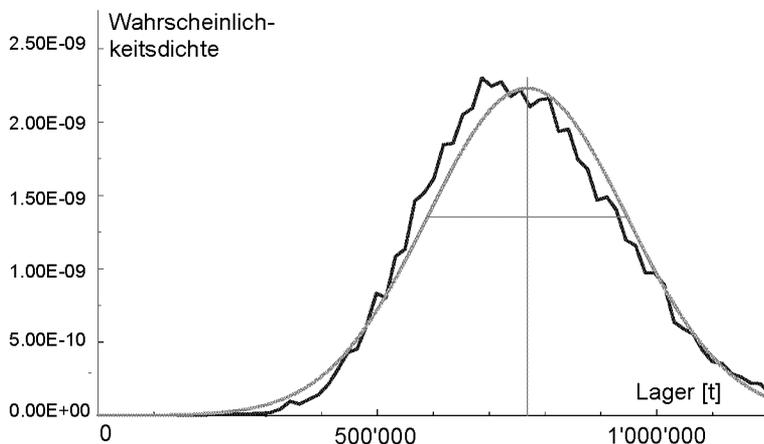
Zusammengefasst zeigt der Vergleich der Monte-Carlo-Simulation mit der Gauss'schen Fehlerberechnung folgende Merkmale (vgl. Tab. A-37 im Anhang):

- 1. Die empirischen Mittelwerte stimmen überein.**
- 2. Die Standardabweichung liegt bei der Gauss'schen Fehlerfortpflanzung zwischen 2 und 9 % unterhalb der Monte-Carlo-Simulation. Die Unsicherheit wird also bei Gauss leicht unterschätzt.**

a) GEBÄUDE : $655.5 \pm 95.5 \cdot 10^3 \text{ t}$ ($\pm 14.6 \%$)



b) INFRASTRUKTUR : $768.0 \pm 179.0 \cdot 10^3 \text{ t}$ ($\pm 23.3 \%$)



c) MOBILIEN : $245.5 \pm 64.5 \cdot 10^3 \text{ t}$ ($\pm 26.3 \%$)

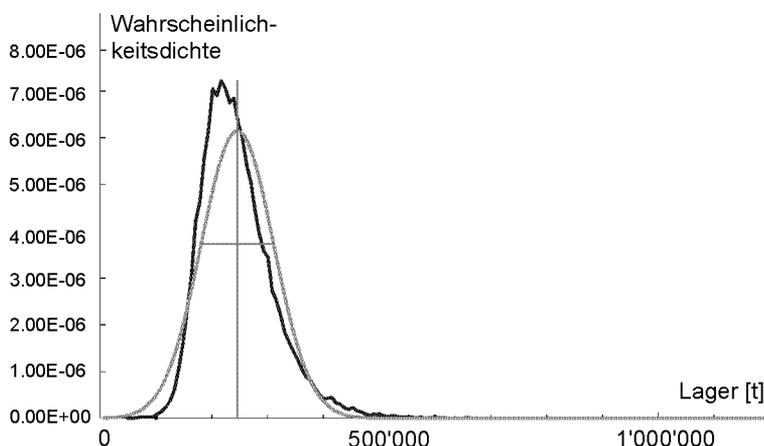


Abb. 4-9: Histogramme der Monte-Carlo-Simulationen für die drei Teillager (von oben nach unten): (a) Gebäude (ohne Renovationszyklen: siehe Text); (b) Infrastruktur; (c) Mobilien. – Auf der Abszisse ist die Lagergrösse aufgetragen, wobei der Maximalwert bei allen drei Diagrammen $1.2 \cdot 10^6$ Tonnen ist. Die dunklere Linie ist der berechnete Häufigkeitsverlauf, die hellere die daraus abgeleitete Normalverteilung. Das Kreuz unterhalb der Glockenkurve zeigt den Mittelwert \bar{x} und die Standardabweichung $\pm \sigma$ des Teillagers an (der Mittelwert der Normalverteilung ist auch der „Schwerpunkt“ des Histogramms). Die Mittelwerte und Standardabweichungen in der Überschrift der Graphen sind aus den Histogrammen herausgelesen. Die Darstellung beruht auf einer Klasseneinteilung mit $n = 100$ Häufigkeitsklassen.

Abb. 4-10 liefert zusammenfassend einen Überblick über die in der Anthroposphäre der Schweiz gelagerten Mengen aus den vorangegangenen Erhebungen inklusive ihrer Fehler.

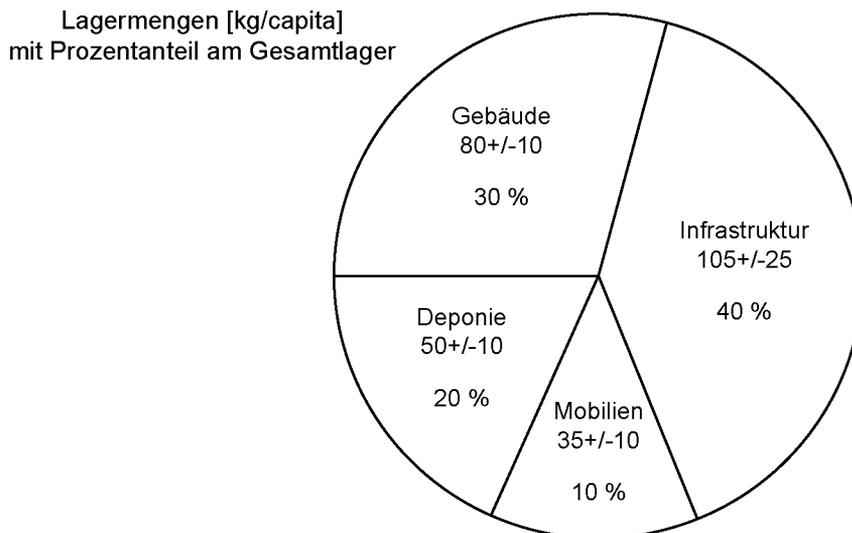


Abb. 4-10: Die anthropogenen Kupferlager in der Schweiz zu Ende des 20. Jahrhunderts. Angaben in [kg/capita] und als Prozentanteil (Werte auf 5 [kg/capita] bzw. 10 % gerundet). Das Gebäudelager berücksichtigt die Renovationszyklen; ohne Berücksichtigung der in den Umweltkompartimenten akkumulierten Menge.

Das gesamte Kupferlager urbaner Lagerstätten in der Schweiz beläuft sich auf 269 ± 31 kg/capita, davon 219 ± 29 kg/capita in den Hauptlagern und 50 ± 12 kg/capita in den Deponien (also knapp ein Fünftel)¹²⁹. Innerhalb der Hauptlager dominieren also deutlich mit je ca. 100 kg/capita die Gebäude und die Infrastruktur (79 ± 11 bzw. 107 ± 25 kg/capita) gegenüber den Möbeln (34 ± 9 kg/capita). Damit verteilt sich das Lager auf ungefähr 70 % in den Immobilien, knapp 15 % in den Möbeln und der Rest in den Deponien.

¹²⁹ Die Fehlerangabe zu den Lagern in der Nutzungsphase erfolgt nach der Unsicherheitsanalyse der Monte-Carlo-Simulation. Der Fehler der Deponie wurde nach der Gauss'schen Fehlerfortpflanzung berechnet.

4.4 Vergleich mit anderen Stoffen

4.4.1 Haupt- und Spurenstoffe

Die Lager anderer Stoffe sind in der Schweiz bislang nicht in gleichem Umfang wie Kupfer inventarisiert worden. Teilweise wurden die Lager in bisherigen Stoffflussanalysen berechnet, meist durch Hochrechnungen über jährliche Stoffflüsse. Die Kupfermenge 250 bis 300 kg/capita bewegt sich – bezogen auf die gesamte Lagermenge in den Hauptlagern der Schweiz von ca. 400 t/capita – im Promillebereich: ca. 0.7 Gew.‰ (Abb. 4-11). Kupfer ist damit neben den anderen Nichteisenmetallen und den Kunststoffen ein Spurenstoff in den urbanen Lagerstätten.

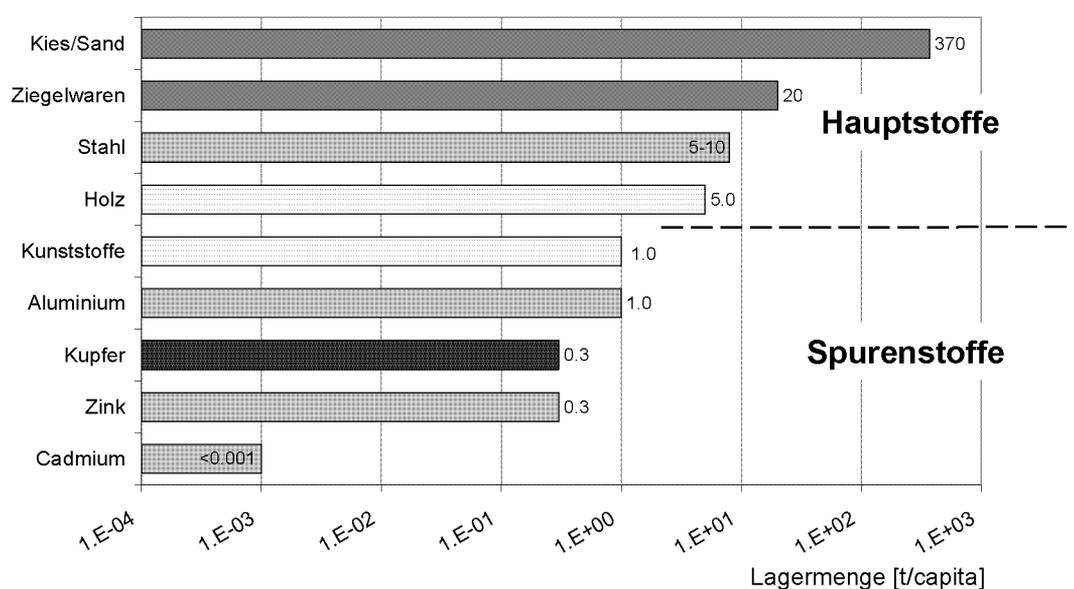


Abb. 4-11: Ausgewählte urbane Stoff- und Materiallagerstätten der Schweiz zu Ende des 20. Jahrhunderts: Vergleich der Mengenangaben pro Kopf. Dunkelgraue Balken: mineralische Rohstoffe; hellgrau: Metalle; hell: organische Stoffe. – Kies/Sand: inklusive Zementwaren und Gips. Quelle: eigene Untersuchungen und Literaturangaben (Tab. A-30 im Anhang).

Das Gros der Masse (> 95 Gew.%) ist in den mineralischen Rohstoffen gebunden (zwei bis drei Grössenordnungen höher als Kupfer). Im Vergleich zur Kupfermenge sind die Holz- und Stahlmengen mehr als eine Grössenordnung höher, die Kunststoffmenge ist immerhin ca. dreimal so gross. Dies ist auf den intensiven Einsatz der genannten Stoffe im Baubereich zurückzuführen. Die Lagermenge von Zink ist ähnlich gross wie jene von Kupfer. Cadmium hat nur wenige Anwendungsfelder mit geringen eingesetzten Mengen und liegt daher mehr als zwei Grössenordnungen tiefer als Kupfer. Der Einsatz der Stoffgruppe der Metalle erstreckt sich also vom Massenrohstoff Stahl (Baustahl) über die Nichteisenmetalle bis zu den Metallen in Sonderanwendungen wie Cadmium und Edelmetalle über mindestens vier Grössenordnungen¹³⁰. Kupfer ist damit einer der häufigeren Spurenstoffe.

¹³⁰ In einer schwedischen Untersuchung wird die Verteilung der anthropogenen Lager von sieben Schwermetallen beschrieben (SÖRME *et al.* 2001): Cu 170 kg/capita, Pb 73 kg/capita, Zn 40 kg/capita, Cr 8 kg/capita, Ni 4 kg/capita, Cd 0.2 kg/capita, Hg 0.01 kg/capita. Die Metallager können in verschiedenen Ländern stark voneinander abweichen, sofern die Nutzung der Metalle regionspezifische Eigenheiten aufweist. Aufgrund der Metalleigenschaften und der Metallpreise dürfte die Rangfolge der Lagergrössen aber ähnlich sein.

4.4.2 Übertragbarkeit des Vorgehens auf andere Stoffe

Die Explorationsmethode und die Lagererfassung sind in der vorliegenden Arbeit auf die vielfältigen Einsatzfelder des Spurenstoffs Kupfer abgestimmt. Durch diese Stoffwahl erhält die Methode eine weitgehende Universalität und ist auf ähnliche Stoffe leicht übertragbar, die die gleichen Einsatzfelder¹³¹ aufweisen bzw. eine Auswahl davon. Dies gilt insbesondere für die potentiellen Substituenten des Kupfers wie Kunststoff, Nichteisenmetalle oder Stahl.

Die zur Berechnung verwendeten Faktoren sind die Schlüsselgrößen (z.B. Installationsdichte, Stranglänge etc.). Konkret lassen sich die methodisch identifizierten Schlüsselgrößen nach ihrer Übertragbarkeit in *stoffspezifische* und *universelle Größen* unterteilen (Tab. 4-1). *Universelle Größen* wie z.B. die *Häufigkeit des Produkts* oder auch die *Installations-* und *Netzdichte* beschreiben das Auftreten der Produkte unabhängig von der Materialwahl. *Stoffspezifische Größen* wie die *Häufigkeit des Materials*, die *spezifische Masse* und die *Stoffkonzentration* beschreiben die Ausführung der Produkte spezifisch für den untersuchten Stoff. Entsprechend erfordert die Durchführung der urbanen Exploration für andere Stoffe als Kupfer eine erneute Untersuchung dieser stoffspezifischen Größen.

Tab. 4-1: Übersicht der Schlüsselgrößen für die Erfassung der drei Hauptlager. Die stoffspezifischen Größen sind grau hinterlegt. – Abkürzungen: fM = Häufigkeit des Materials; fP = Häufigkeit des Produkts; ID = Installationsdichte; ND_A, ND_{EW} = Flächen- bzw. Einwohner-Netzdichte; sM = spezifische Masse; c_{Cu} = Kupferkonzentration. „-“ bedeutet „nicht erforderlich“.

Hauptlager	Häufigkeiten		Bezugsgröße („Dichte“)	Stoffmasse pro Funktionseinheit	
Gebäude	fM	fP	ID(Bezugsfläche)	sM	c _{Cu}
Infrastruktur	fM	-	ND _A bzw. ND _{EW}	sM	-
Mobilien	-	fP	- (-)	sM	c _{Cu}

Verallgemeinert bedeutet dies für das methodische Vorgehen:

Die Exploration der urbanen Lagerstätten verläuft wie bei den geogenen Lagerstätten ressourcenspezifisch, hat aber auch universelle Anteile.

Lagerstätten sind dann in ähnlicher Weise zu explorieren, wenn sich die Rohstoffe in relevanten Eigenschaften ähneln:

für anthropogene Lagerstätten

bei Ähnlichkeit/Verwandtschaft in der Anwendungstechnik bzw. den Einsatzfeldern

für geogene Lagerstätten

bei Ähnlichkeit/Verwandtschaft in ihrer Geochemie

Indem das methodische Vorgehen und die *universellen Größen* für künftige urbane Explorationen übernommen werden, kann der Aufwand für andere Stoffe entsprechend vermindert werden. Zudem liefert jede Untersuchung für die *Häufigkeit des Materials* bereits Kenntnisse über jene Materialien, die den untersuchten Stoff konkurrieren (Substituenten). Dadurch vervollständigen die Explorationsergebnisse zu verschiedenen Materialien einander.

¹³¹ Die Einsatzfelder eines Materials sind grundsätzlich abhängig von seinen Eigenschaften und seinem Preis. Ähnliche Einsatzfelder sind also auf ähnliche Eigenschaften und Herstellungskosten zurückzuführen.

4.5 Regionale Unterschiede urbaner Kupferlagerstätten

Allgemeines zu regionalen Unterschieden in der Materialwahl

Die Materialwahl kann vielfältig begründet sein. Obwohl heutzutage die Baustoffe in der ganzen Schweiz einheitlich erhältlich sind, existieren bei einigen Produktgruppen regionale Vorlieben. Dadurch verschieben sich die Häufigkeiten (fM,fP), teilweise aufgrund ästhetischer Vorlieben, natürlicher Einflüsse (zum Beispiel pH-Wert des Wassers) oder anderen Gründen.

Ländervergleich

Die Plausibilität der Werte für die schweizerischen Lager kann durch regions- und länderübergreifende Vergleiche¹³² des Kupfereinsatzes geprüft werden.

Henstock quantifiziert mittels Zeitreihen des weltweiten Kupferbergbaus als erster den Anstieg des Kupferlagers in der Technosphäre¹³³. Daraus lässt sich ein Anstieg des Pro-Kopf-Lagers von ungefähr 14 kg im Jahre 1950 auf 35 kg im Jahr 1991 pro Weltbewohner berechnen (HENSTOCK 1996). In Übereinstimmung dazu schätzte Lichtensteiger das anthropogene Lager zu Beginn des 21. Jahrhunderts auf ca. 50 kg/capita (LICHTENSTEIGER 2002)(Abb. 4-12). Zwischen den Regionen entwickelter Länder können die Bestände in Abhängigkeit der Urbanität und der Nutzungsintensität differieren.

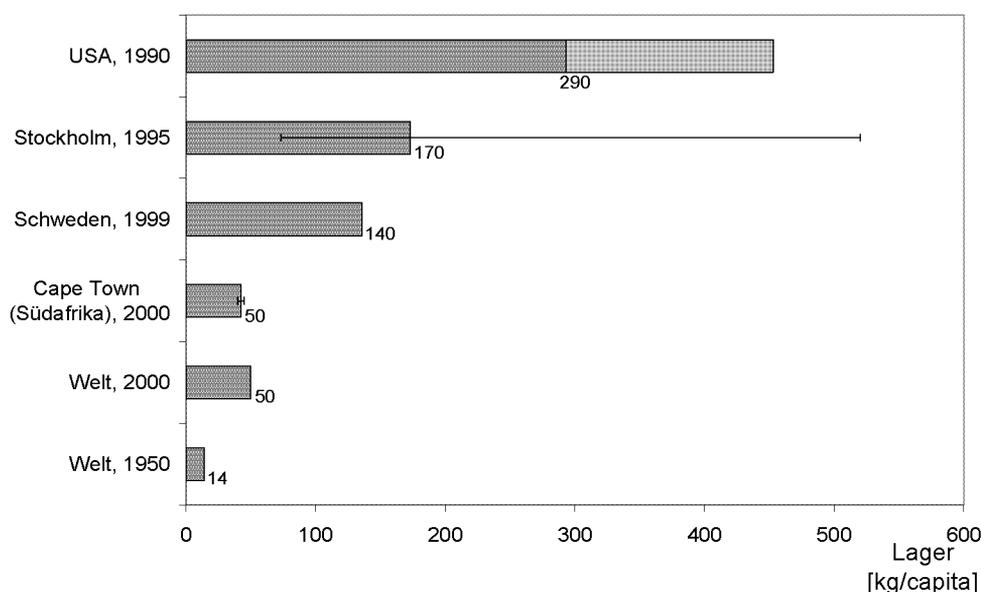


Abb. 4-12: Synopsis der urbanen Kupferlagerstätten pro Kopf in verschiedenen Regionen der Welt mit Angabe des Bezugsjahres (Werte gerundet). Fehlerbereiche sind – soweit angegeben – durch Fehlerbalken angezeigt. Es ist zu beachten, dass alle Lager bis auf „Stockholm“ und „Schweden“ die Kupfermengen in den Deponien einschliessen; bei den USA ist dieser Anteil durch die hellgraue Fläche ausgewiesen. Quellen: USA (ZELTNER *et al.* 1999); Stockholm (SÖRME *et al.* 2001); Schweden (LANDNER und LINDESTROM 1998); Cape Town (VAN BEERS und GRAEDEL 2003); Welt 2000; (LICHTENSTEIGER 2002); Welt 1950 (HENSTOCK 1996).

¹³² Zum Vergleich des Kupfereinsatzes zwischen Regionen und Ländern eignet sich die Pro-Kopf-Darstellung, da der Einsatz von Mobilien, Gebäuden und indirekt auch der Infrastruktur von der Einwohnerzahl abhängig ist.

¹³³ Technosphäre bedeutet „aktuell genutztes Kupfer“, das ist das Lager in der Anthroposphäre minus jenem in den Deponien.

Da die Ressourcen nicht gleichmässig auf die Länder und Regionen verteilt sind, bewegen sich Entwicklungsländer unterhalb und entwickelte Länder deutlich oberhalb dieser 40 bis 50 kg/capita¹³⁴. Durch pauschale Zuordnung des weltweiten anthropogenen Lagers zur Bevölkerung in den entwickelten Ländern erhält man ein Lager von ca. 340 kg/capita (KARLSSON und HOLMBERG 1998). Für Schweden wurden ca. 140 kg/capita ermittelt (LANDNER und LINDESTRÖM 1998). Südafrika wird heute als Transitionsland gesehen, demgegenüber dürften ärmere Gesellschaften in Entwicklungsländern proportional zur Kaufkraft noch geringere Lager haben. Bisher liegen für Entwicklungsländer keine Ergebnisse zu Metallagern vor.

Der Literatur ist ausserdem zu entnehmen, dass in Ländern mit bereits grossen Kupferlagern wie USA und Schweden das Wachstum gering ist, da der Bedarf an Gütern weitestgehend gedeckt ist. Anders ist dies in Regionen wie Cape Town, wo aufgrund des starken wirtschaftlichen Aufschwungs auch schnelles Lagerwachstum festzustellen ist.

Gebäudelager

Das Kupferlager in den Gebäuden der Schweiz beträgt ca. 80 kg/capita, davon 40 % im Dachbereich, 30 % in den Stromanlagen. Die verbleibenden 30 % verteilen sich auf die Sanitär- und die Heizungsanlagen, wobei Letztere dominieren. Ein Vergleich mit anderen Regionen verdeutlicht die Bedeutung der regionalen Untersuchung für das Lager (Abb. 4-13). Das Lager in den Gebäuden Stockholms ist mit ca. 60 kg/capita etwas kleiner als das der Schweiz. Das Lager in Cape Town beträgt mit 5.4 kg/capita jedoch nur 5 bis 10 % von dem in den entwickelten europäischen Regionen (davon fast $\frac{2}{3}$ in den Stromanlagen und $\frac{1}{3}$ in den Sanitäreanlagen). Der drastische Unterschied lässt sich in der Hauptsache durch folgende Aspekte erklären:

- Dachbereich: mangelnder Bedarf (Architektur)
- Strom, Telekommunikation, Sanitär: mangelndes Vermögen bei der Bevölkerungsgruppe mit sehr niedrigen Einkommen (in manchen Vororten dominierend) bedingen keine oder nur sehr geringe Installationen
- Heizungsanlage: mangelnder Bedarf (Klima)

Das Lager in den Gebäuden Stockholms verteilt sich wie folgt auf die Funktionsbereiche: ca. 6 kg/capita im Dachbereich, 23 kg/capita in den Stromanlagen, 30 kg/capita in den Sanitäreanlagen und 3 kg/capita in den Heizungsanlagen (Telekommunikationsanlagen wurden vernachlässigt). Der Unterschied zwischen den Kupferlagern in den Gebäuden der Schweiz und Schwedens liegt also weniger in der Grösse des gesamten Lagers als in der Verteilung auf die fünf Anwendungsbereiche. Deutliche Übereinstimmung zwischen den beiden Regionen herrscht bei der Stromanlage mit 20 bis 25 kg/capita. Im Gegensatz zu den anderen Anwendungsbereichen existiert hier quasi keine Materialsubstitution. Im Dachbereich lässt sich das grosse Kupferlager der Schweiz nicht auf die Kupferblechdächer (Bedachung) zurückführen, denn die in Kupfer eingedeckte Dachfläche ist in beiden Regionen ähnlich: 0.51 m²/capita in der Schweiz vs. 0.78 m²/capita in Stockholm¹³⁵ (HEDBRANT 2003; LANDNER und LINDESTRÖM 1998). Der Unterschied beruht auf den anderen Nutzungen des Kupfers, also vor allem bei der Dachentwässerung und den Dachgaupen, die in der Schweiz nahezu 80 % ausmachen. Im Dachbereich wird die ausserordentliche Vorliebe für Kupferbleche deutlich, die in der Dachentwässerung der Schweiz dominieren (mehr als in Stockholm, trotz zahlreicher Kupferdächer auf Stockholms Kirchen). Bei Sanitär- und Heizungsanlagen sind die starken Schwankungen innerhalb Europas auf die Vorlieben für Kupfer bzw. die Substituenten zurückzuführen. In der Schweiz werden Wasserrohre und Fittings nur zu ca. 10 % in Kupfer ausgeführt, hingegen löste es in

¹³⁴ Aufgrund seiner besonderen Eigenschaften und vielfältigen Einsatzfelder (vgl. Kap. 1.2) wird der Kupferverbrauch zuweilen als „Indikator des Lebensstandards und der technologischen Entwicklung eines Landes“ angesehen (ARPACI 2000).

¹³⁵ Da die geometrische Auflösung bei der photogrammetrischen Erfassung 0.4 m beträgt, sind lediglich die Bleche zur Bedachung erfasst (nicht die der Dachentwässerung).

Schweden bereits in den 50er-Jahren Eisen und Zink ab (BERGBÄCK *et al.* 2001). In den Sanitäranlagen übertrifft also die Kupfermenge in Schweden jene in der Schweiz aufgrund der stärkeren Kupferpräferenz bei Wasserrohren. Die Schweiz weist das grössere Lager in den Heizungsanlagen auf, welches hier grossteils in den Flächenheizungen liegt. Die Ursache dafür ist in der starken Dynamik des Flächenheizungsmarkts zu sehen (vgl. Kap. 3.5.1): Entweder sind Flächenheizungen in Schweden nicht im gleichen Masse verbreitet (Stand 2001), oder Kupfer spielte dort während der Phase starken Flächenheizungseinbaus eine untergeordnete Rolle.

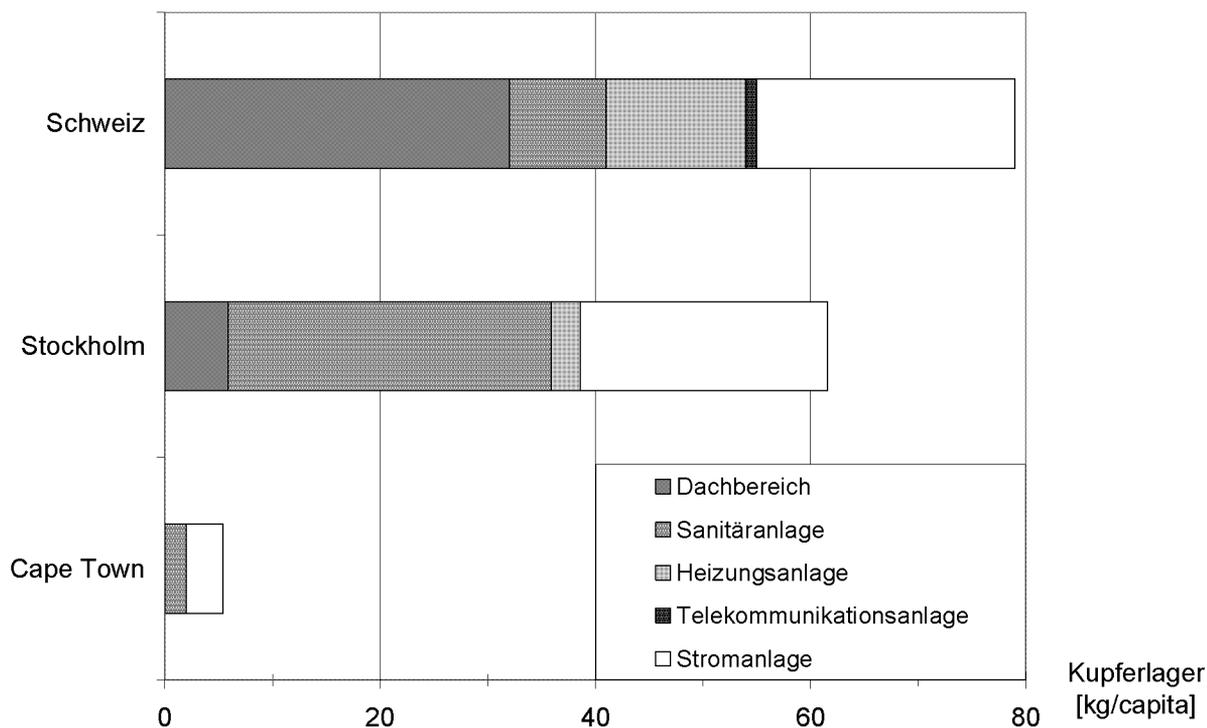


Abb. 4-13: Vergleich der Kupferlager in den Gebäuden der Schweiz (eigene Ergebnisse), von Stockholm (HEDBRANT 2003) und von Cape Town, Südafrika (VAN BEERS und GRAEDEL 2003). Nicht dargestellte Anwendungsbereiche wurden nicht berücksichtigt.

Die Wahl der sichtbaren Bauteile der Gebäude ist vom „Kulturkreis“ abhängig. In Mitteleuropa sind die Gebiete, in denen ein bestimmtes Bedachungsmaterial bevorzugt wird, zuweilen nicht grösser als wenige 1000 km². Es ist dabei die Skalenabhängigkeit zu beachten. Beispielsweise sind Blechdächer – meist Kupfer – bevorzugt in Innenstadtbereichen anzutreffen, in denen Gebäude mit alter Bau-substanz dominieren, zum Beispiel klassische Architektur, Jugendstilarchitektur oder mittelalterliche Gebäude (das sind in der Schweiz und auch in Stockholm nur einige Quadratkilometer Stadtfläche (EKSTRAND *et al.* 2001)). In Stockholm ist ein beträchtlicher Teil davon (schätzungsweise 25 bis 75 %¹³⁶) in Dächern grosser Gebäude gebunden (Dachfläche > 1000 m²). Der Anteil dieser Kupferdächer grosser Gebäude wird in der vorliegenden Arbeit nicht gesondert beachtet und daher systematisch unterschätzt, doch bezogen auf eine Region wie die Schweiz ist nur ein sehr geringer Fehlereinfluss zu erwarten (schätzungsweise < 5 %).

¹³⁶ Bei einer Annahme von 1500 m² für die Dachflächenklasse > 1000 m² sind dies ca. 35 %.

4.6 Evaluation von Abrieb- und Abschwemmpotentialen

Die Kenntnisse über das anthropogene Lager lassen sich zur langfristigen Evaluation von lagerabhängigen Schadstoffpotentialen einsetzen. Dadurch erhält man eine Diskussionsgrundlage für die Notwendigkeit von Emissionseinschränkungen, um künftige Belastungen der Umwelt zu minimieren (OBERNOSTERER *et al.* 2003). Ziel ist die Gestaltung eines umweltverträglichen Metalleinsatzes durch effektive Massnahmen (möglichst ohne Stoffverbote), wozu auch die ökologische Planung von Bauwerken gehört.

Kupfer wird in der Landwirtschaft sowohl als Bestandteil von Pflanzenschutzmitteln eingesetzt (Herbizide, Fungizide, Algizide, Molluskizide) als auch in mineralischem Dünger. Wenngleich das Kupfer in beiden Fällen durch Lösung gezielt am Wirkungsort aufgetragen wird, handelt es sich um einen bewusst in Kauf genommenen Kupfereintrag mit dissipativer Verteilung auf der landwirtschaftlichen Fläche, bei der der grösste Teil des Kupfers durch Komplexbildung im Boden zurückgehalten wird. Aufgrund dieser Verteilung über grosse Flächen sind die Lager der kumulierten diffusen Kupferemissionen nicht direkt berechenbar, sondern nur indirekt über die jährlichen Input-Kupferflüsse.

Weitere Emissionen stammen aus den Lagern der Nutzungsphase: Kupfer gelangt über Abrasion und Abschwemmung¹³⁷ auf direktem und indirektem Weg in die Umweltkompartimente (Boden und aquatische Systeme). Je nach Funktion und Exposition tragen die verschiedenen Nutzungen unterschiedlich zu den Emissionen bei:

- Abrasion von Fahrzeugbremsen und Fahrleitungen
- Abschwemmung infolge Korrosion bei Blechen im Dachbereich und an Fassaden, bei Wasserrohren, Freileitungen (Strom) und Fahrleitungen (Bahn)

Der Eintrag durch Abrasion erfolgt entlang der Transportwege. Der Abrieb, teilweise freigesetzt als metallisches Kupfer in Partikelform, wird im und neben dem Strassen- bzw. Gleiskörper (Schotter- und Bodenschichten) zwischengespeichert. Er ist abhängig von der jährlichen Fahrleistung von Kraftwagen und Bahn (nicht aber vom Bestand). Ebenso gelangen die Korrosionsemissionen der Fahrleitungen in den Gleiskörper bzw. in den darunterliegenden Boden. Insbesondere bei stark frequentierten Strecken ist die Korrosion gegenüber der Abrasion vernachlässigbar.

Kupfer bildet an der Atmosphäre in einem über Jahre andauernden Korrosionsprozess eine schützende Oxidationsschicht, die so genannte Patina. Während und nach diesem Vorgang werden Kupfer bzw. seine Korrosionsprodukte teilweise gelöst und freigesetzt. Im Allgemeinen hängt der Korrosionseintrag von der wasserbenetzten Oberfläche und den Milieubedingungen ab (pH-Wert, Strömungsgeschwindigkeit, Dauer der Benetzung), korreliert also mit der Bestandsgrösse (nicht mit den jährlichen Flüssen oder – im Verkehrsbereich – mit der Nutzungsintensität). Diese Faktoren der Milieubedingungen kontrollieren auch, in welchem Ausmass das Kupfer gelöst (als Ionen) oder partikulär freigesetzt wird. Im Unterschied zu Emissionen von Wasserrohren, die in der Kanalisation gesammelt werden, wird Dachabwasser entweder in den Boden versickert, in oberirdische Gewässer eingeleitet¹³⁸ oder der Kanalisation zugeführt. Die Abschwemmungsrate (engl. *run-off rate*) im Dachbereich hängt von der Dachneigung, der Dauer der Korrosion, vom Standort (Atmosphäre) und der Häufigkeit und Intensität der Niederschlagsereignisse ab, ist also neben der eigentlichen Ausführung am Gebäude komplex orts- und zeitabhängig (HE *et al.* 2001; FALLER 2001; LEUENBERGER-MINGER *et al.* 2002). Zusätzlich hängt die ökologische Relevanz des Eintrags von der

¹³⁷ Im Gegensatz zur Abschwemmung umfasst der Begriff „Abtrag“ zusätzlich jenen Anteil, der als Korrosionsprodukt auf der Metalloberfläche verbleibt (KBOB-IPB 2001).

¹³⁸ Nach Einleitung wird das Kupfer gelöst von den Bächen in die grösseren Flüsse transportiert. Ein Teil davon gelangt in die Gewässersedimente (Senke).

chemischen Form des Kupfers¹³⁹, den nachfolgenden diffusiven bzw. konzentrierenden Prozessen und schliesslich der Bioverfügbarkeit ab.

Die Summe aus landwirtschaftlichem Eintrag, Abrasion und Abschwemmung infolge Korrosion sowie festen Rückständen aus der Abwasser- und Abfallbehandlung entspricht dem gesamten Eintrag von Kupfer aus den diversen Anwendungen in die Umweltkompartimente. Eine Übersicht der Eintragsquellen ist mit Angabe der eintragsrelevanten Faktoren in Tab. 4-2 aufgelistet.

Tab. 4-2: Kupfereintragsquellen in die Umwelt und ihre eintragsrelevanten Faktoren. Bei den mit * gekennzeichneten Quellen bezieht sich der Einflussfaktor lediglich auf den Anteil aus Kupfer.

Eintragsquelle	eintragsrelevanter Einflussfaktor
Fahrzeugbrems scheiben	Fahrleistung
Fahrleitungen (Bahn, Tram und Trolley)	Fahrleistung
	Leitungsnetzlänge
Freileitungen*	Leitungsnetzlänge
Dachbleche*	Blechoberfläche
Mineraldünger, Herbizide etc.	bearbeitete Fläche und Nutzungsintensität
Klärschlamm	landwirtschaftliche Verwendung

In der Schweiz wurden die gesetzlichen Rahmenbedingungen so geändert, dass seit 2003 kein Klärschlamm mehr als Dünger im Futter- und Gemüsebau eingesetzt werden darf; ab spätestens 2008 ist der Einsatz als Dünger generell verboten (StoV 2002). Zuvor hatten bereits Marktmechanismen zu einem starken Rückgang bei der landwirtschaftlichen Verwendung geführt. Bei der Deponierung fester Rückstände aus der Abfallbehandlung ist unter den heute gültigen gesetzlichen Rahmenbedingungen kein Austrag in die Umweltkompartimente zu erwarten. Für die Einträge aus dem Gebäudebereich in die Umweltkompartimente spielt es eine entscheidende Rolle, wie das Regenwasser entsorgt wird: durch Versickerung, durch Einleitung in Gewässer oder in die Mischwasserkanalisation.

Materialwahl im Aussenbereich

Der Niederschlag auf Dächern wird in Dachrinnen gesammelt und in Regenfallrohren abgeleitet, um ihn anschliessend – je nach Regenwasseranlage – in der Nähe versickern zu lassen, in einen Vorfluter zu leiten oder mit dem Abwasser in eine Kläranlage zu führen. Wegen einer im Zuge der Versickerungszielsetzungen gewachsenen Sensibilisierung und des über die Jahre anwachsenden Kupferlagers im Aussenbereich werden daher auch die Möglichkeiten der Eintragsunterbindung in der Umweltdebatte zunehmend thematisiert (BOLLER 1998; BOLLER und STEINER 2001; OBERNOSTERER *et al.* 2003). Um das Belastungspotential hinsichtlich eines Boden-, Vorfluter- oder Grundwassereintrags bzw. eines Transfers über die Mischkanalisation einzudämmen, sind verschiedene Massnahmen zur Verringerung der Kupferemissionen vorgeschlagen worden (SINGEISEN und BOLLER 1997; LANGBEIN *et al.* 2005):

- Verzicht auf Dachinstallationen durch bauliche Massnahmen
- Substitution durch Alternativmaterialien
- Kupferretention durch Versickerungsanlagen mit Adsorbermodul¹⁴⁰

In der Richtlinie „Regenwasserentsorgung“ des Verbandes Schweizer Abwasser- und Gewässerschutzfachleute werden diese Möglichkeiten zur Verminderung der „Schadstoffquellen“ aufgegriffen (*source control*) und propagiert (VSA 2002). Da das Gewässerschutzgesetz (Art. 7.2) eine möglichst

¹³⁹ Der überwiegende Anteil des Kupferabtrags liegt in gelöster Form vor (ca. 70 bis 80 %)(VSA 2002).

¹⁴⁰ Technisch können die Kupferfrachten in speziellen Eisenhydroxid- Filterschichten gebunden werden (STEINER 2003; JANN 2002).

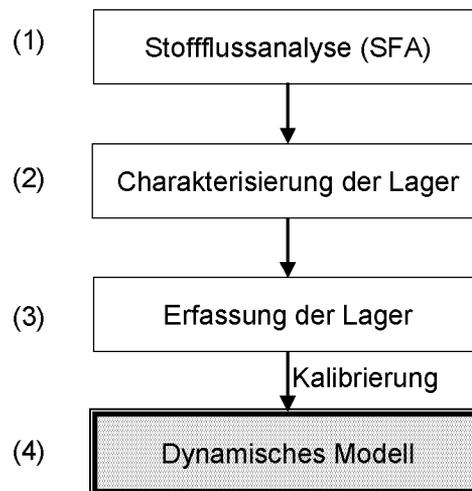
ortsnahe Niederschlagswasserversickerung vorschreibt (STADELMANN *et al.* 1995), doch dabei auch die Qualität des zu versickernden Regenwassers gegenüber der Vulnerabilität des Grundwassers zu beachten ist, klassiert die oben genannte Richtlinie Niederschlagswässer von Metalldächern als „belastet“¹⁴¹. Demzufolge sind teilweise Behandlungsmassnahmen notwendig: Eine Versickerung in den Untergrund ist für Dachflächen mit einer Kupferblechfläche grösser als 50 m² nur mit einem künstlichen Adsorber zulässig, ebenso eine Dirkteinleitung in Gewässer für Kupferblechflächen grösser als 500 m²¹⁴². Diese Adsorber sind mit zusätzlichen Kosten verbunden, beim Einbau sowie bei der späteren Entsorgung; da Adsorber erst seit kurzem und an wenigen Orten eingesetzt werden, liegen für Nutzungsdauer und Entsorgungskosten keine Angaben vor. Neben der direkten Funktion der Schadstoffverminderung könnte eine derartige Adsorbervorschrift auch indirekt den Einbau von Metalldächern eindämmen. Zum Beispiel toleriert die „Fachstelle Koordination der Bau- und Liegenschaftsorgane des Bundes“ die kleinflächigen Anwendungen wie Rinnen und Rohre, rät aber vom grossflächigen Kupfereinsatz ab (KBOB-IPB 2001). Rechtlich verbindlich sind zwar nur die kantonalen Gewässerschutzgesetze (inklusive Verordnungen, Richtlinien und Weisungen), doch möchte die oben genannte Richtlinie die kantonalen Richtlinien ergänzen und zusammenführen. In mehreren Kantonen ist bereits die grossflächige Nutzung von Kupfer an bestimmte Bedingungen geknüpft.

Neben den ökonomischen Aspekten gilt es somit, die ökologischen Aspekte bei der Materialwahl der Bleche (Bedachung, Aufbauten und Dachentwässerung) sowie anderer Korrosionsflächen zu berücksichtigen (LANGBEIN *et al.* 2005).

¹⁴¹ Das Belastungspotential von Kupfer wird gegenüber landwirtschaftlichen Böden, Fliessgewässern und Böden von Muldenablagen von der KBOB als „stark“ eingestuft; die anderen Metallbleche werden mit Ausnahme von Blei besser beurteilt.

¹⁴² Die Zulässigkeit ist nicht nur für Dächer mit erhöhtem Anteil an Kupferinstallationen eingeschränkt, sondern auch für Zink-, Zinn-, Chrom-, Nickel- oder Blei (Kriterium: $A_{\text{Metall}} = 50 \text{ m}^2/\text{Anlage}$).

5 Dynamisches Modell *Cuprum*



Die Resultate der Charakterisierung und Erfassung der Lager und des quasistationären Systems dienen der Kalibrierung des dynamischen Modells.

5.1 Einleitung

Das Modell *Cuprum* nutzt die Kenntnisse über den *Status quo* (Jahr 2000) und die Entwicklung im 20. Jahrhundert aus Kap. 2 bis 4 als Systemeigenschaften zur dynamischen Modellierung des Kupferhaushalts der Schweiz. Dynamische Modelle haben die Eigenschaft, dass die Variablen (Flüsse und Lager) nichttrivial zeitabhängig sind. Damit können allgemein die Veränderungen eines Systems beschrieben und mögliche resultierende Stoffflüsse ermittelt werden. Ziele des dynamischen Modells *Cuprum* sind,

- den Kupferhaushalt im 20. Jahrhundert mit seinen Veränderungen zu beschreiben und die entscheidenden Einflussfaktoren zu ermitteln (Systemverständnis)
- mit Hilfe von Szenarien zu untersuchen, wie sich die Kupferlager und -flüsse mittelfristig (mehrere Dekaden) entwickeln können und welcher Handlungsbedarf daraus resultiert
- als Früherkennungsinstrument künftige Entwicklungen von Neukupfer- und Altkupferflüssen sowie „Kupferverknappungen“ und „Kupferüberschüsse“ für unterschiedliche Szenarien zu simulieren.

Modellszenarien können einen Diskussionsbeitrag zur Frage liefern, wie der Kupferhaushalt in einer nachhaltigen Regionalentwicklung aussehen könnte. Dazu muss die langfristige Entwicklung des Kupferhaushaltes verstanden werden. Das Modell erlaubt damit aber noch keine oder nur sehr eingeschränkt Prognosen einer künftigen Kupferbewirtschaftung.

Das mathematische Modell wird mittels Algorithmen durch EDV-Einsatz numerisch gelöst. Hierfür wird die Simulations-Software SIMBOX genutzt.

Software

Die Systemgleichungen des Modells *Cuprum* wurden von H.-P. Bader und R. Scheidegger in der Programmiersprache Rocky-Mountain-Basic (RMB) programmiert. Zur Implementierung von RMB wurde die Programmierumgebung HTBasic 9.1 (Windows-Version) von TransEra eingesetzt. Die Systemgleichungen werden als Subroutinen-Bibliothek der Stoffhaushaltssimulation-Computersoftware SIMBOX geladen und numerisch gelöst. Dafür wird das Iterationsverfahren nach Newton-Raphson mit automatischer Konvergenzkontrolle bei einer Fehlertoleranz von 10^{-10} genutzt. Als zeitliche Auflösung wurde 1 Jahr gewählt. Die Modellrechnungen wurden auf einem Personalcomputer mit einem Pentium-IV-Prozessor (2400 MHz) unter dem Betriebssystem Microsoft Windows XP (2002) durchgeführt und benötigten pro Modelldurchlauf mehrere Stunden.

SIMBOX ist ein Computerprogramm, mit welchem man Stoffhaushaltssysteme quasistationär und dynamisch mit einem strengen mathematischen Formalismus (nach BACCINI und BADER (1996)) beschreiben und ihr Verhalten bei unterschiedlichen Rahmenbedingungen simulieren kann (BADER, H.-P. und SCHEIDEGGER 1996; BADER, H.-P. und BACCINI 1996). Die Anwendung von SIMBOX setzt die Beherrschung der Methode der Stoffflussanalyse voraus.

5.2 Mathematische Beschreibung

Das Kupferhaushaltssystem ist beschrieben durch:

- die Systemkonfiguration (Kap. 5.2.1)
- die Systemvariablen (Kap. 5.2.2)
- die Systemgleichungen (Kap. 5.2.3)
 - allgemeingültige Gleichungen (intrinsische und Bilanzgleichungen)
 - modellspezifische Gleichungen und Parameter (Modellansatz)

Die vorangegangenen Kapitel fundieren ein Systemverständnis des Kupferhaushalts, mit Hilfe dessen die Systemgleichungen für das Modell *Cuprum* aufgestellt werden. Die Resultate aus Kap. 4 dienen der Bestimmung von Systemparametern. Als Bezugsgrösse der Variablen und Parameter des Systems werden durchgehend Materialmengen *per capita* gewählt.

5.2.1 Konfiguration des Systems

In Abb. 5-2 ist das Kupferhaushaltssystem dargestellt, das für die mathematische Modellierung genutzt wird. Dazu wurde das System aus Kap. 2.2.2 erweitert. Die bedeutendste Erweiterung gegenüber der vorgenannten Version ist die Trennung von „Handel und Produktion“ in drei verschiedene Prozesse: (a) Handel von Gütern, (b) Handel von Halbzeug plus Schrott, (c) Produktion. Halbzeug und Rohstoffe (I5) sowie der Kupferschrott (I7) werden im Prozess „Produktion“ (6) bearbeitet, bevor die Produkte zur Nutzung in die drei Prozesse „Mobilien“, „Infrastruktur“ und „Gebäude“ gelangen oder als Güter exportiert werden (O1). Dabei anfallende Produktionsschrotte (O2) und zwischengehandelte Schrotte (O7) werden exportiert. Neben diesen Rohstoffflüssen wird auch in Waren enthaltenes Kupfer importiert. Dies sind die Importe der Fahrzeuge (I1), der Elektrowaren (Mobilien, ohne Kabel und Drähte) (I2), der sonstigen Mobilien (I3), der Waren in die Immobilien (Kabel, Drähte, Rohre) (I4) sowie der Pflanzenschutzmittel (I8). Die importierten Waren gelangen teils in die Nutzung in der Schweiz und teils ohne oder mit nur geringer Weiterverarbeitung in den Re-Export¹⁴³.

Da die Bleche und Bänder beim Einbau in den Gebäuden durch die Spengler weiterverarbeitet werden, werden sie als Halbzeug (I5) über die „Produktion“ (6) in die „Gebäude“ (I1) geführt. Damit verbleiben im Import der Waren in die Immobilien (I4) die Kupferrohre und Zubehör (Fittings, Roharmaturen) sowie Stromkabel und Drähte.

Die Trennung der Warenflüsse, die zur Nutzung in die Prozesse „Mobilien“, „Infrastruktur“ und „Gebäude“ gehen, und der Exportflüsse, die das Land vor der Nutzung verlassen, wird durch die Triageprozesse „Elektrohandel“ (2), „Mobilienhandel“ (3), „Immobilienhandels“ (4) und „Handel Halbzeug und Rohstoff“ (5) berücksichtigt, aus denen die Direktexport-Flüsse ‚Elektro-‘ (O3), ‚Mobilien(Rest)-‘ (O4), ‚Immobilienhandels-‘ (O5) und ‚Schrott-Direktexport‘ (O7) die Schweiz verlassen. Der Warenimport der ‚Fahrzeuge‘ (I1) gelangt direkt in den Zielprozess „Mobilien“ (9), gleiches gilt für den Eintrag der ‚Pflanzenschutzmittel‘ (I8) in die „Umweltkompartimente“ (8). Im Gegensatz zum Kupferhaushaltssystem in Kap. 2.2.2 werden ausgediente Güter des Mobilienlagers zur Verwertung direkt in die „Produktion“ (6) oder die Deponie (1) geführt, da sich die Schrotte und deren Behandlung von jenen aus den Immobilien unterscheiden. Die weiteren Prozesse und Flüsse stimmen mit der Beschreibung des zuvor genannten Systems überein. Der Umfang der Lager und ihre verschiedenen Güter sind ausführlich in Kap. 2.2.3 erläutert.

¹⁴³ Unter „Re-Export“ werden die zwischengehandelten Direktexport-Flüsse an Elektrowaren (O3), Mobilien (Rest) (O4), Immobilienhandels (O5) sowie Kupferschrotten (O7) zusammengefasst.

Wo erforderlich, werden Prozesse des dynamischen Modells zur Berechnung durch Unterteilung in so genannte Subprozesse erweitert, da die Lager im gewählten Modellansatz von zentraler Bedeutung sind. Aufgrund der unterschiedlichen Emissionseigenschaften von Kupfer in den Gebäude-Funktionsbereichen wird der Prozess „Gebäude“ zusätzlich in die Subprozesse „Dach“ und „Haustechnik“ unterteilt (Abb. 5-1).

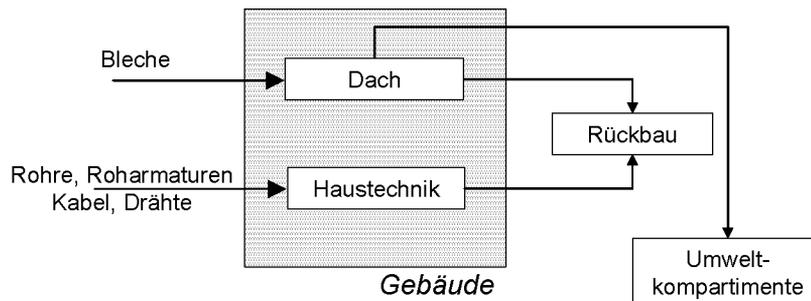


Abb. 5-1: Unterteilung des Prozesses „Gebäude“ in zwei Subprozesse zur Berechnung.

Eine zweite Erweiterung betrifft die separate Betrachtung der Fahrzeuge als Subprozess des Prozesses „Mobilien“, da diese über die Verkehrsstatistik genauer als die anderen Mobilien dokumentiert sind (BFS 1994). Insgesamt werden also sechs Lager betrachtet: „Mobilien“ (gesamt), „Fahrzeuge“, „Infrastruktur“, „Gebäude“, „Dach“, „Haustechnik“.

5.2.2 Systemvariablen

Die Variablen des Kupferhaushaltssystems sind die in Abb. 5-2 abgebildeten Kupferflüsse $A_{i-j}(t)$, $I_i(t)$, $O_i(t)$ [kg/(capita · a)] und die Kupferlager der Prozesse $M_i(t)$ [kg/capita]. Die Indizes der Inputflüsse (I), systeminternen Flüsse (A) und Outputflüsse (O) geben die Nummernbezeichnung der Herkunfts- bzw. Zielprozesse der Kupferflüsse an. Der Satz unabhängiger Variablen des Systems ist folgender:

Typ	Variable	Anzahl	
Lager (Prozesse)	$M_1(t)$, $M_2(t)$, $M_3(t)$, $M_4(t)$, $M_5(t)$, $M_6(t)$, $M_7(t)$, $M_8(t)$, $M_9(t)$, $M_{10}(t)$, $M_{11}(t)$	$N_M = 11$	
Flüsse	innere Flüsse	$A_{2-9}(t)$, $A_{3-9}(t)$, $A_{4-10}(t)$, $A_{4-11}(t)$, $A_{5-6}(t)$, $A_{5-9}(t)$, $A_{5-10}(t)$, $A_{5-11}(t)$, $A_{6-1}(t)$, $A_{6-9}(t)$, $A_{6-10}(t)$, $A_{6-11}(t)$, $A_{7-1}(t)$, $A_{7-6}(t)$, $A_{9-1}(t)$, $A_{9-6}(t)$, $A_{9-8}(t)$, $A_{10-7}(t)$, $A_{10-8}(t)$, $A_{11-7}(t)$, $A_{11-8}(t)$	$N_{IF} = 21$
	Inputs	$I_1(t)$, $I_2(t)$, $I_3(t)$, $I_4(t)$, $I_5(t)$, $I_6(t)$, $I_7(t)$, $I_8(t)$	$N_{Ip} = 8$
	Outputs	$O_1(t)$, $O_2(t)$, $O_3(t)$, $O_4(t)$, $O_5(t)$, $O_6(t)$, $O_7(t)$	$N_{Op} = 7$

Mit diesem Satz von 47 **Systemvariablen** ist der Systemzustand zu jeder Zeit t im Beobachtungszeitraum eindeutig bestimmbar (die Bedeutung der Variablen ist in Kap. A.4.2 im Anhang tabellarisch beschrieben). Die Lageränderungsraten $\dot{M}_i(t)$ folgen direkt aus den Variablen der Lager $M_i(t)$ durch Differenzierung nach der Zeit. Neben diesen Variablen werden zusätzlich 9 **Variablen zu den Subprozessen** eingeführt, die zur Systemerweiterung benötigt werden (vgl. Kap. 5.2.1).

5.2.3 Systemgleichungen

Das System wird durch einen Satz von 56 voneinander unabhängigen Systemgleichungen vollständig beschrieben. Dazu werden zwei Typen von Gleichungen verwendet:

- Bilanzgleichungen/intrinsische Beziehungen (sind voneinander abhängig)
 - 11 allgemeingültige Gleichungen
- Modellgleichungen gemäss dem Modellansatz (Kap. 5.2.3.1)
 - 45 modellspezifische Gleichungen

Die **Bilanzgleichungen** formulieren den Masseerhalt über die Bilanzvolumina (Prozesse Pr_1, \dots, Pr_{11}) und bestimmen damit die Raten \dot{M}_i als Funktion der Flüsse A_{r-s} . Die Summe von Input, Output und Lageränderung sind gleich null.

Gl. 27

$$Pr_i \quad \dot{M}_i(t) = \frac{dM_i(t)}{dt} \equiv \sum_{r=1}^{N+N_{ip}} A_{r-i} - \sum_{s=1}^{N+N_{op}} A_{i-s} \quad \forall i \in \{1, \dots, 11\}$$

Daneben beschreiben **intrinsische Beziehungen** die Abhängigkeiten zwischen den Lagern $M_i(t)$ und ihren Änderungsraten $\dot{M}_i(t)$. Sie haben für die 11 Prozesse Pr_1, \dots, Pr_{11} folgende Form:

Gl. 28

$$Pr_i \quad M_i(t) - M_i(t_0) = \int_{t_0}^t \dot{M}_i(t') dt' \equiv 0 \quad \forall i \in \{1, \dots, 11\}$$

Die insgesamt 22 Bilanzgleichungen und intrinsischen Beziehungen sind in Kap. A.4.4 im Anhang einzeln aufgeführt.

5.2.3.1 Modellansatz

Für die vollständige Bestimmung des Modells *Cuprum* bzw. seiner Variablen sind weitere 45 unabhängige Systemgleichungen zu formulieren (56 Variablen – 11 allgemeingültige Gleichungen), die die inneren Eigenschaften des Systems beschreiben. Diese modellspezifischen Gleichungen bilden den **Modellansatz**. Die **Modellgleichungen** beschreiben die Abhängigkeiten der **Systemvariablen** voneinander und/oder von den **Modellparametern**, die den Zustand des Modells festlegen (Kap. A.4.4 im Anhang). Im dynamischen Fall sind dies Parameterfunktionen $Pf_i(t)$. Insgesamt werden 45 voneinander unabhängige Parameterfunktionen zur Beschreibung des Modells genutzt. Sie können als Hilfsgrössen unterschiedliche Bedeutung haben:

Parameterfunktionen

• Lagerentwicklung	(6)	$M(t)$	[kg/capita]
• Transferfunktion:	(6+6)	$k_M(t, t', \tau, \sigma)$	[% pro Zeit]**
– mittlere Lebensdauer		$\tau(t)$	[a]
– Streuung der Lebensdauer		$\sigma(t)$	[a]
• Transferkoeffizient	(6+2)	$k_{i,j}(t)$	[%]**
• Fluss	(8)	$O(t), I(t)$	[kg/(capita · a)]
• Abriebkoeffizient	(3)	$a_M(t)$	[%]**
• Output-Anteil	(1)	$o_{i,j}(t)$	[%]**
• Input-Anteil	(7)	$i_{h,i}(t)$	[%]**

* Plus zwei Koeffizienten, deren Transfers sich auf einen Teilinput beziehen.

** Tatsächlich werden diese nicht in Prozent notiert; hier soll nur die Einheit der Parametertypen verdeutlicht werden.

Eine vollständige Übersicht der Systemparameter ist in Tab. A-38 im Anhang zu finden. Für den gewählten Modellansatz sind die Parameterfunktionen zu jeder Zeit t gegeben. Sie werden für den Zeitraum 1900 bis 2000 entsprechend dem Kenntnisstand gewählt, das bedeutet konstant gehalten oder im Intervall von 10 Jahren variiert (siehe Kap. A.4.3 im Anhang). Die Entwicklung der Hauptlager wird durch parametrisierte nichtlineare Wachstumsfunktionen beschrieben (siehe Kalibrierung, Kap. 5.3.1). Für das „Standardszenario“, das *business as usual*, werden dabei die meisten Parameterfunktionen für das 21. Jahrhundert konstant gehalten (auf dem Stand von 2000).

Das Modell *Cuprum* umfasst also 56 Variablen (Systemvariablen, Variablen der Subprozesse), die durch die 11 Bilanzgleichungen und 45 Modellgleichungen miteinander und mit den Parameterfunktionen in Beziehung stehen. In der Kalibrierung werden 45 Parameterfunktionen, bestehend aus 70 Einzelparametern, bestimmt (Tab. A-39 im Anhang).

Bedarfsgesteuerte Lagerentwicklung

Die Kernidee des gewählten Modellansatzes ist eine bedarfsgesteuerte Lagerentwicklung. Zwar ist der Bedarf an Kupfer kein Grundbedürfnis wie z.B. der Bedarf an Wasser. Doch aufgrund seiner Eigenschaften kann Kupfer zur Befriedigung von Bedürfnissen in verschiedenen Anwendungen Funktionen erfüllen (Kap. 1.2). Dieser Bedarf an gewissen Produkthäufigkeiten oder Installationsdichten hat ein bestimmtes Materiallager zur Erfüllung der Funktionen der *Mobilien*, der *Infrastruktur* und der *Gebäude* zur Folge. Entscheidend ist dabei, ob der Bedarf wirklich gedeckt und ob dazu Kupfer gewählt wird. Dies hängt von einer Vielzahl von Entscheidungen – letztlich auf Basis von Kosten-Nutzen-Abschätzungen – ab. Es ist allerdings anzunehmen, dass der Einsatz eines Materials wie Kupfer, das gezielt zur Erfüllung von Funktionen gewählt wird, in den reichen Industrieländern durch die relativen und absoluten Marktpreisschwankungen nie unterbunden, sondern allenfalls gedämpft wird. Auch ist Kupfer stets auf dem Weltmarkt verfügbar gewesen. Die Entwicklung der Hauptlager erklärt sich also primär durch den Nutzungsbedarf – von sich selbst heraus, „intrinsisch“ – und wirkt sich massgeblich auf den Kupferhaushalt aus, quasi als „Motor des Systems“:

- wachsender Bedarf erfordert einen Nettoinput in die Lager
- sinkender Bedarf erlaubt einen Nettooutput aus den Lagern

Die Nettoinputs und -outputs der Hauptlager sind also in diesem Sinn „extrinsische“ Grössen, die direkt durch die Entwicklung der Hauptlager induziert werden. So sind die kumulativen Lager „Deponie“ und „Umweltkompartimente“ grösstenteils eine Folge des Einsatzes in den Hauptlagern. Die mittlere Lebensdauer der Güter in den Hauptlagern beeinflusst den Kupferumsatz massgeblich: Je kleiner die Lebensdauer ist, desto mehr Umsatz (also grössere Flüsse) benötigt das System zur Deckung des Bedarfs. Da die Hauptlager also das Systemverhalten treffend beschreiben und unabhängig von den anderen Variablen sind, eignen sie sich als Leitvariablen. Gütermengen, die nicht

in der Schweiz genutzt werden, sind unabhängig von den Hauptlagern. Die übrigen Flüsse sind teilweise indirekt beeinflusst durch die Hauptlager.

Asymptotische Sättigung und logistisches Wachstum

Bei anthropogenen physischen Wachstumsprozessen (in Industrieunternehmen, Volkswirtschaften usw.) treten über grössere Zeithorizonte Sättigungserscheinungen wie bei Lebewesen auf (PESTEL 1988). So wie einzelne Produkte ausgehend von einem tiefen Ausgangsniveau nach erfolgreicher Markteinführung eine starke Wachstumsphase erleben, bis der Konsum gesättigt ist und das Wachstum auf einem hohen Zielniveau abflacht (z.B. bei Widerstandsheizungen (REAL 1998)), so gilt dies auch durch Superposition für ganze Produktionsbranchen. Die Wachstumskurve nähert sich dabei *asymptotisch* dem Grenzwert der Konsumsättigung. Dieser Sättigungsprozess ist für die Immobilien bereits festzustellen (BACCINI *et al.* 2003), doch wird er vermutlich auch sukzessive die Mobilien bestimmen, da dort eine Vielzahl der Produktinnovationen veraltete obsoletere Produkttypen ersetzen.

Die genannten Wachstumskurven der Lager folgen im Allgemeinen über der Zeit einer sigmoidalen Kurve. Diese Kurven werden häufig mathematisch durch logistische Funktionen beschrieben (FISCHER und PRY 1970)(Abb. 5-3)¹⁴⁴, erstmals bei P.-F. Verhulst (1837). Ein logistisches Wachstum wird für die sechs untersuchten Lager – pro Kopf – postuliert¹⁴⁵ (die Grundform wird später den Eigenheiten der je drei Hauptlager und Lager der Subprozesse angepasst). Da die Hauptlager nicht direkt miteinander konkurrieren, ist ein logistischer Verlauf pro Hauptlager bzw. Subprozess gerechtfertigt und nicht für das Gesamtlager.

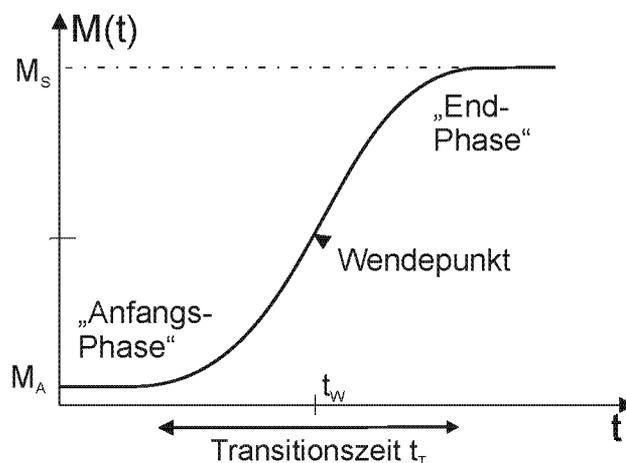


Abb. 5-3: Schematischer Kurvenverlauf der Grundform einer logistischen Lagerentwicklung $M = M(t)$ in Abhängigkeit der Zeit t . Eingetragen sind der Wendepunkt t_w der Funktion und die Transitionszeit t_T der Sättigung, innerhalb der sich die Funktion vom Anfangswert M_A zum Sättigungswert M_S entwickelt. Erweitert nach (PESTEL 1988).

Charakteristisch für eine logistische Wachstumskurve ist ein punktsymmetrischer, streng monoton steigender Funktionsverlauf mit Symmetriezentrum im Wendepunkt (t_w). Das Lagerwachstum $\dot{M}(t)$ nimmt in der Anfangsphase – ähnlich einer exponentiellen Kurve – mit der Zeit t zu (beschleunigtes Wachstum), bis es im Wendepunkt sein Maximum erreicht und anschliessend abnimmt (gebremstes Wachstum).

¹⁴⁴ Die Beschreibung durch logistische Funktionen ist durch Untersuchung industrieller und nicht-industrieller Wachstumsprozesse gestützt (PETERKA 1977).

¹⁴⁵ Es ist zu beachten, dass in diesem Modellansatz logistische Funktionen die Entwicklung der Pro-Kopf-Lager [kg/capita] beschreiben (und nicht die Entwicklung der absoluten Hauptlagermengen [kg]). Aufgrund des direkten und indirekten physischen Bedarfs der Menschen in der Region sind die absoluten Hauptlagermengen proportional zur Anzahl der Menschen (MEADOWS, D.L. 2005), so dass sie durch die Bevölkerungsentwicklung überlagert sind.

Mathematische Beschreibung logistischer Wachstumskurven

Die Form der Wachstumskurve hängt von der Geschwindigkeit der „Technisierung“ bzw. der Transitionszeit ab. Mathematisch lässt sich die logistische Funktion aus Abb. 5-3 durch die vier Parameter *Anfangs- und Sättigungswert* (M_A, M_S), die maximale *Wachstumsrate* (α) und den *Wendepunkt* (t_W) eindeutig ausdrücken (siehe Box *Logistisches Wachstum*, S. 127). Die Wachstumsrate (α) ist proportional zur Steigung im Wendepunkt $\dot{M}(t_W)$; eine kleinere Wachstumsrate bedingt also eine grössere Transitionszeit t_T des Lagers (siehe Veranschaulichung in Abb. 5-4). Industrielle Wachstumsprozesse weisen häufig Wachstumsraten von bis zu $\alpha = 0.1$ oder mehr auf (REAL 1998).

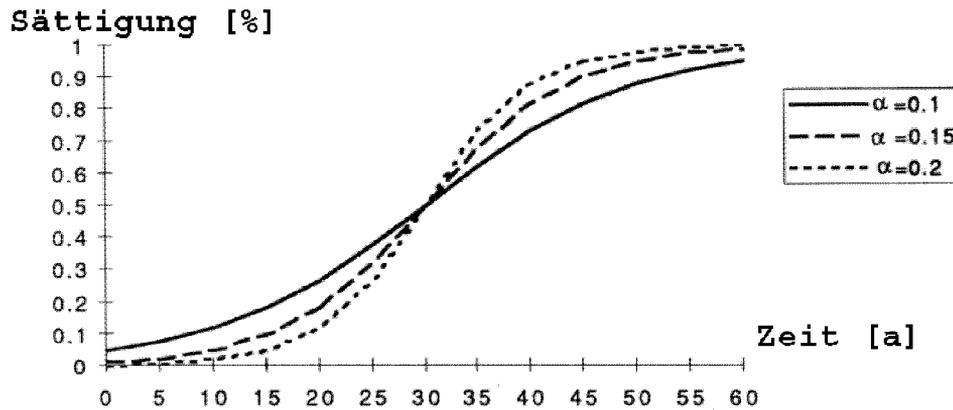


Abb. 5-4: Typische sigmoide Wachstumskurven für drei unterschiedliche Wachstumsraten $\alpha = 0.1, 0.15$ und 0.2 p.a. und $t_0 = 30$ a. Nach REAL (1998).

Box Logistische Funktion		
$M(t) = M_A + \frac{\Delta M}{1 + e^{-\alpha \cdot (t-t_0)}} = p_2 + \frac{p_1 - p_2}{1 + e^{-p_3 \cdot (t-p_4)}}$		
$p_2 = M_A = M_{-\infty}$	Anfangswert [kg/capita]	bei $t \rightarrow -\infty$
$p_1 = M_S = M_{+\infty}$	Sättigungswert [kg/capita]	bei $t \rightarrow +\infty$
$\Leftrightarrow \Delta M \equiv M_S - M_A$	Anstiegswert [kg/capita]	
$p_3 = \alpha$	Wachstumsrate α (α -Wert) [%/a]	
$p_4 = \tau = t_W$	Wendepunkt [Jahr]	

Die Wachstumskurve beschreibt die Entwicklung des Bestandes, nicht aber die Inputs und Outputs des Lagers. Der Output ist abhängig von den vorangegangenen Inputs (Altersverteilung) und der Lebensdauer; der Input seinerseits ist abhängig von der aktuellen Lageränderung und dem Output. Tatsächlich sind die Aufenthaltszeiten der Produkte in einem Hauptlager nicht für alle Individuen (hier: Produkte) gleich, sondern über einen Bereich verteilt. Statt eines *Transferkoeffizienten* $k(t)$, der sich auf den aktuellen Input bezieht, ist also eine *Transferfunktion* $k(t,t')$ erforderlich, die die Verzögerung des Transfers vom Input in den Output berücksichtigt. Diese Verzögerung wird für das Lager M durch folgenden Gleichungstyp beschrieben (BACCINI und BADER 1996):

Gl. 29

$$\sum_i A_{M-i}(t) = \int_0^t k_M(t,t') \sum_j A_{j-M}(t') dt'$$

t	Zeitpunkt des Lageroutputs
t'	Zeitpunkt des Lagerinputs

Die Transferfunktion $k_M(t, t')$ gibt also den Output zum Zeitpunkt t in Abhängigkeit des Lagerinputs vorangegangener Zeiten $t' \leq t$ ¹⁴⁶ an. Für alle Hauptlager inklusive der Lager der Subprozesse wird eine über das Alter normalverteilte Lebensdauer angenommen. Die Transferfunktion eines Prozesses M wird somit durch folgende Gaussfunktion bestimmt (BACCINI und BADER 1996):

Gl. 30

$$k_M(t, t') = \frac{1}{N_M(t')} \cdot e^{-\frac{(t-t'-\tau_M)^2}{2\sigma_M^2}} \quad \text{mit } N_M(t') = \int_0^{\infty} e^{-\frac{(t-t_M(t'))^2}{2(\sigma_M(t'))^2}} dt'$$

- $\tau(t')$ mittlere Lebensdauer (Verweilzeit) der Inputgüter zum Zeitpunkt t'
 $\sigma(t')$ Streuung (Standardabweichung) der Lebensdauer der Inputgüter zum Zeitpunkt t'
 $N_M(t')$ Normierungsfaktor

Eine graphische Darstellung der Transferfunktion ist in Abb. 5-5 gegeben. Im Modell *Cuprum* sind die Transferfunktionen über den Betrachtungszeitraum konstant angesetzt.

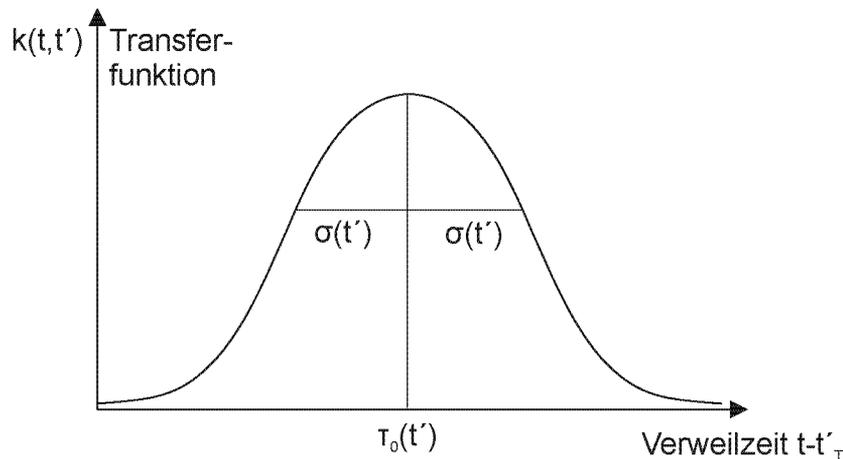


Abb. 5-5: Gaussfunktion als Transferfunktion $k(t, t')$. Der normalverteilte Kurvenverlauf beschreibt ein Outputmaximum nach der Verweilzeit τ_0 (Abszisse). Die Breite σ charakterisiert die Kurvenform (Standardabweichung). Nach BACCINI und BADER (1996).

Wahl der Wachstumskurven im Modellansatz

Die Datenreihen für die Lager werden durch bekannte Wachstumskurven gefittet (vgl. Abb. 3-26 bis Abb. 3-30). Die Parameter haben bei den Parameterfunktionen – im Gegensatz zu *spline*-Kurven¹⁴⁷ – eine anschauliche Bedeutung, wie zum Beispiel die Wachstumsrate und der Wendepunkt (vgl. *Box Logistische Funktion* auf S. 127). Zur Erlangung einer ausreichenden Übereinstimmung der Wachstumskurven mit den Ergebnissen zu den aktuellen Lagern und deren Entwicklung im 20. Jahrhundert aus Kap. 2 bis Kap. 4 werden logistische Funktionen mit einer zweiten Funktion gekoppelt. Man erhält folgende zwei Funktionsklassen:

¹⁴⁶ Mathematisch handelt es sich bei der Transferfunktion um eine Funktion in der Zeit, die aufgrund der Lebensdauerverteilung $f = f(\tau, \sigma)$ den Produkten in Abhängigkeit ihres Alters $t - t'$ („Altersklasse“) einen Transferfaktor zuordnet. Durch Integration über die infinitesimalen Outputs der vorhandenen Altersklassen ist der Lageroutput bestimmt.

¹⁴⁷ Üblicherweise werden Spline-Kurven zum Anpassen an die Messwerte verwendet. *Splines* sind „Freiform-Kurven“, die eine Folge von Kontrollpunkten (hier: Messwerte) mit einer glatten, gleichmässigen Kurve verbindet. Durch das Verändern eines Kontrollpunktes verändert sich die *spline*-Kurve, da Ausreisser nicht vernachlässigt werden. Nach MCGRAW-HILL (2005).

- a) *linearlogistische* Funktionen, bei der dem logistischen Verlauf ein lineares Wachstum vorangeht, das bis ins 20. Jahrhundert dauert
- b) *doppeltlogistische* Funktionen, die durch Übereinanderlagerung zweier logistischer Funktionen entstehen.

Für die Lager „Mobilien“, „Fahrzeuge“; „Gebäude“, „Dach“ und „Haustechnik“ wird jeweils ein linearlogistischer Verlauf zugrunde gelegt. Die zweistufige Entwicklung der Infrastruktur wird durch einen doppeltlogistischen Verlauf angenähert (BADER, H.-P. *et al.* 2005)(Abb. 5-6).

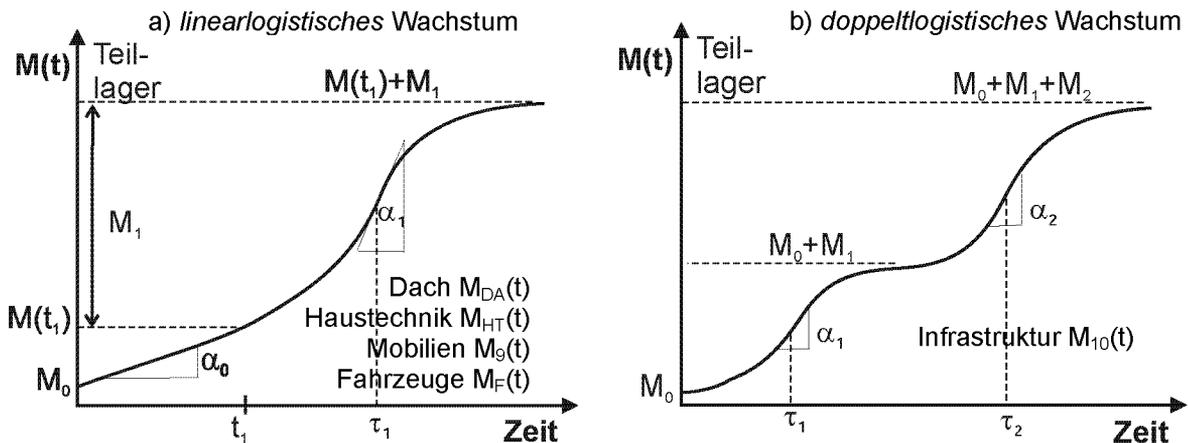


Abb. 5-6: Schematischer zeitlicher Kurvenverlauf einer linearlogistischen Kurve (links) und einer doppeltlogistischen Kurve (rechts), jeweils mit Angabe der Lager $M(t)$, auf die der Funktionstyp angewendet wird. Die eingezeichneten Kurvenparameter entsprechen denen in den erklärenden Boxen (siehe unten). Bemerkung: α_1 und α_2 sind nicht gleich der Steigung, sondern proportional zu ihr.

Zentrale vorgegebene Parameter der logistischen Wachstumsfunktionen der Hauptlager und Lager der Subprozesse sind folgende:

- Anfangswert $M(t = 1900)$: der Anfangszustand
- Sättigungswert $M(t = 2100)$: das realisierbare Potential

Mit den je nach Kurvenform verbliebenen, zeitunabhängigen Parametern wird jede der sechs Wachstumskurven gefittet (Wachstumsrate α , Wendepunktzeit t_w ; siehe Boxen unten), womit sie parametrisiert beschrieben sind (siehe Kalibrierung, Kap. 5.3.1). Die Untersuchung der Hauptlager in den vorangegangenen Kap. 2 bis Kap. 4 erlaubt eine Einordnung, wo auf der Wachstumskurve wir uns im Jahr 2000 befinden.

linearlogistisches Wachstum
Anwendung: Dach, Haustechnik
Mobilien, Fahrzeuge

$$M_1(t) = \begin{cases} M_0 + \alpha_0 \cdot (t - t_0) & | \forall t \leq t_1 \\ M(t_1) + \frac{M_1}{1 + e^{-\alpha_1 \cdot (t - \tau_1)}} & | \forall t \geq t_1 \end{cases}$$

mit $M_0 = M_{-\infty}$
 $M(t_1) + M_1 = M_{+\infty}$
 $t_0 = 1900$

doppeltlogistisches Wachstum
Anwendung: Infrastruktur

$$M_j(t) = M_0 + \frac{M_1}{1 + e^{-\alpha_1 \cdot (t - \tau_1)}} + \frac{M_2}{1 + e^{-\alpha_2 \cdot (t - \tau_2)}}$$

mit $M_0 = M_{-\infty}$
 $M_0 + M_1 + M_2 = M_{+\infty}$

5.2.3.2 Modellannahmen

Die Modellannahmen sind ausführlich in den modellspezifischen Gleichungen mathematisch formuliert (Kap. A.4.4 im Anhang). Die grundlegenden Annahmen für das dynamische Modell lassen sich zu folgenden Punkten zusammenfassen:

- die Lagerdynamik wird durch den Lageraufbau und die normalverteilten Lebensdauern charakterisiert
- der Abrieb aus den Hauptlagern ist proportional zum Kupferlager und wird durch einen Proportionalitätsfaktor berechnet (Abriebkoeffizient)
- die Kupferlager der Prozesse des Importhandels $M_2(t)$, $M_3(t)$, $M_4(t)$ und $M_5(t)$, der „Produktion“ $M_6(t)$ und des „Rückbaus“ $M_7(t)$ werden vernachlässigt
- bei den ‚Halbzeug- und Rohstoffimporten‘ $I_5(t)$ existiert kein Zwischenhandel, das bedeutet diese Importe werden in der Schweiz stets weiterverarbeitet, bevor sie in die Nutzung in der Schweiz oder den Güterexport $O_1(t)$ gelangen. Zudem sind die ‚sonstigen Güterimporte‘ in die Schweiz null.
- der Direktexport-Anteil importierter Mobilien und ‚Immobilien‘ beträgt 5 %; Letzterer steigt im IV. Quartal an.
- ungefähr 0.5 % des in der Region umgeschmolzenen Kupfers gelangt in die Schmelzschlacke und damit in die Deponie
- die meisten Parameterfunktionen werden für das „Standardszenario“ ab dem Jahr 2000 konstant angesehen. Ausnahmen: siehe Tab. A–40 im Anhang.

Zu Beginn des Betrachtungszeitraums ($t = 1900$) betragen die Lager

- in den Gebäuden ca. 10 kg/capita,
davon ca. 8 kg/capita im Dach und 2 kg/capita in der Haustechnik
- in der Infrastruktur 2 kg/capita
- in den Mobilien ca. 3.5 kg/capita (inklusive Fahrzeuge)
- in den Deponien und den Umweltkompartimenten null.

Eine vollständige Auflistung der eingesetzten Modellparameterwerte ist in Tab. A–39 und Tab. A–40 im Anhang zusammengestellt.

5.2.4 Bewertungskriterien

Bewertungskriterien (Indikatoren) sollen den *Status quo* und künftige Entwicklungen hinsichtlich der Ziele beurteilen helfen (Kap. 1.3) sowie Vergleiche zwischen Szenarien und Regionen ermöglichen. Zur Bewertung ausgewählter Eigenschaften des Kupferhaushaltssystems werden drei Bewertungskriterien eingeführt: *Versorgungsgrad*, *Nutzungsverlust* und *Umwelteintrag*. Ihre Wahl zielt darauf, den Kupferhaushalt auf der Grundlage von Hypothesen zur Lagerbewirtschaftung beurteilen zu können.

1) **Versorgungsgrad der Region (VG):** Ein geeignetes Kriterium zur Bewertung der Möglichkeiten und Erfordernisse einer regionalen Kupferbewirtschaftung ist der *Versorgungsgrad*¹⁴⁸, der als Verhältnis zwischen den regionalen Ressourcen und der zur Deckung des regionalen Bedarfs erforderlichen Ressourcenmenge definiert ist (OSWALD *et al.* 2003).

Gl. 31

$$\text{Versorgungsgrad (VG)} = \frac{\text{Ressourcenangebot der Region}}{\text{Ressourcenbedarf der Region}} \quad (\text{dimensionslos})$$

2a) **Nutzungsverlust (NV):** Die Rezyklierung über den zentralen Prozess „Produktion“ ist nicht verlustfrei möglich. Die Anreicherung in den Deponien plus die Emissionen in die Umweltkompartimente bestimmen den Nutzungsverlust. Ein geringer Nutzungsverlust deutet auf eine effiziente Ressourcennutzung hin (Ressourceneffizienz).

Je nach Bedeutung des Produktionsausschusses bedarf die Bewertung des Nutzungsverlustes einer Kommentierung, da regionseigene Schrotte auch im Hinterland aufbereitet werden und daher dort Kupfer zur Deponierung gelangt.

2b) **Akkumulierter Nutzungsverlust:** Der akkumulierte jährliche Kupfermenge aus der Nutzung in die Deponie und die Umweltkompartimente bis zum Jahr t_0 (ab 1900).

3a) **Umwelteintrag:** Der jährliche Eintrag in die Umweltkompartimente.

3b) **Akkumulierter Umwelteintrag:** Der akkumulierte jährliche Eintrag in die Umweltkompartimente bis zum Jahr t_0 (ab 1900).

Für die mathematische Formulierung der Bewertungskriterien siehe Kap. A.4.5 im Anhang.

¹⁴⁸ In der Literatur wird häufig synonym die Bezeichnung „Selbstversorgungsgrad“ oder „Autarkiegrad“ benutzt, z.B. bei HUG (2002) und REDLE (1999).

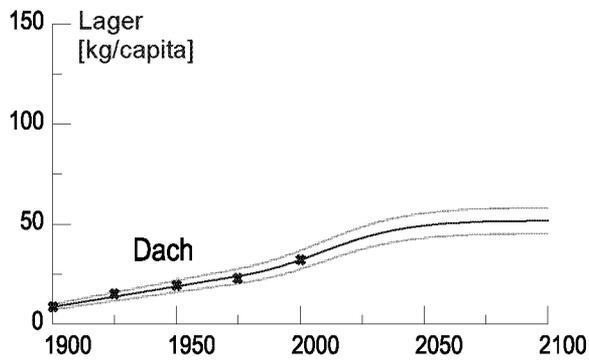


Abb. 5-7: Linearlogistische Wachstumskurve des Pro-Kopf-Lagers im Dach (dunkle Kurve) mit Angabe der Unsicherheit (helle Kurven). Die Wachstumskurve liegt sehr nahe an den Messwerten der Lagererfassung aus Kap. 3.5 (markierte Punkte).

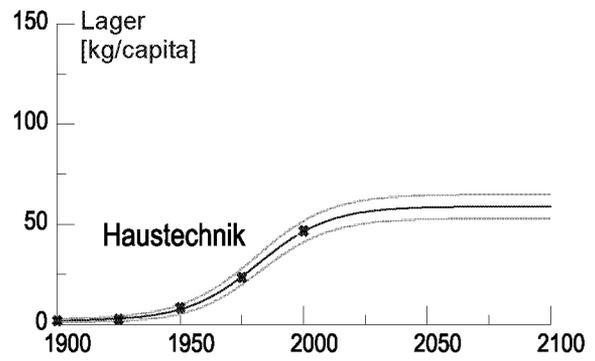


Abb. 5-8: Linearlogistische Wachstumskurve des Pro-Kopf-Lagers in der Haustechnik (dunkle Kurve) mit Angabe der Unsicherheit (helle Kurven). Die Wachstumskurve liegt sehr nahe an den Messwerten der Lagererfassung aus Kap. 3.5 (markierte Punkte).

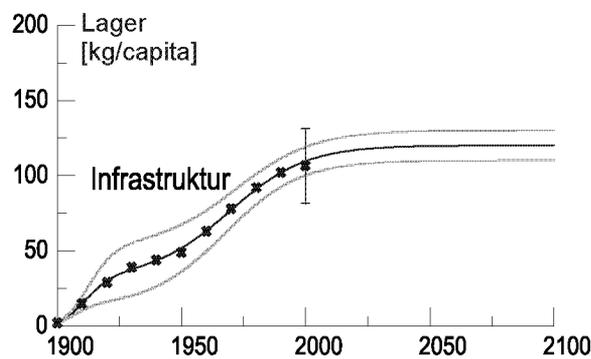


Abb. 5-9: Doppellogistische Wachstumskurve des Pro-Kopf-Lagers in der Infrastruktur (dunkle Kurve) mit Angabe der Unsicherheit (helle Kurven). Die Wachstumskurve liegt sehr nahe an den Messwerten der Lagererfassung aus Kap. 3.5 (markierte Punkte). Für das Jahr 2000 ist die Unsicherheit des Messwertes aus Kap. 3.5 als Fehlerbalken eingetragen.

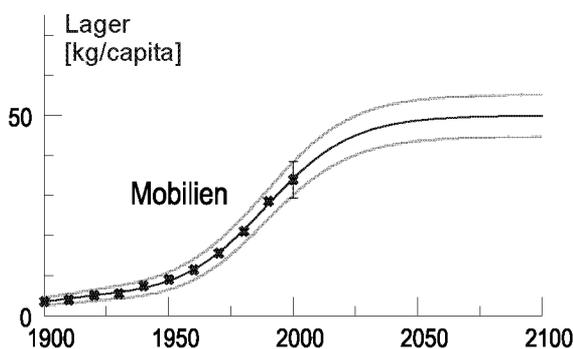


Abb. 5-10: Linearlogistische Wachstumskurve des Pro-Kopf-Lagers in den Mobilien (dunkle Kurve) mit Angabe der Unsicherheit (helle Kurven). Die Wachstumskurve liegt sehr nahe an den Messwerten der Lagererfassung aus Kap. 3.5 (markierte Punkte). Für das Jahr 2000 ist die Unsicherheit des Messwertes aus Kap. 3.5 als Fehlerbalken eingetragen.

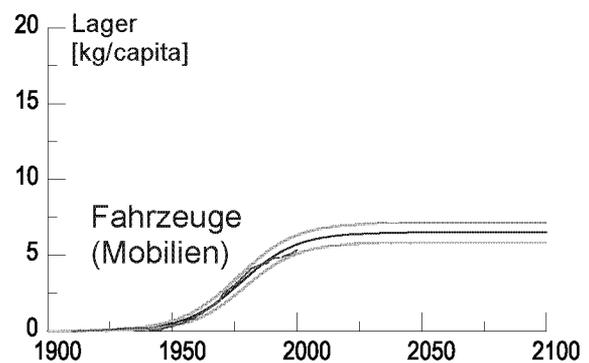


Abb. 5-11: Linearlogistische Wachstumskurve des Pro-Kopf-Lagers in den Fahrzeugen (echte Teilmenge der Mobilien)(dunkle Kurve) mit Angabe der Unsicherheit (helle Kurven). Die Wachstumskurve liegt sehr nahe an den Messwerten der Lagererfassung (unregelmässige Kurve bis zum Jahr 2000).

Neben den Wachstumsfunktionen werden zudem zwei Input-Flüsse aus der Aussenhandelsstatistik (Kap. 5.3.2.1) zur direkten Kalibrierung übernommen (Abb. 5-12 und Abb. 5-13):

- Parameterfunktion Pf_{30} Schrottimport $I_7(t)$
- Parameterfunktion Pf_{13} Pflanzenschutzmittel $I_8(t)$

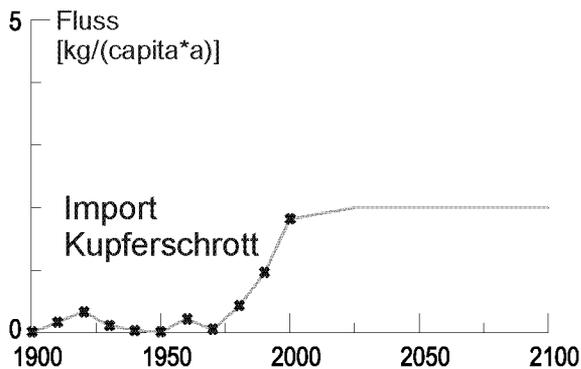


Abb. 5-12: Pro-Kopf-Import Kupferschrott $I_7(t)$. Die historischen Importmengen des Kupferschrotts werden durch lineare Interpolation der Messwerte bestimmt, welche durch Auswertung der Aussenhandelsstatistik im Abstand von jeweils zehn Jahren ermittelt wurden (markierte Punkte).

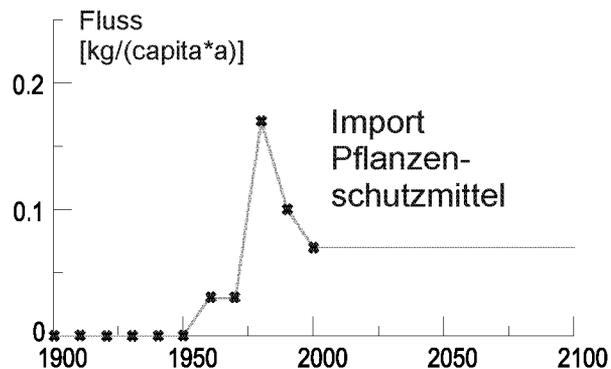


Abb. 5-13: Pro-Kopf-Import Kupfer in Pflanzenschutzmittel $I_8(t)$. Die historischen Importmengen des Kupfers in Pflanzenschutzmitteln werden durch lineare Interpolation der Messwerte bestimmt, welche durch Auswertung der Aussenhandelsstatistik im Abstand von jeweils zehn Jahren ermittelt wurden (markierte Punkte).

5.3.2 Indirekte Kalibrierung

Zur Bestimmung der restlichen Parameter ist das Modell durch weitere Systemkenntnisse bekannter Daten zu verifizieren bzw. anzupassen. Geeignet ist hierfür besonders die Aussenhandelsstatistik (AHS), da mangels primärer Kupferlagerstätten fast alles genutzte Kupfer importiert wurde und die Statistik für das gesamte 20. Jahrhundert verfügbar ist.

Mit Hilfe der AHS werden so genannte Vergleichsvariablen gebildet, denen die Variablen der Input-Flüsse ($I_1, I_2, I_3, I_4, I_5, I_7$) und Output-Flüsse bzw. Hilfsvariablen daraus ($O_1+O_3+O_4+O_5, O_2+O_7$) gegenübergestellt werden. Die Unsicherheit der Vergleichsvariablen abzuschätzen ist problematisch, da hierzu keine Angaben aus der statistischen Quelle vorliegen. Die Unsicherheit ist wahrscheinlich asymmetrisch (ca. +10%/–20%), da aufgrund der mengenabhängigen Zollabgaben mit systematisch zu geringen Zollmengen zu rechnen ist.

5.3.2.1 Aussenhandel

Die Schweizerische Aussenhandelsstatistik (AHS) dokumentiert den Warenaustausch des schweizerischen Zollgebiets¹⁵⁰ mit den Erzeugungs- bzw. Verbrauchsländern der Waren (OZD 2001)¹⁵¹. Der so genannte Spezialhandel umfasst alle definitiv im- und exportierten Waren und ist

¹⁵⁰ Zum schweizerischen Zollgebiet gehören neben der Schweiz auch das Fürstentum Liechtenstein, die deutsche Enklave Büsingen und die italienische Gemeinde Campione; daraus ausgeschlossen ist hingegen das Samnauntal. Diese Abweichungen von der politischen Grenze der Schweiz werden vernachlässigt, da Liechtenstein mit ca. 30'000 Einwohnern weniger als 0.5 % des Zollgebiets ausmacht und keine nennenswerten industriellen Kupferverarbeitungsbetriebe oder -verbraucher aufweist.

¹⁵¹ Die AHS wird durch die Oberzolldirektion auf Grundlage der Zolldeklarationen geführt und jährlich herausgegeben (übliche Darstellung ist pro Jahr, pro Quartal und pro Monat). Sie gibt unter anderem Auskunft über die Ein- und Ausfuhr von Waren nach Produkten und Ländern, wobei sie als Teil der vom Bund erstellten Wirtschaftsstatistiken primär die Warenmengen und Warenarten (Preise) erhebt, um die Warenwerte und daraus die Einfuhr- bzw. Ausfuhrzölle zu berechnen. Dabei werden mit zunehmender Bearbeitung höhere Zolltarife

durchgängig für den gesamten Betrachtungszeitraum auf jährlicher Basis verfügbar. Die Handelsmengen sind generell als Masse und Wert angegeben, so dass die Kupfermenge ggf. über die abgeschätzte Konzentration in der Ware berechnet wird. Die wesentlichen Flüsse finden sich im KAPITEL „Kupfer und Waren daraus“ (inkl. Legierungen)(KAPITEL 74), das neben Kupfererzstoffen und -rohstoffen alle Halbzeuge (Stangen, Stäbe, Profile, Drähte, Bleche, Bänder) aus Kupfer und seinen Legierungen umfasst, daneben auch fertige Waren aus Kupfer. Ferner führen folgende KAPITEL Kupfer: Erze, Schlacken und Aschen (26), anorganische chemische Erzeugnisse (28), Düngemittel (31), verschiedene Erzeugnisse der chemischen Industrie (38), verschiedene Waren aus unedlen Metallen (83), Maschinen, Apparate und mechanische Geräte (84), elektrische Maschinen, Apparate und Geräte (Elektronikgeräte) (85), Schienenfahrzeuge (86), Automobile, Traktoren, Motorräder und Fahrräder (87), Instrumente, Apparate und Geräte (90), Uhrmacherwaren (91) und Unterhaltungsartikel (95)¹⁵². Die aus obigen KAPITELN berücksichtigten Tarifnummern sind mit Angabe der abgeschätzten Kupferkonzentrationen in Tab. A-42 und Tab. A-43 im Anhang aufgeführt. Aufgrund des Arbeitsaufwands wurden die Im- und Exportmengen von 1900 bis 2000 im Abstand von 10 Jahren bestimmt. Schliesslich werden die Positionen den Vergleichsvariablen (Kombinationen aus Input- und Outputflüssen) des Systems zugeordnet (Tab. A-44 im Anhang). Dabei werden die Drähte vollständig den Immobiliengütern (I4) zugeordnet (Freileitungen, Oberleitungen); eventuelle in der Produktion von Elektrowaren (Mobilen) weiterverarbeitete Drähte werden vernachlässigt.

In Kap. 3.1 wird bereits deutlich, in welchem Masse der Kupferhandel im 20. Jahrhundert anwächst. Für die einzelnen Inputs und Outputs erhält man nun ein differenzierteres Bild. Die linear interpolierten Messwerte aus der AHS werden den Inputflüssen (ausser I1) und den Outputflüssen des Systems gegenübergestellt (Abb. 5-14 bis Abb. 5-21). Die Unsicherheiten ($\pm \sigma$) der berechneten Handelsflüsse sind analog Kap. 5.3.1 dargestellt. Um potentielle Fehlerquellen bei der Zuordnung zu den Vergleichsvariablen zu unterbinden, werden zwei Kontrollsummen gebildet (Abb. 5-16, Abb. 5-19). Die Ergebnisse der Kalibrierung (dunkel, umrahmt vom Unsicherheitsbereich) zeigen eine deutliche Übereinstimmung mit den Vergleichsvariablen (gestrichelte Kurven).

Bewertung des Vergleichs mit der Aussenhandelsstatistik

Die Übereinstimmung der Modelldaten mit den experimentellen Daten der AHS sind für die Zielsetzung ausreichend, so dass auf eine weitere rechnerische Feinabstimmung in diesem Rahmen verzichtet wurde. Die Mobilienimporte der AHS bewegen sich im oder nahe des Unsicherheitsbereichs (umhüllende, helle Kurven) der berechneten Importe (Abb. 5-14 bis Abb. 5-16). Bei den anderen Güterimporten sind die Abweichungen grösser. Die Immobiliengüter der AHS unterschreiten die berechneten Importe im Zeitraum 1930 bis 1970 (Abb. 5-17), hingegen überschreiten die Halbzeug-/ Rohstoffimporte der AHS die berechneten Importe von 1930 bis 1990, kurzzeitig um mehr als 50 % (Abb. 5-18). Die gute Übereinstimmung der AHS-Exporte mit den berechneten Exporten deutet darauf hin (Abb. 5-20, Abb. 5-21), dass der „Überschuss“ an Halbzeugimporten nur durch abweichende Eigenschaften des Immobilienlagers (Menge, Lebensdauer) oder durch eine systematische Unterschätzung der Exportmengen zu erklären ist.

angewendet (ZIMMERMANN 2004). Zur Bestimmung der Warenmenge wurden die Kupferwaren zu Anfang des 20. Jahrhunderts von Experten geschätzt und später durch die Deklaration der Importeure und Exporteure bestimmt. Dabei wird stets das Eigengewicht der Ware pro Tarifnummer des Zolltarifs in Kilogramm bzw. in Quintalen [q] (à 100 kg) angegeben.

Die Unterteilung der Waren im Zollverkehr in Positionen der AHS orientiert sich daher aus oben genannten Gründen an der Veredelungsstufe; sie zielt nicht auf stoffliche Homogenität der Warengruppen wie beispielsweise im Kupferhandel (definierte Schrottqualitäten)(VDM 1988).

¹⁵² Betrachtet man die absoluten Kupfermengen in den Positionen der genannten Kapitel, so stellt man fest, dass ein Grossteil der Gesamtmenge in einer Auswahl von Positionen konzentriert ist (Stichjahr 2000). Dieser Umstand wird genutzt, indem aus der Vielzahl der Positionen in einem ersten Schritt jene mit einem hohen Kupfergehalt für eine genaue Erhebung ausgewählt werden; die anderen Positionen werden aufgrund geringer Kupfermengen im Folgenden zur Vereinfachung vernachlässigt, wobei ihre Kupfermenge kumuliert weniger als 10 % an jeweils gesamtem Kupferimport, -export und Kupfernettoimport ausmacht. Durch diese Auswahl entfallen die kursiven KAPITEL vollständig (28, 31, 86, 95).

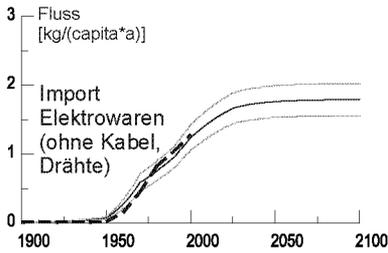


Abb. 5-14: Pro-Kopf-Import Elektrowaren $I_2(t)$: Modellierung (dunkle Kurve) mit Unsicherheit (helle Kurven) vs. Vergleichsvariable (gestrichelte Kurve) bis zum Jahr 2000. Das Modell stimmt gut mit den Messwerten der Vergleichsvariablen (gestrichelte Kurve) überein, abgesehen von einer leichten Überschreitung im Zeitraum 1950–1970.

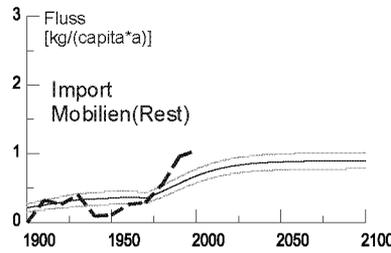


Abb. 5-15: Pro-Kopf-Import Mobili(en)(Rest) $I_3(t)$: Modellierung (dunkle Kurve) mit Unsicherheit (helle Kurven) vs. Vergleichsvariable (gestrichelte Kurve) bis zum Jahr 2000. Das Modell überschreitet die Messwerte zweimal bis 1960 und unterschreitet sie seit 1980.

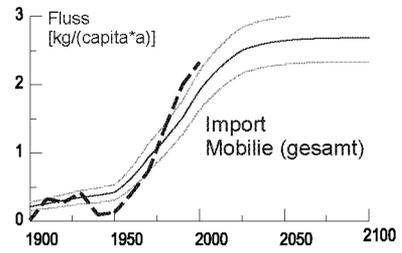


Abb. 5-16: Pro-Kopf-Import Kontrollsumme $I_2(t)+I_3(t)$: Modellierung (dunkle Kurve) mit Unsicherheit (helle Kurve) vs. Vergleichsvariable (gestrichelte Kurve) bis zum Jahr 2000. Das Modell überschreitet die Messwerte zweimal bis 1970 und unterschreitet sie leicht seit 1980.

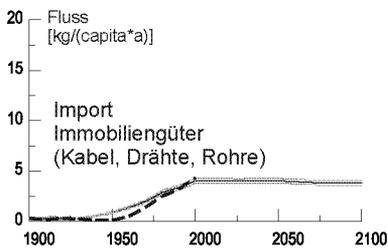


Abb. 5-17: Pro-Kopf-Import Immobiliengüter $I_4(t)$: Modellierung (dunkle Kurve) vs. Vergleichsvariable (gestrichelte Kurve) bis zum Jahr 2000. Die Modellierung überschreitet die Messwerte im Zeitraum 1930–1980.

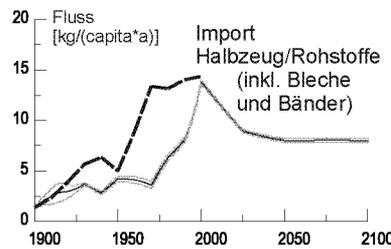


Abb. 5-18: Pro-Kopf-Import Halbzeug/Rohstoffe $I_5(t)$: Modellierung (dunkle Kurve) vs. Vergleichsvariable (gestrichelte Kurve) bis zum Jahr 2000. Die Modellierung unterschreitet die Messwerte mehr oder weniger stark seit 1920.

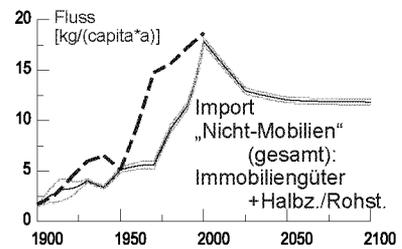


Abb. 5-19: Pro-Kopf-Import Kontrollsumme $I_4(t)+I_5(t)$: Modellierung (dunkle Kurve) vs. Vergleichsvariable (gestrichelte Kurve) bis zum Jahr 2000. Die Modellierung unterschreitet die Messwerte seit 1920 unterschiedlich stark – mit Ausnahme von 1950.

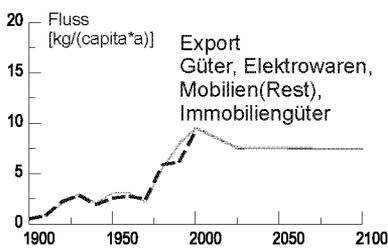


Abb. 5-20: Pro-Kopf-Export Güter Kontrollsumme $O_1(t)+O_3(t)+O_4(t)+O_5$: Modellierung (dunkle Kurve) vs. Vergleichsvariable (gestrichelte Kurve) bis zum Jahr 2000. Die Modellierung überschreitet die Messwerte zweimal leicht: von 1940 bis 1970 und seit 1980.

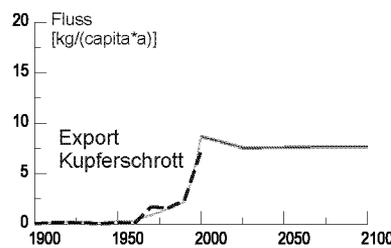


Abb. 5-21: Pro-Kopf-Export Kupferschrotte Kontrollsumme $O_2(t)+O_7(t)$: Modellierung (dunkle Kurve) vs. Vergleichsvariable (gestrichelte Kurve) bis zum Jahr 2000. Die Modellierung unterschreitet die Messwerte im Zeitraum von 1960 bis 1980 und überschreitet sie nach 1990.

Der zehnjährige Erfassungszyklus wird hier für eine langfristige Ressourcenbetrachtung über das 20. Jahrhundert in erster Näherung gewählt. Kurzfristigere (< 10 a) oder genauere Untersuchungen können die jährlich auftretenden Angebots- und Bedarfschwankungen nicht ausser Acht lassen und sollten daher zusätzliche Stichjahre einbeziehen, denn die jährlichen Schwankungen können bis zu 100 % betragen (vgl. Abb. A-15 im Anhang). Es wird implizit angenommen, dass die Kupfergehalte

potentieller nichtverzollter Warenimporte und -exporte sich über die Gesamtheit der berücksichtigten Kupferwaren ausgleichen.

5.3.2.2 Systeminterne Vergleichswerte

Berechnungen ergeben, dass der Anteil der Immobiliengüter aus dem Import in die Infrastruktur (Pf_{21}) ca. 30 % beträgt (SOMMER 2004). In früheren Zeiten war der schweizerische Kabelproduzentenmarkt stärker positioniert und der Import entsprechend geringer (Abb. 5-22).

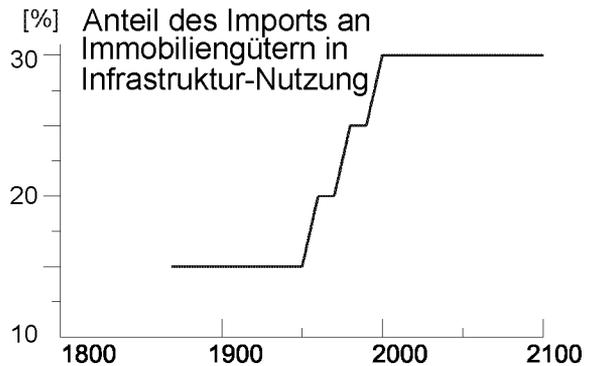


Abb. 5-22: Anteil der Importgüter in Infrastruktur $A_{4-10}(t)$ am Gesamtinput in die Infrastruktur (Pf_{21}).

Der Import an Immobiliengütern besteht aus Kabeln, Rohren und Zubehör. Je nach Lagerwachstum der Subprozesse „Dach“ und „Haustechnik“ überwiegt diese Gütergruppe oder die Bleche/Bänder aus der „Produktion“ (hier: Spenglerverarbeitung). Daraus wird der Anteil importierter Immobiliengüter (Pf_{23}) am Gesamtimport in die Immobilien bestimmt (Abb. 5-23).

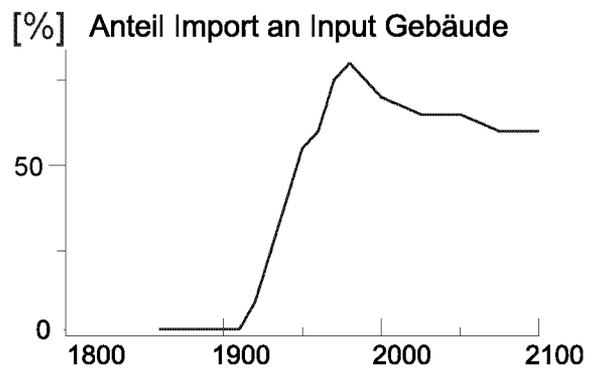


Abb. 5-23: Anteil der Importgüter in Gebäude $A_{4-11}(t)$ am Gesamtinput in die Gebäude (Pf_{23}).

Der Anteil importierter Elektrowaren (Pf_{28}) und der Mobilen(Rest) (Pf_{27}) am Gesamtinput der Mobilen wird anhand der AHS bestimmt (Abb. 5-24, Abb. 5-25). Dazu müssen Annahmen des schweizerischen Anteils des Mobilen-Inputs getroffen werden.

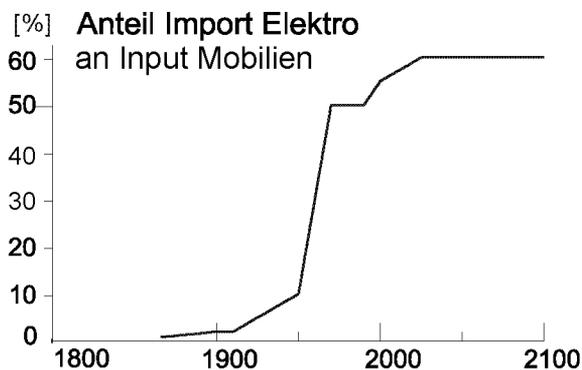


Abb. 5-24: Anteil [%] des Elektrowaren-Imports in die Mobilen-Nutzung (ohne Berücksichtigung des Fahrzeuginputs)(Pf_{28}).

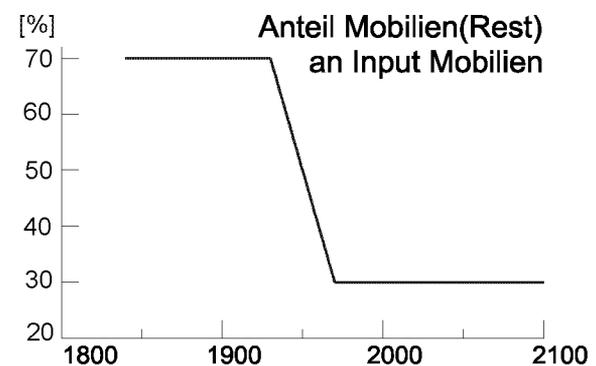


Abb. 5-25: Anteil [%] des Imports an Mobilen(Rest) in die Mobilen-Nutzung (ohne Berücksichtigung des Fahrzeuginputs)(Pf_{27}).

Andere statistische Daten zur Kalibrierung liegen nicht vor. Die Transferkoeffizienten sind teilweise nur grob bekannt oder unbekannt.

5.4 Resultate

Die Entwicklung im 20. Jahrhundert ist in Momentaufnahmen im Abstand von 25 Jahren dargestellt (Abb. 5-26 bis Abb. 5-30). Durch den Ressourcentransfer von der Geo- in die Anthroposphäre wachsen die urbanen Lagerstätten im 20. Jahrhundert von ca. 20 kg/capita auf annähernd 300 kg/capita an. Dieser Wachstumsprozess zeigt sich allgemein in den Lagern und Flüssen des Systems, jedoch unterscheiden sich die Wachstumsgeschwindigkeiten stark voneinander und variieren in der Zeit.

Auffällig ist die Zunahme der Gesamtimporte und -exporte über das Jahrhundert auf das 15fache bzw. 30fache. Auch der jährliche Import-Überschuss (Importe minus Exporte) wächst von 1 kg/(capita · a) in 1900 auf über 4 kg/(capita · a) in 1975 an und verharrt auf diesem Niveau bis heute. Die zunehmende wirtschaftliche Verflechtung mit dem Ausland zeigt sich darin, dass der Gesamtexport im Verhältnis zum Gesamtimport ansteigt, von unter 35 % in 1900 auf über 80 % in 2000: Wachsende Importanteile werden nicht zur Nutzung in der Schweiz, sondern nur zur Verarbeitung eingeführt. Die Abnahme des Import/Export-Verhältnisses im Zeitraum 1925 bis 1975 von ca. 65 % auf 55 % ist hingegen im zunehmenden jährlichen Wachstum der Hauptlager begründet (Anstieg von 1.1 kg/(capita · a) auf 3.1 kg/(capita · a)).

Die Verteilung des Gesamtzuwachses auf die verschiedenen Lager verschiebt sich im Betrachtungszeitraum stark. Der Zuwachs in der Infrastruktur betrug um 1900 fast $\frac{2}{3}$ des Gesamtzuwachses, im II. Quartal die Hälfte und verminderte sich bis heute auf ca. 15 %. Der grosse Anteil um 1900 rührt daher, dass anfangs die Elektrifizierung der Siedlungen und später die Aufrüstung auf grössere Strangquerschnitte grosse Kabelmengen erforderten. Heute ist das Lagerwachstum der Infrastrukturanlagen in einem Sättigungsprozess.

Die Infrastruktur umfasst um 1925 über die Hälfte des Lagers, und nach wie vor übersteigt ihre Wachstumsrate mit 2.1 % p.a. jene der Gebäude und Mobilien (1.7 bzw. 1.5 % p.a.). Nun schlägt sich auch die Industrialisierung in verschiedenen Punkten nieder. Die Güterexporte wachsen mit der industriellen Produktion auf 2.5 kg/(capita · a). Ab dem I. Quartal bleibt auch die Rangfolge der Lagergrösse gleich. In abnehmender Grösse sind dies die Infrastruktur, die Gebäude, die Deponien und die Mobilien.

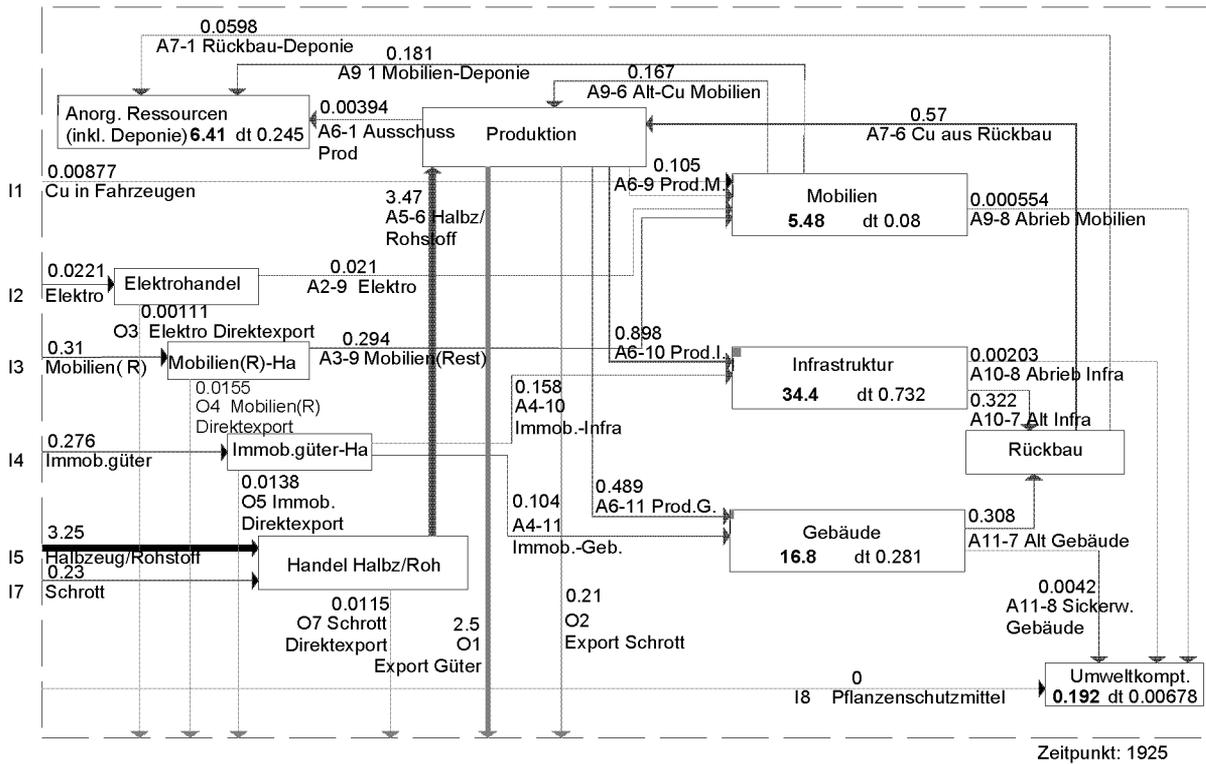


Abb. 5-27: Kupferhaushaltssystem der Schweiz im Jahr 1925: Ergebnis der dynamischen Modellrechnung. Die Pfeildicken zeigen die Grössen der Flüsse in [kg/(capita · a)] an. In den Prozessen sind die Lagergrösse in [kg/capita] und die jährliche Lageränderungsrate (dt) in [kg/(capita · a)] beziffert.

Die Wachstumsraten entwickeln sich im III. Quartal wie zuvor: Das Wachstum im Infrastrukturlager ist nach wie vor das grösste, verlangsamt sich aber weiterhin. Dadurch sinkt die Wachstumsrate auf 1.6 % p.a. Demgegenüber steigen die Wachstumsraten der Gebäude und Mobilen auf 2.4 bzw. 3.1 % p.a. Erstmals erlangen die Schrottexporte mit über 1 kg/(capita · a) eine Relevanz im Aussenhandel.

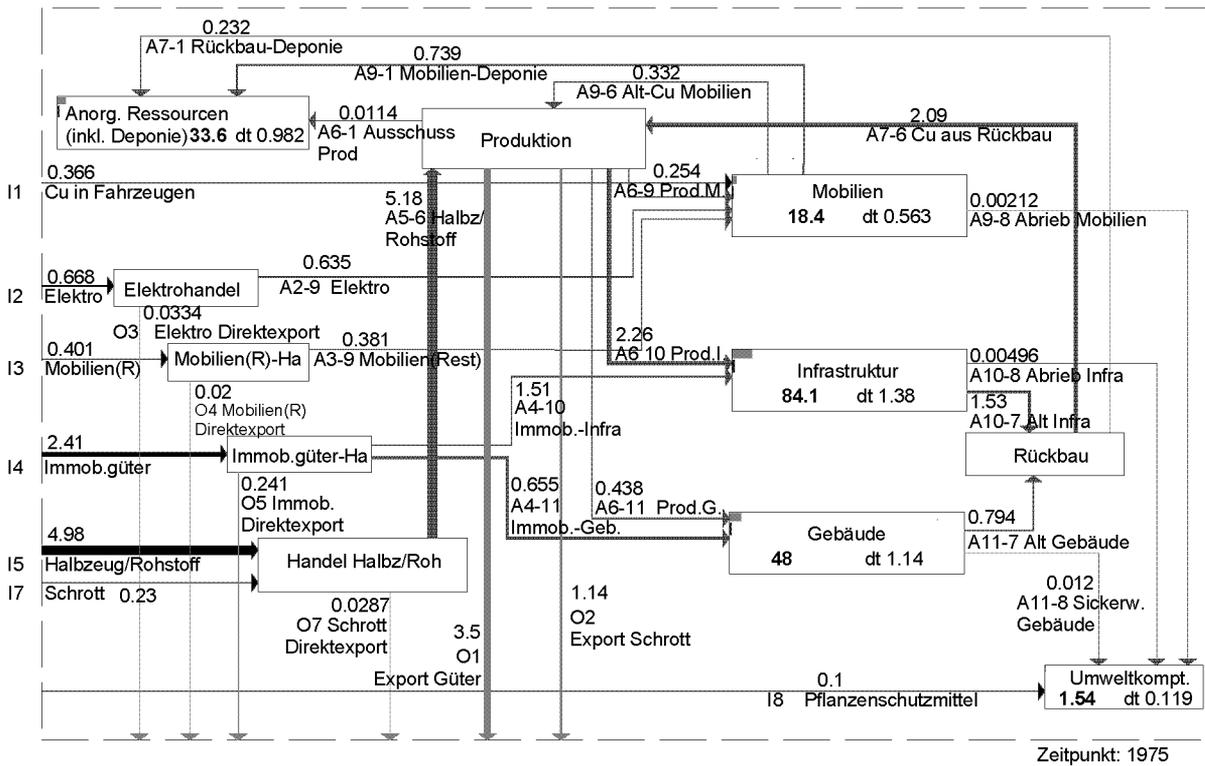


Abb. 5-29: Kupferhaushaltssystem der Schweiz im Jahr 1975: Ergebnis der dynamischen Modellrechnung. Die Pfeildicken zeigen die Grössen der Flüsse in [kg/(capita · a)] an. In den Prozessen sind die Lagergrösse in [kg/capita] und die jährliche Lageränderungsrate (dt) in [kg/(capita · a)] beziffert.

Zu Ende des 20. Jahrhunderts dominieren die Aussenhandelflüsse (Abb. 5-30). Die Importe übersteigen mit über 22 kg/(capita · a) die Exporte um ca. 4 kg/(capita · a). Dieser Lager-Zuwachs im System findet zu über 40 % in den Deponien, zu fast 30 % in den Gebäuden und zu je 15 % in Infrastruktur und den Mobilien statt. In den drei Hauptlagern ist der Umsatz jedoch grösser: Nur 20 bis 50 % der Inputmenge gelangen in den Lagerzuwachs, die anderen 50 bis 80 % werden aufgrund der Sättigung wieder aus den Prozessen ausgeschieden.

Die zentrale Bedeutung des Güteraustauschs der Hauptlager mit dem Prozess „Produktion“ wird durch die Definition des Versorgungsgrades deutlich. Die „Produktion“ nimmt die zusätzlich benötigten Ressourcenmengen in den internen Stoffkreislauf auf und führt die Ausfuhrmengen aus dem System hinaus.

Der Kupfergehalt in den Deponien wächst heute um über 5 % p.a. und ist mehr als doppelt so gross wie das Anwachsen der Hauptlager (ca. 2.3 % p.a.). Obwohl die Deponien bisher lediglich 17 % des Gesamtlagers ausmachen, findet also ca. 26 % des Lagerwachstums in den Deponien statt, so dass die anorganischen Ressourcen (Deponien) nicht nur absolut, sondern auch relativ ständig zunehmen. Blieben die Stoffflüsse auf heutigem Niveau konstant (quasistationärer Zustand), würde demnach der Anteil des Kupferlagers in den Deponien innerhalb 40 Jahren auf 25 % anwachsen.

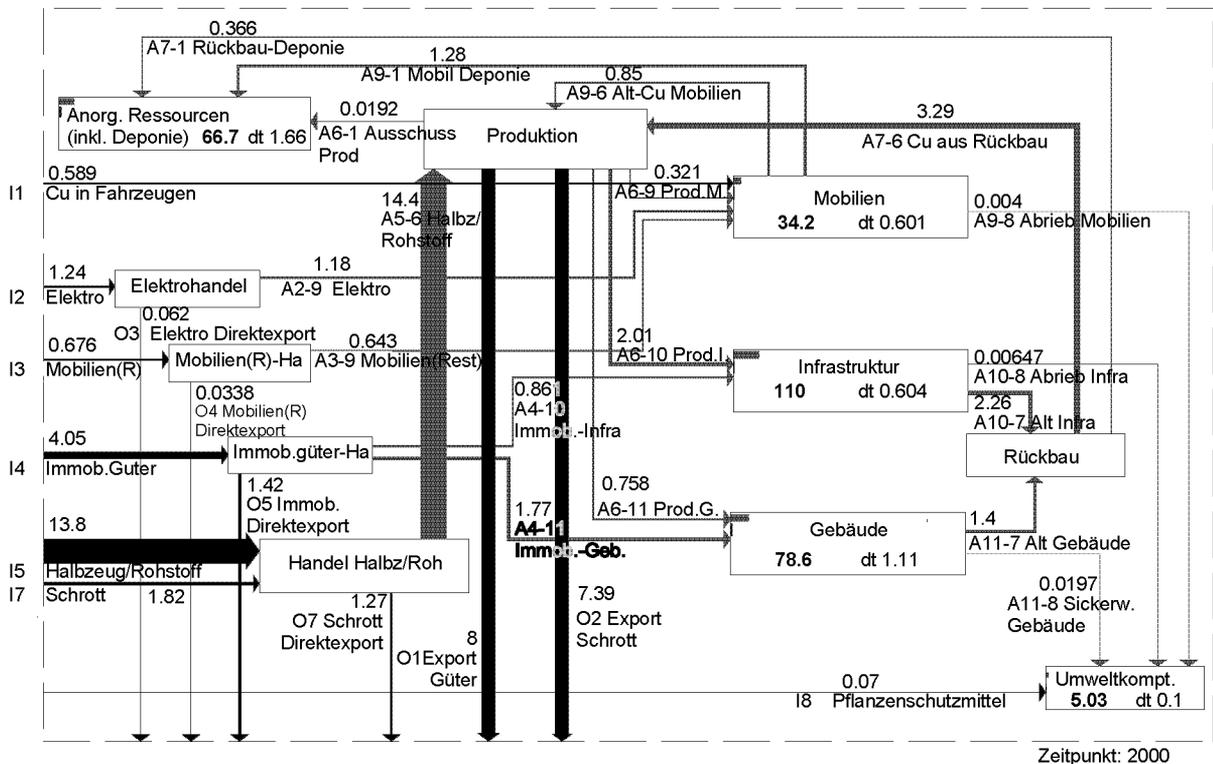


Abb. 5-30: Kupferhaushaltssystem der Schweiz im Jahr 2000: Ergebnis der dynamischen Modellrechnung. Die Pfeildicken zeigen die Grössen der Flüsse in [kg/(capita · a)] an. In den Prozessen sind die Lagergrösse in [kg/capita] und die jährliche Lageränderungsrate (dt) in [kg/(capita · a)] beziffert.

5.4.1 Dynamik der Lager

Die Wachstumskurven der Hauptlager sind bereits direkt kalibriert (Kap. 5.3.1). Dies gilt bei den Gebäuden für beide Subprozesse („Dach“, „Haustechnik“). Das Wachstum des gesamten Gebäudelagers ist in Abb. 5-31 dargestellt. Als Summe der beiden Subprozesse – beide linearlogistisch parametrisiert – ähnelt auch das Gesamtlager einer linearlogistischen Funktion. In den Abbildungen sind die Unsicherheiten ΔM_i gemäss Kap. 5.3.1 eingetragen.

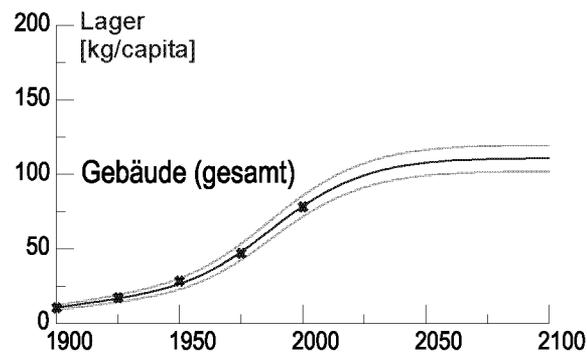


Abb. 5-31: Wachstumskurve des Gebäudelagers (gesamt) (dunkle Kurve) mit Angabe der Unsicherheiten (helle Kurven). Die markierten Punkte sind die Messwerte der Lagererfassung aus Kap. 3.5, also die Summe aus den jeweiligen Lagern im Dach und der Haustechnik (vgl. Abb. 5-7 und Abb. 5-8).

In den Prozessen „Deponie“ und „Umweltkompartimente“ nehmen die Lager stetig zu, am stärksten im IV. Quartal. Der Deponieeintrag wächst mit den zunehmenden Hauptlagern an und stabilisiert sich Ende des 20. Jahrhunderts (Abb. 5-32). Die „Umweltkompartimente“ weisen eine maximale Zunahme zu Beginn des IV. Quartals auf, welche im Verlauf des Quartals wieder abnimmt (Abb. 5-33).

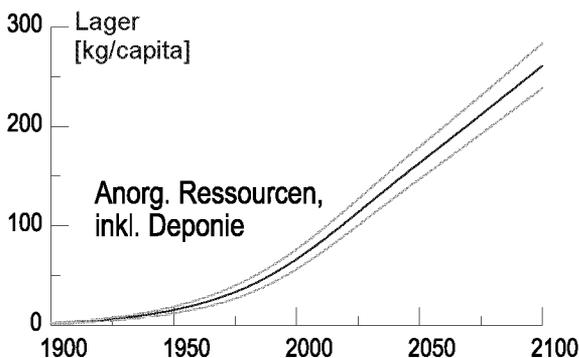


Abb. 5-32: Wachstumskurve des Lagers anorganischer Ressourcen und Deponie (dunkle Kurve) mit Angabe der Unsicherheiten (helle Kurven).

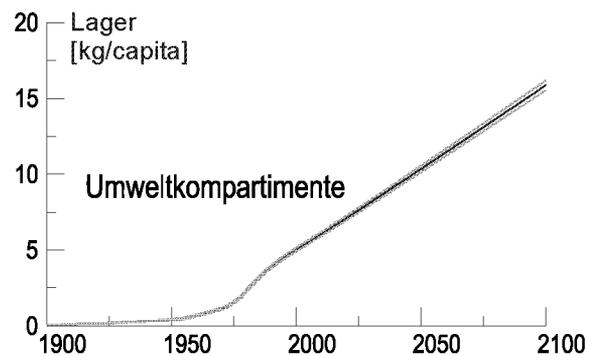


Abb. 5-33: Wachstumskurve des Lagers von Kupfer in den Umweltkompartimenten (dunkle Kurve) mit Angabe der Unsicherheiten (helle Kurven).

Die Kupfermenge in den „Umweltkompartimenten“ ist mit ca. 5 kg/capita mit Abstand das kleinste erfasste Lager und aus der Ressourcensichtweise gering zu werten. Bis 1975 wächst die Zunahme langsam an, doch im IV. Quartal stark beschleunigt. Das Gros des Eintrags in die „Umweltkompartimente“ stammt somit aus dem IV. Quartal. Die Berechnung des Deponiewachstums geht bei den Mobilien von Rezyklierungsquoten vor Einführung der VREG aus (vgl. Kap. 4.6).

5.4.2 Induzierte Flüsse

Einträge in die Deponien

Die Kupferflüsse in die Deponien ergeben zusammengefasst ca. 1.5 kg/(capita · a) (Abb. 5-34) im Jahr 2000, davon 80 % aus den Mobilien und 20 % aus dem Rückbau der Immobilien. Die Kupfermengen in den Schlackenrückständen sind vernachlässigbar klein. Der Fluss aus den Mobilien wächst seit 1950 stark an, doch wird sein Wachstum massgeblich durch verbesserte Trennleistungen gebremst und auf einem Niveau nahe 1.5 kg/(capita · a) stabilisiert.

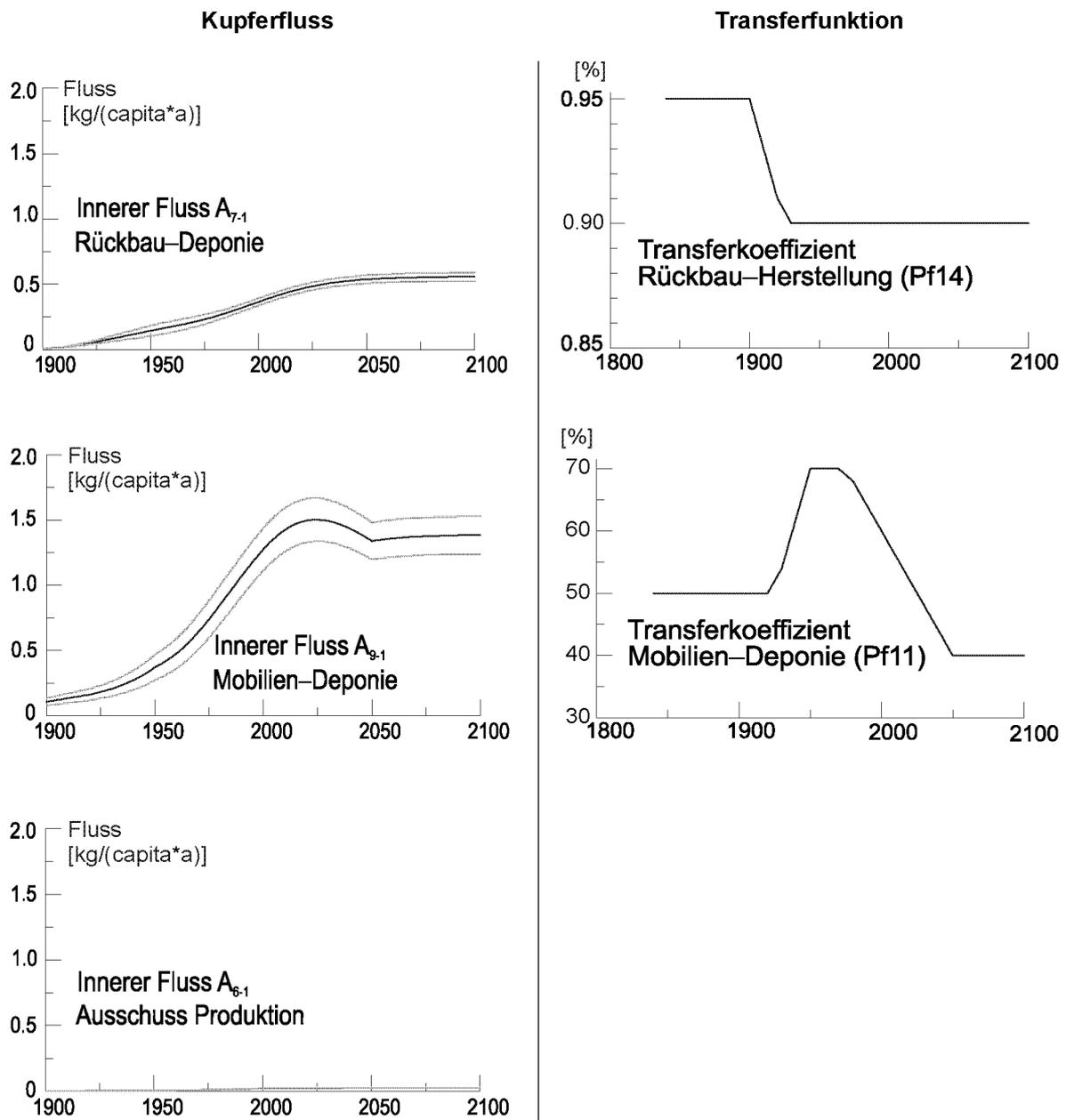


Abb. 5-34: Flüsse in die Deponien aus dem Rückbau der Immobilien, aus den Mobilien und den Schmelzrückständen der Produktion (von oben nach unten, linke Spalte). Daneben der Verlauf der Transferfunktionen der Recyclingprozesse aus dem Rückbau (Pf_{14}) und den Mobilien (Pf_{11})(rechte Spalte). Der Transferkoeffizient aus den Schmelzrückständen der Produktion beträgt konstant 0.5 %.

Einträge in die Umweltkompartimente

Die Kupferflüsse in die Umweltkompartimente ergeben zusammen ca. 0.12 kg/(capita · a) (Abb. 5-35 bis Abb. 5-38). Sie sind damit ähnlich hoch wie in bisherigen Arbeiten für die Schweiz abgeschätzt (0.08 kg/(capita · a)) (BOLLER und STEINER 2001). Die angegebenen Immissionen beruhen u.A. auf Annahmen zum durchschnittlichen Abtragsverhalten (vgl. Abriebkoeffizienten in Tab. A-39 im Anhang).

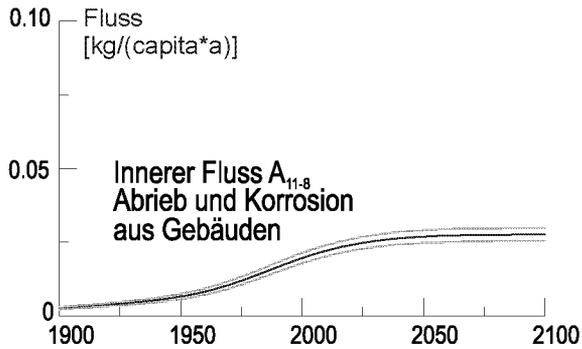


Abb. 5-35: Jährlicher Abrieb und Korrosion aus den Gebäuden $A_{11-8}(t)$.

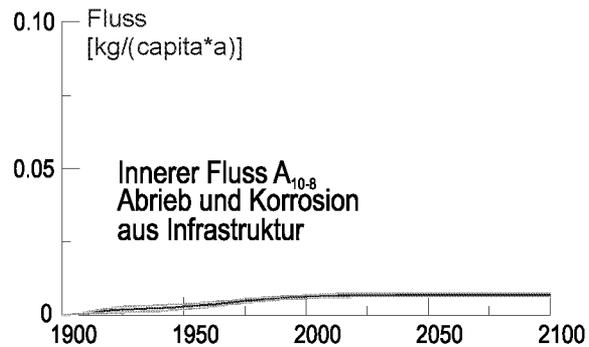


Abb. 5-36: Jährlicher Abrieb und Korrosion aus der Infrastruktur $A_{10-8}(t)$.

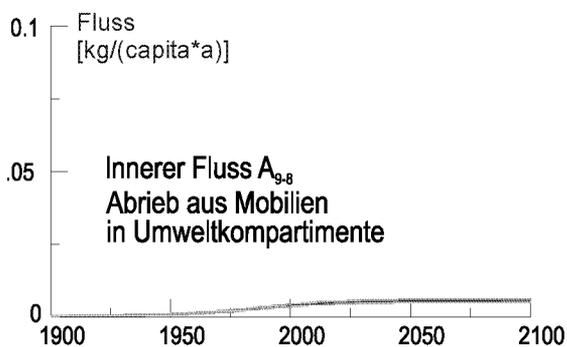


Abb. 5-37: Jährlicher Abrieb aus Mobilien in die Umweltkompartimente $A_{9-8}(t)$.

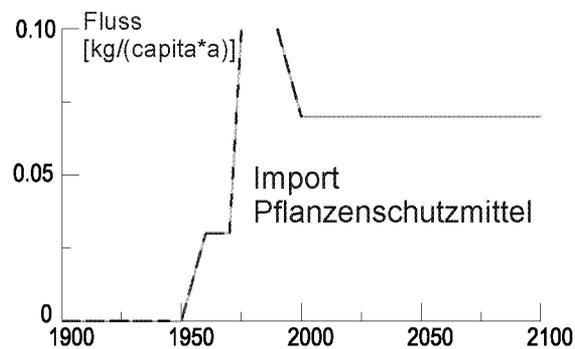


Abb. 5-38: Jährlicher Import von Kupfer in Pflanzenschutzmittel $I_8(t)$.

5.4.3 Bewertung

Die Evaluation des Systems wird durch die Bewertungskriterien *Versorgungsgrad*, *Nutzungsverlust* und *Umwelteintrag* unterstützt (Abb. 5-39 bis Abb. 5-43) (Kap. 5.2.4). Der Versorgungsgrad nahm im 20. Jahrhundert von ca. 0.3 auf 0.5 wellenförmig zu; bei gleichbleibender Entwicklung nähert er sich im 21. Jahrhundert ca. dem Wert 0.75 an (Abb. 5-39).

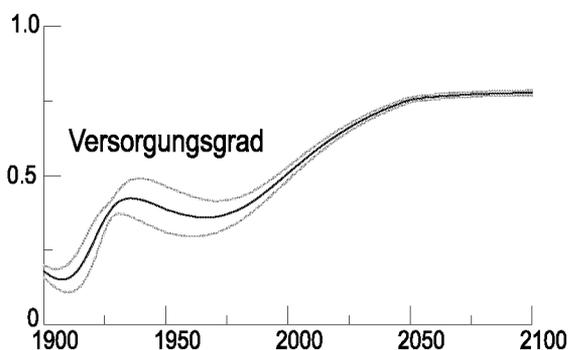


Abb. 5-39: Versorgungsgrad der Region VG(t).

Der Nutzungsverlust wächst im 20. Jahrhundert auf ca. 2 kg/(capita · a) an (Abb. 5-40). Bei gleichbleibender Entwicklung erreicht der jährliche Nutzungsverlust um 2030 ein Maximum (ca. 2.1 ± 0.2 kg/(capita · a)), bevor er sich dann auf diesem Niveau stabilisiert. Dieses Wachstum verläuft ähnlich dem in den Hauptlagern. Der akkumulierte Nutzungsverlust wächst im 20. Jahrhundert zunehmend an und erreicht um 2000 über 50 ± 10 kg/capita. Bei gleichbleibender Entwicklung werden zu Ende des 21. Jahrhunderts ein Vielfaches von heute, annähernd 250 ± 20 kg/capita, der Nutzung entzogen sein (Abb. 5-41)¹⁵³. Das Wachstum des akkumulierten Nutzungsverlusts wird auch global in solcher Intensität prognostiziert (AYRES *et al.* 2002).

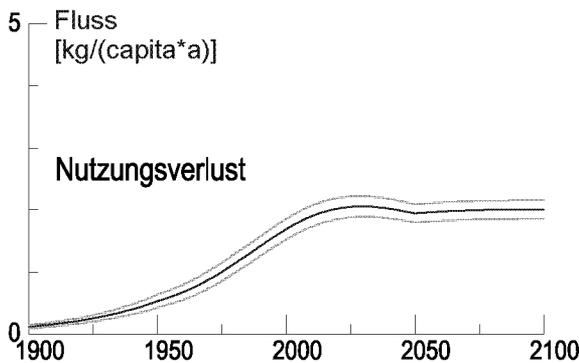


Abb. 5-40: Nutzungsverlust NV(t)

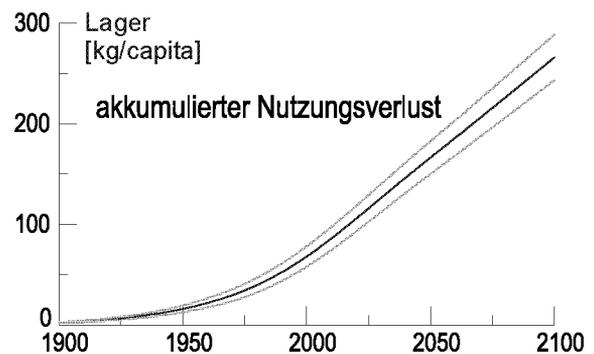


Abb. 5-41: akkumulierter Nutzungsverlust

Nach der Modellrechnung wächst der Umwelteintrag aus den Hauptlagern von ca. 0.005 in 1900 auf 0.015 kg/(capita · a) in 1950 gleichmässig an, erreicht anschliessend aber beschleunigt ca. 0.03 kg/(capita · a) in 2000 (Abb. 5-42). Bei gleichbleibender Entwicklung nähert sich der Umwelteintrag ca. 0.04 kg/(capita · a) in den kommenden Jahrzehnten. Entsprechend wächst der akkumulierte Umwelteintrag bis 2000 beschleunigt auf ca. 1.5 ± 0.2 kg/capita an. Bei konstantem Wachstum erreicht der akkumulierte Eintrag aus den Hauptlagern Ende des 21. Jahrhunderts über 5 ± 0.5 kg/capita (Abb. 5-43).

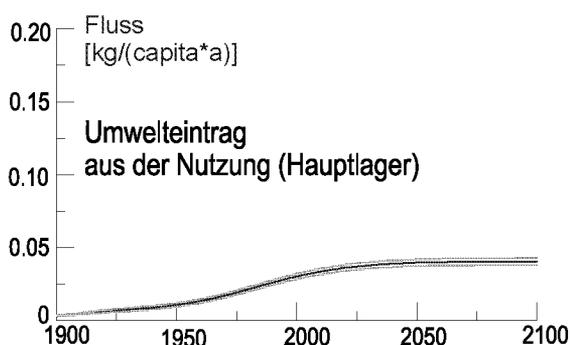


Abb. 5-42: Umwelteintrag aus den Hauptlagern (ohne Landwirtschaft)

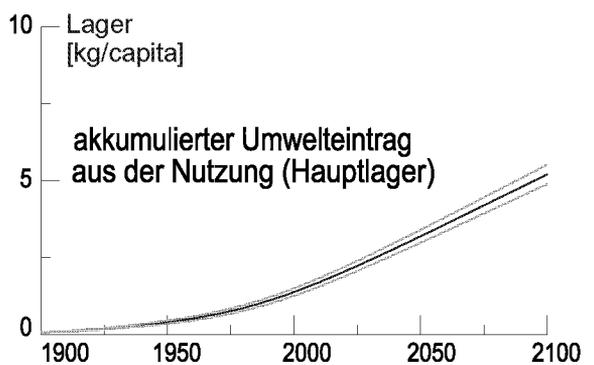


Abb. 5-43: akkumulierter Umwelteintrag (ohne Landwirtschaft)

¹⁵³ Bei dieser Beurteilung wird die angestrebte Wiedernutzbarmachung des Kupfers in den Deponien noch nicht berücksichtigt.

5.4.4 Diskussion des dynamischen Modells

Aktueller Kupferhaushalt

Als Ausgangspunkt des dynamischen Modells diente das System in Abb. 3.29. Durch Aggregation der Ergebnisse aus dem Modell erhält man neben den Lagermengen auch die Grösse der Lageränderungen und Flüsse des Systems (Abb. 5-44).

Das Kupferhaushaltssystem der Schweiz ist durch einen starken Aussenhandel geprägt. Die importierte Kupfermenge beträgt ca. 22 kg/(capita · a) und übersteigt die exportierte Menge in Höhe von 18 kg/(capita · a). Der Netto-Import von 4 kg/(capita · a) gelangt – teilweise nach Verarbeitung – in die Nutzung. Die Inputflüsse der Infrastruktur und Mobilen betragen beide ca. 2.8 kg/(capita · a) und übersteigen die Outputflüsse von ca. 2.2 kg/(capita · a). Die Differenz von +0.6 kg/(capita · a) führt zum Lagerwachstum der entsprechenden Prozesse, bei der Infrastruktur um 0.6 % p.a. und bei den Mobilen um 1.7 % p.a. Input- und Outputfluss der Gebäude sind mit 2.5 kg/(capita · a) bzw. 1.4 kg/(capita · a) geringer als bei den beiden andern Hauptlagern, doch das resultierende Lagerwachstum ist mit 1.1 kg/(capita · a) grösser (i.e. 1.4 % p.a.).

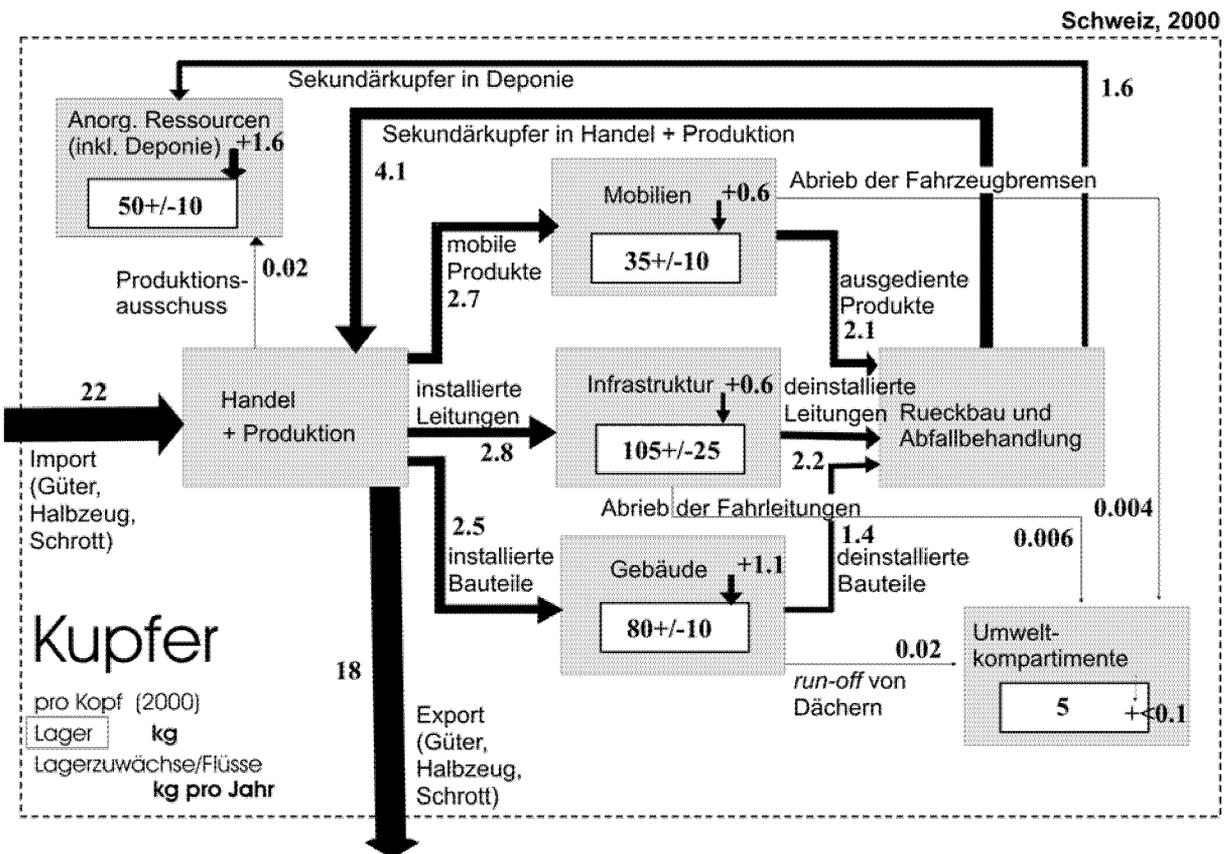


Abb. 5-44: Kupferhaushaltssystem für die Schweiz zu Ende des 20. Jahrhunderts auf Basis aggregierter Daten aus dem Modell *Cuprum*, mit **berechneten** Systemflüssen. Die Lager (in Kästen) sind angegeben in [kg/capita] (Werte auf 5 kg gerundet); die Lagerzuwächse (vertikale Pfeile neben den Lagern) und Flüsse sind durch die Pfeildicke visualisiert (proportional zur Flussgrösse). Bei allen Prozessen und Flüssen ist nur der metallische Kupfergehalt berücksichtigt, sowohl für kupferführende Güter als auch für Kupferlegierungen.

Fast ein Fünftel des Gesamtlagers ist bereits in die Deponien gelangt. Das Kupferlager in den Deponien steigt jährlich um 1.6 kg/(capita · a). Da die Mobilenoutputs zu über ⅔ zum Sekundärkupfer in die Deponien beitragen, kann die flächendeckende Einführung des Elektro- und Elektronikschrottrecyclings diesen Fluss in Zukunft vermindern (SUTER *et al.* 2003). Die Kupferverluste durch Schmelz-

prozesse in der Produktion sind bereits heute vernachlässigbar klein ($0.02 \text{ kg}/(\text{capita} \cdot \text{a})$), denn die Aufbereitung der meisten Schrotte erfolgt im nahen Hinterland (Deutschland, Italien, Frankreich). Vom heutzutage in der Schweiz anfallenden Altschrott (ohne industrielle Produktionsschrotte) werden über 70 % recycelt. Diese Menge von $4.1 \text{ kg}/(\text{capita} \cdot \text{a})$ gelangt in den Prozess „Handel und Produktion“ und wird grossteils exportiert. Zusätzlich wird fast die gleiche Menge an Altschrott im Ausland eingekauft und mit nur geringen Aufbereitungsstufen (zum Beispiel Sortieren) als Schrott exportiert. Der Schrottexport ($7.4 \text{ kg}/(\text{capita} \cdot \text{a})$) ist damit nahezu so gross wie die Kupfermengen in den exportierten Gütern ($> 8 \text{ kg}/(\text{capita} \cdot \text{a})$).

Die Kupfermenge in den Umweltkompartimenten liegt eine Grössenordnung unterhalb jener in den Deponien und bleibt damit aus Ressourcensicht auch mittelfristig nachgeordnet. Der grösste Input stammt aus den Pestiziden, die gegenüber dem III. Quartal bereits vermindert sind, und aus dem *run-off* der Blechdächer. Hier sind zusätzliche Regulierungen erforderlich, um die Umweltkompartimente zu schützen. Die Abriebmengen aus den Fahrzeugbremsen und den Bahnoberleitungen sind vernachlässigbar klein (10 % der Immissionen), wengleich sie lokal entlang der Verkehrswege problematisch sein können.

Entwicklung des Kupferhaushaltes

Das Modell *Cuprum* bildet den Kupferhaushalt der Schweiz in seiner zeitlichen Entwicklung bis heute ab und nimmt eine Lagersättigung im 21. Jahrhundert an. Dabei wachsen die Kupferumsätze im System seit Beginn des 20. Jahrhunderts pauschal an. Welches Wachstum bzw. welche Input-Flüsse (Güter bzw. Produkte) das System dominieren, hängt vom Betrachtungszeitpunkt ab. Da sich die Wachstumskurven der Hauptlager in ihrer Form ähneln, werden die Wende-Zeitpunkte und die (maximale) Wachstumsrate α letztlich zu Schlüsselparametern des Wachstums.

Der grösste Anstieg der Kupferumsätze ist im IV. Quartal zu beobachten. Die dominierenden Flüsse sind die Kupfermengen in den Handel und in die Produktion/Bearbeitung, von denen nur knapp 20 % in die Hauptlager der Schweiz gelangen, zum Konsumenten. Ungefähr die Hälfte des Kupfers wird nach einer Veredelung in Gütern exportiert. Der Exportschrott wird maximal zur Hälfte von den eigenen Altschrotten genährt, das bedeutet der grössere Teil sind Neuschrotte oder Handelsschrotte (das sind Direktexporte, die nur zum Handel importiert werden).

Während des Stättigungsvorgangs der Hauptlager wachsen die Lager in den Deponien und den Umweltkompartimenten beständig an (Abb. 5-32, Abb. 5-33). Bei gleichbleibenden Ablagerungsraten erfährt das System im 21. Jahrhundert:

- eine Verfünffachung der Kupferlager in den Deponien von ca. $50 \text{ kg}/\text{capita}$ auf $250 \text{ kg}/\text{capita}$, das bedeutet ca. $2 \text{ kg}/(\text{capita} \cdot \text{a})$
- eine Verdreifachung der Kupfermengen in der Umwelt von ca. $5 \text{ kg}/\text{capita}$ auf $15 \text{ kg}/\text{capita}$, das bedeutet ca. $0.1 \text{ kg}/(\text{capita} \cdot \text{a})$

In Zukunft werden die Transitionsländer und die Länder der dritten Welt einen Lebensstandard anstreben, der demjenigen in den Industrieländern gleichkommt. Wenn man nun mittelfristig (wenige Generationen) den Menschen in allen Ländern den gleichen Lebensstandard zugesteht, dann würden sich auch die Lager und Lageroutputs pro Kopf annähern. In diesem Fall wachsen die Umsätze derart, dass – bei gleicher Trenntechnik wie in der Schweiz zu Ende des 20. Jahrhunderts – jährlich mehr als 15 Megatonnen Kupfer in die Deponien gelangen (zum Vergleich: Die primäre Kupfergewinnung im Jahr 2000 betrug 13 Megatonnen). Daraus folgt ein dringender Handlungsbedarf in beiden Bereichen: zur Minderung der Rohstoffverluste und des Umweltbelastungspotentials.

Versorgungsgrad

Die vergangenen Jahrzehnte waren durch Wachstum geprägt. Eine regionale Selbstversorgung mit Rohstoffen, wie sie in Kriegs- und Mangelzeiten auf nationaler Ebene angestrebt wurde, ist heute nicht vonnöten. Es geht im Zeitalter der Globalisierung vielmehr darum, dass jede Region dauerhaft

die Möglichkeit behält, mit den eigenen Primär- und Sekundärressourcen Produkte zu erzeugen, die für regionale Mangelprodukte als Tauschobjekte abgegeben werden können (IMBODEN und BACCINI 1996). In diesem Sinne ist die Betrachtung des *Versorgungsgrades der Region* von Kupfer als Baustein eines nachhaltigen Handels mit andern Regionen zu sehen (HUG 2002). Der VG sagt allerdings nichts über den Handelsumfang der Region mit ihrem Hinterland oder über ihre wirtschaftliche Unabhängigkeit im engeren Sinne aus¹⁵⁴.

Für Länder ohne Primärressourcen übertrifft während der Wachstumsphase der anthropogenen Lager der Bedarf das Angebot, so dass der Versorgungsgrad niedrig ist ($VG < 1$). Mangels geogenem Erzabbau gilt: Nur wenn die Lager abnehmen, kann der Ressourcenbedarf der Region trotz Rezyklierverlusten gedeckt und schliesslich überzähliges Material exportiert werden ($VG > 1$). Der VG der Schweiz wächst aufgrund des Aufbaus an Sekundärressourcen an und erreicht schliesslich das Sättigungsniveau von 0.8 (Abb. 5-39). Die Abnahme zwischen 1930 und 1970 ist in der überdurchschnittlich starken Zunahme des Infrastruktur-Inputs begründet, der nicht zeitgleich durch die Rezyklierflüsse gedeckt werden kann. Ursache für den relativ niedrigen Sättigungswert sind die Deponieverluste (hier ab 2000: Deponieverlust der Mobilien und des Rückbaus von 60 % bzw. 10 %). Erst wenn die Abfallwirtschaft günstigere technische Trennleistungen gewährt, steigt der Versorgungsgrad weiter an.

Einfluss der Lebensdauer

Bei gegebenen Wachstumskurven der Hauptlager sind die Lebensdauern der Güter $\tau \pm \sigma$ entscheidende Parameter für die Dynamik der Flüsse aus ihren Lagern heraus und in sie hinein (VAN DER VOET *et al.* 2000): Geringere Lebensdauern führen generell zu hohen Kupferumsätzen im System, hohe Lebensdauern zu niedrigen Umsätzen. Im kalibrierten Modell betragen die Lebensdauern – gemäss Plausibilitätsüberlegungen zu den Gütern und Produktgruppen – für die Immobilien 40 ± 20 a, für die Mobilien 14 ± 7 a und für die Fahrzeuge (Mobilien) 10 ± 5 a. Längere Lebensdauern führten bei der Kalibrierung nicht zur gewünschten Übereinstimmung bezüglich der Importmengen, insbesondere wären die Mengen an Immobiliengütern und Halbzeug/Rohstoffen zu gering (14,15).

Zur Zeit ist vor allem bei den Mobilien ein Trend zur Lebensdauerverkürzung festzustellen, da die Innovationszyklen in einigen technischen Bereichen geschrumpft sind. Eine mögliche Strategie zur Ressourcenbewirtschaftung ist daher die Verlängerung der Lebensdauer. Zur Untersuchung des Einflusses der Lebensdauern wird zur Sensitivitätsanalyse je eine Variante mit längeren bzw. kürzeren Lebensdauern für den Zeitraum 2000 bis 2100 berechnet (Immobilien 60 ± 20 bzw. 30 ± 10 , Mobilien 20 ± 7 bzw. 10 ± 7). Die folgenden Abbildungen zeigen die direkten Auswirkungen auf die Inputs und Outputs der Hauptlager (die oberen Kurven entsprechen der verkürzten Lebensdauer), wobei Prozessinput und -output jeweils vertikal angeordnet sind (Abb. 5-45 bis Abb. 5-50).

Die Outputs (untere Kurven) verlaufen regelmässiger als die Inputs (obere Kurven), da scharfe Mengenausschläge durch die normalverteilten Lebensdauern „verwischt“ werden. Weiter ist zu erkennen, dass die Lagerinputs und -outputs der Immobilien durch das Verändern der Lebensdauer in eine gedämpfte Schwingung geraten. Infolge des doppellogistischen historischen Kurvenverlaufs ist dies bei der Infrastruktur intensiver der Fall als bei den Gebäuden. Demgegenüber gelangt das Mobilienlager kaum in Schwingung, da die Lebensdauer kürzer und deren Breite relativ grösser ist (BINDER, C. *et al.* 2001).

¹⁵⁴ Eine Region ohne Schmelzwerke exportiert die anfallenden Schrotte vollständig ins Hinterland und importiert die benötigten Mengen Rohkupfer oder Kupferwaren von dort. Trotz ausgeglichenem Versorgungsgrad ($VG \approx 1$) wäre eine Autarkie i.e.S. bzgl. dieser Ressource mangels Aufbereitungsmöglichkeiten nicht gegeben.

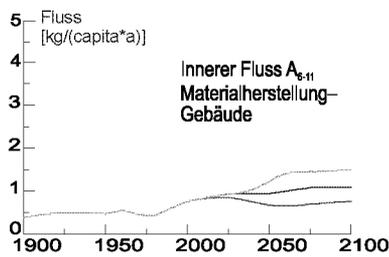


Abb. 5-45: Immobiliengüter aus der Produktion in Gebäude $A_{6-11}(t)$

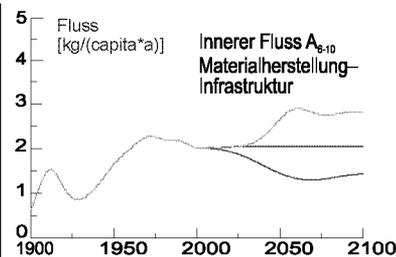


Abb. 5-46: Immobiliengüter aus der Produktion in Infrastruktur $A_{6-10}(t)$

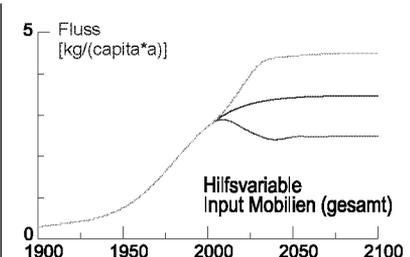


Abb. 5-47: Gesamtinput in Mobilen $A_{2-9}(t) + A_{3-9}(t) + A_{4-9}(t) + A_{6-9}(t) + I_1(t)$

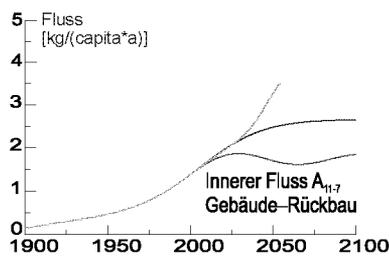


Abb. 5-48: rückgebautes Kupfer aus Gebäuden $A_{11-7}(t)$ (ohne Abrieb und Korrosion)

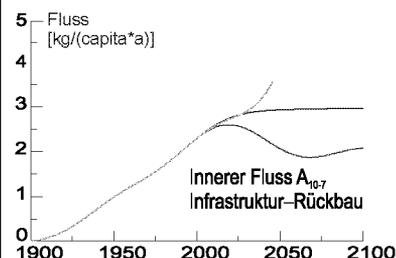


Abb. 5-49: rückgebautes Kupfer aus Infrastruktur $A_{10-7}(t)$ (ohne Abrieb und Korrosion)

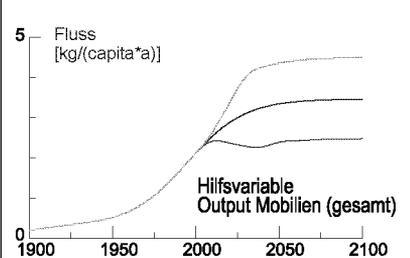


Abb. 5-50: Output aus Mobilen $A_{9-1}(t) + A_{9-6}(t)$ (ohne Abrieb)

Die Auswirkung der Lebensdauervariationen ist in den Input- und Outputflüssen der Hauptlager am stärksten, doch zeichnet sie sich vermindert auch bis zu den Im- und Exporten durch, beispielsweise beim Rezyklierfluss A_{7-6} (Abb. 5-51). Das einleuchtende Muster, dass grössere Lebensdauern der Güter zu geringeren Umsätzen und Flüssen führt, wird lediglich beim Halbzeug/Rohstoff-Fluss in die Produktion inklusive dem Importfluss (A_{5-6} und I_5) durchbrochen (Abb. 5-52 bzw. Abb. 5-53).

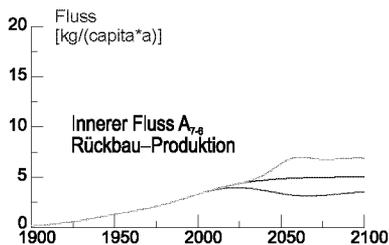


Abb. 5-51: Kupfer aus Rückbau in Produktion $A_{7-6}(t)$

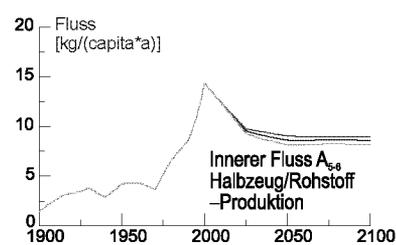


Abb. 5-52: Halbzeug/Rohstoff in Produktion bzw. Verarbeitung $A_{5-6}(t)$

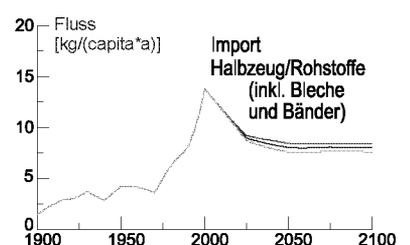


Abb. 5-53: Import Halbzeug/Rohstoff $I_5(t)$ (inkl. Bleche und Bänder)

Der Versorgungsgrad wird durch die Lebensdauer nur schwach beeinflusst, indem er schwach zeitverzögert oder beschleunigt einsetzt (Abb. 5-54). Anders bei dem Nutzungsverlust (Summe aus Mobilen und Rückbau in Deponie), der bei Verkürzung der Lebensdauer innerhalb 30 bis 40 Jahren um über 0.5 kg/capita (das sind ca. 25 %) wächst und bei Verlängerung der Lebensdauer gleichsam schrumpft (Abb. 5-55). Der Unterschied zwischen den beiden Varianten (Faktor zwei) bewirkt einen entsprechend grossen Unterschied im akkumulierten Nutzungsverlust (Abb. 5-56).

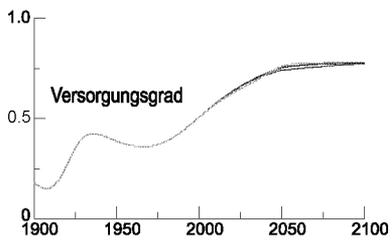


Abb. 5-54: Versorgungsgrad der Region VG(t)

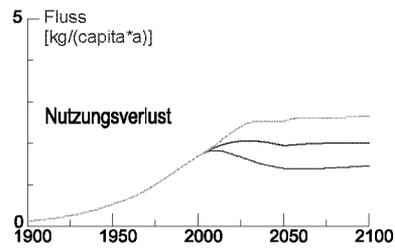


Abb. 5-55: Nutzungsverlust NV(t)

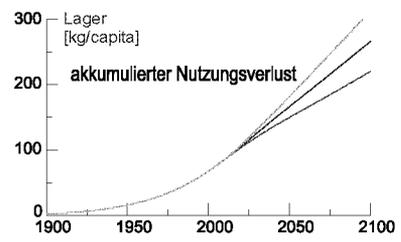


Abb. 5-56: akkumulierter Nutzungsverlust

5.5 Szenarien zum Umbau des Gebäudebestandes

In den vorangegangenen Kap. 5.1 bis 5.4 ist die mathematische Schlüssigkeit von eigenen Lagererhebungen und bekannten Systemvariablen (Vergleichsvariablen) hergeleitet worden. Auf diesem Fundament sind nun Szenarien möglich, die etwaige künftige Entwicklungen der Lager hinsichtlich Konsequenzen auszuleuchten vermögen.

Nach der vorliegenden Untersuchung ist der Gebäudebestand ein grosses Lager der Sekundärressource Kupfer, wobei der Nutzungstyp einen relevanten Einfluss auf die Kupfergehalte hat (Abb. 3-8). Da bei den Gebäuden im Vergleich zur Infrastruktur ein Umbau zudem leichter durchführbar ist und sich der Bestand auch aktuell in Umbau befindet (Erweiterungsbauten, Abrisse, Ersatzneubauten, Gebäudeumbauten, Renovationen, Sanierung), beziehen sich die beiden Szenarien in diesem Kapitel darauf.

Aufgrund der einschneidenden strukturellen Änderungen im Arbeitsbereich wird eine Umnutzung der Produktionsgebäude vollzogen. Bereits heute sind in urbanen Regionen beträchtliche Flächen ungenutzt. Ziel der Stadtplanung ist zunehmend, diese Brachflächen kontrolliert in genutzten Raum zu überführen und wenn möglich die umliegenden Areale durch Verdichtung der Konversionsfläche aufzuwerten (VALDA und WESTERMANN 2004; GENSKE 2003). Diese Umnutzung als Mehrfamilienhaus (Szenario I) oder Dienstleistungsgebäude (Szenario II) erfordert einen entsprechenden technischen Umbau. Sofern es die künftige Nutzung zulässt, bleibt der Rohbau erhalten. Die Bauteile des Ausbaus, in denen das Kupfer gelagert ist, werden beim Umbau (Gebäudeumbau, Renovation, Sanierung) vollständig ersetzt.

„Status quo“

Auch ohne weitere Gebäudebestandsänderungen befindet sich der aktuelle Gebäudebestand bezüglich des Ausbaus in ständiger Renovation. In der Regel werden dabei die Gewerke auf- bzw. nachgerüstet. Die Zunahme der Kupfergehalte beschränkt sich auf jene Gebäudeteilbestände, die vom Umbau betroffen sind. Das Kupferlager in den Mehrfamilienhäusern und Produktionsgebäuden wächst dabei bis zum Jahr 2025 voraussichtlich von ca. 295'000 t auf 320'000 t (Abb. 5-58), das der Dienstleistungs- und Produktionsgebäude von ca. 225'000 t auf 240'000 t (Abb. 5-60).

5.5.1 Szenario I

Umbau der Produktionsgebäude (PRG) in Mehrfamilienhäuser (MFH) – Szenario Ia

Eine Möglichkeit der Umnutzung ist die Umwandlung von PRG in Wohnraum, also MFH. Wegen der grosszügigen Grundrissform und Zimmergrösse, die unter Beibehaltung des Rohbaus von Fabriketagen entstehen, sind derartige Wohnungen, so genannte „Lofts“, modern geworden. Welchen Einfluss hat ein solcher Umbau auf die Stofflager der urbanen Region?

Zur Vereinfachung wird ein vollständiger Umbau angenommen.

Gegenüber den PRG haben die MFH höhere Kupfergehalte (KG) sowohl im Dach als auch in der Haustechnik. Gemäss Kap. 3.2.2 werden die niedrigen Kupfergehalte der PRG (im Dach 0.40 kg/m² DF, in der Haustechnik 0.21 kg/m² BGF) durch den Umbau zu MFH entscheidend erhöht. Wandelt man die gesamten PRG innerhalb 25 Jahren in MFH um und stattet sie mit der durchschnittlichen Ausrüstung des IV. Quartals aus (KG im Dach 0.64 kg/m² DF und in der Haustechnik 0.37 kg/m² BGF), bedeutet dies nahezu eine Verdoppelung der Kupfergehalte in den (ursprünglichen) PRG. Dieser Umbau würde schliesslich ein Wachstum der Lager der beiden Teilbestände (MFH+PRG) auf 390'000 t bewirken.

Diese Rechnung basiert auf der Fortführung der Einflussfaktoren vom IV. Quartal, doch die Schwankung manches Einflussfaktors ist zu stark, als dass man sie vernachlässigen könnte. In diesem Fall gilt dies besonders für die einflussreiche Produktgruppe *Heizungsrohre(Fläche)*. Der zur Berechnung eingesetzte (Durchschnitts-)Wert für die Häufigkeit $f_{M_{\text{Heizung(Fläche)}}$ beträgt 0.40 (Abb. 5-57).

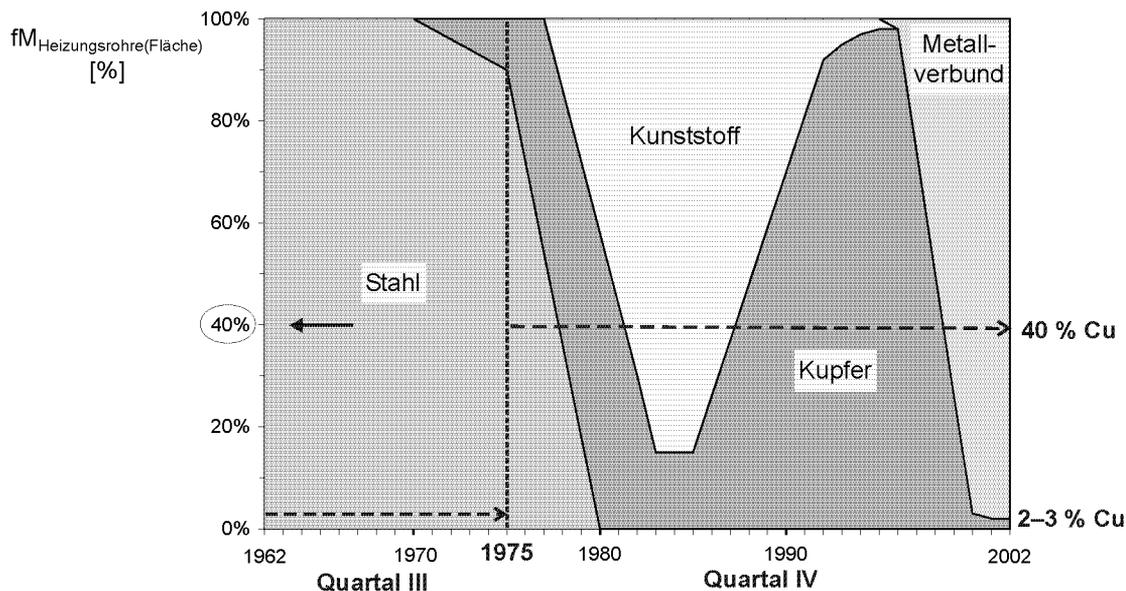


Abb. 5-57: Marktanteile verschiedener Rohrmaterialien bei der Installation von Flächenheizungen seit deren Einführung (Zeitraum 1962 bis 2002). Eingetragen in die Abbildung, die eine Modifikation der Abb. 3-21 ist, sind die durchschnittliche Häufigkeit f_M und jene Häufigkeit zum Zeitpunkt 2002.

An diesem Beispiel sei die Bedeutung der historischen Kupfergehalte aufgezeigt, da man erst durch Berücksichtigung der zeitlichen Komponente ein detaillierteres Bild erhält: Tatsächlich schwankt der Marktanteil der Kupferrohre im IV. Quartal innerhalb weniger Jahre um den Faktor 50 (zwischen $\geq 98\%$ und $\leq 2\%$, vgl. Abb. 5-57). Entscheidend ist, dass die Häufigkeit $f_{M_{\text{Heizung(Fläche)}}$ zu Ende des 20. Jahrhunderts nur noch ca. 2 % beträgt, und auch wenn eine Prognose gerade wegen der Schwankungen schwierig ist, bleibt diese Häufigkeit f_M – aus technisch-ökonomischen Gründen – vermutlich in einem Bereich $\leq 5\%$. Bei den Umnutzungen wird diese verminderte Häufigkeit für die Renovationen einzusetzen sein, und nicht der Durchschnittswert des IV. Quartals, so dass sich der $KG_{\text{Heizung(Fläche)}}$ entsprechend auf den zwanzigsten Teil vermindert. Durch Berücksichtigung der aktuellen Implementierungspraxis ($f_M = 2\%$) erhält man das Ergebnis für den Zuwachswert von ca. 50'000 t (anstatt einer Zunahme von ca. 95'000 t unter der Annahme $f_M = 40\%$). Bezogen auf das gesamte aktuelle Kupferlager in Gebäuden (568'000 t, Abb. 3-9) verursacht das Umbauszenario also eine Zunahme von knapp 10 % (Tab. 5-2).

Entfernung des Kupfers aus dem Aussenbereich der Umnutzungen – Szenario Ib

Über die werterhaltenden und -steigernden Massnahmen wie Renovation bzw. Umbau hinaus wird oft auch ein „strategischer Umbau“ propagiert (BACCINI und OSWALD 1998), der zusätzliche Stoffströme induziert, die über die heute üblichen Stoffströme hinausgehen. Bezogen auf Kupfer werden wegen des Umwelteintrags in der Schweiz Massnahmen diskutiert, die den Einsatz von Blechen im Aussenbereich wesentlich einschränken können (vgl. Kap. 4.6). Welcher Einfluss ist nun zu erwarten, wenn man für die beschriebenen Umnutzungen von PRG zu MFH den Gebäudeumbau bzw. die Renovation nutzen würde, auch den Aussenbereich umzugestalten und dabei Kupfer konsequent zu vermeiden? In diesem Fall bleibt die Dachfläche der MFH zur Berechnung unverändert, doch die 76'000 t, die im Dach durch Aufrüstung umgenutzter PRG anfallen würden, entfallen ersatzlos (Tab. 5-2). Die Outputs aus dem Gebäudelager übersteigen damit die Inputs um voraussichtlich ca. 21'000 t, und das Kupfer-

lager in den Gebäuden wird durch den Netto-Export trotz der Umbaumaassnahmen in den anderen Gebäudeteilbeständen verringert. Der Versorgungsgrad steigt durch diese Massnahme kurzfristig an. Diese beiden langfristigen Massnahmen – Umnutzung eines Gebäudeteilbestandes sowie Ausschluss der Kupfernutzung in einem Bauelement (Szenarien la und lb) – lassen sich so direkt miteinander vergleichen (Tab. 5-2; Abb. 5-58). Das Kupferlager in den Gebäuden würde bei einer fortlaufenden Entwicklung des *Status quo* bis 2025 um 4 % zunehmen. Durch die Umnutzung der PRG zu MFH würde die Lagerzunahme auf 10 % erhöht, also mehr als verdoppelt. Eine gleichzeitige Kupferverminderung im Dach (Szenario lb) würde diese Lagerzunahmen mehr als ausgleichen: Es wäre eine Netto-Lagerabnahme im Gebäudebereich von bis zu 5 % zu erwarten.

Tab. 5-2: Auswirkung der Szenarien la und lb auf das Kupferlager in den Gebäuden der Schweiz bis zum Jahr 2025. Zum Vergleich ist die Variante „*Status quo*“ angegeben, bei der die Entwicklung ohne gezielte Eingriffe fortschreitet. Angabe der absoluten Netto-Veränderungen im Vergleich zu heute. Die Prozentangabe beschreibt, wie gross die Veränderung gegenüber dem heutigen Gesamtlager in den Gebäuden ist.

Lagerveränderungen bis 2025	M _{MFH} +M _{PRG} (2000)	Absolute und relative Netto-Veränderung vs. heute, 568'000 t
	297'000 t	
„ <i>Status quo</i> “	MFH 219'000 t + PRG 99'000 t <hr/> 318'000 t	Zunahme +21'000 t (+4 %)
Szenario la Umnutzung PRG→MFH Kupfernutzung im Aussenbereich wie bisher	MFH, neu 351'000 t	Zunahme +54'000 t (+10 %)
Szenario lb Umnutzung PRG→MFH kein Kupfer im Aussenbereich der Umnutzungen	MFH, neu 351'000 t - Dach(PRG) 76'000 t <hr/> 275'000 t	Abnahme -22'000 t (-4 %)

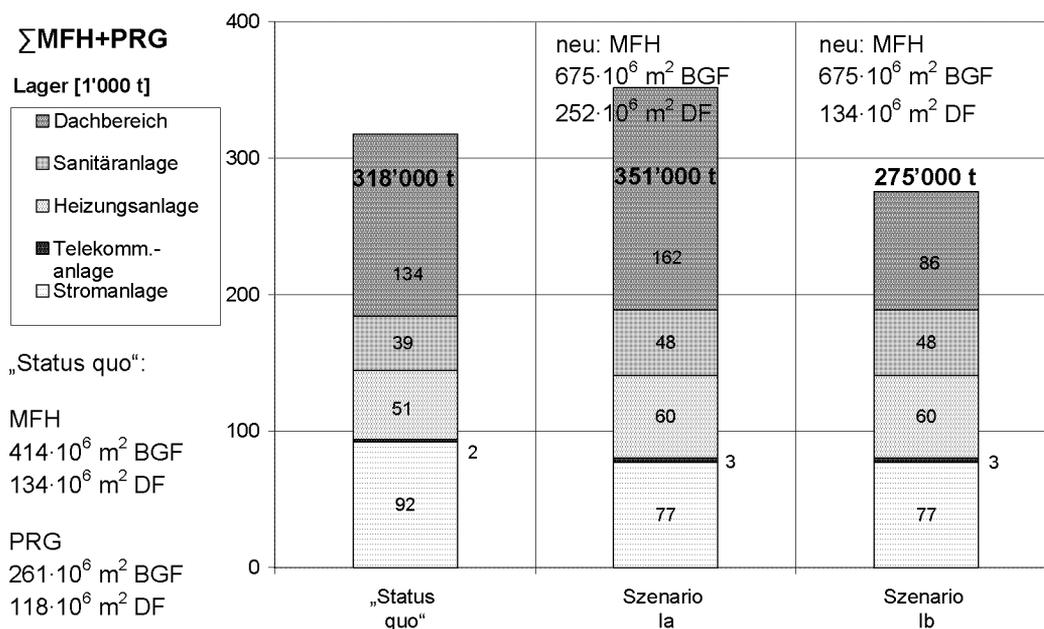


Abb. 5-58: **Szenarien la und b** – Transfer des Kupferlagers durch Umnutzung aller Produktionsgebäude (PRG) in Mehrfamilienhäuser (MFH) (ohne Darstellung der EFH und DLG). Dargestellt sind die Variante „*Status quo*“ und die beiden Szenarien eines kompletten Umbaus der PRG in MFH (Ausbau auf Stand 2000) (Szenario la) bzw. **zusätzlicher** Vermeidung des Kupfers im Aussenbereich (Szenario lb). Die Berechnung basiert auf der Annahme, dass keine zusätzlichen Neubauten erstellt werden und die umgenutzten und renovierten Gebäude den aktuellen Ausstattungsgrad (hier: Kupfergehalt KG) implementieren.

Die bisherige Darstellung beschreibt die Netto-Lageränderungen, um vom „*Status quo*“ zu den Szenarien zu kommen. Zur Beurteilung, inwieweit der Kupferhaushalt und seine Akteure tatsächlich durch die Szenarien beeinflusst würden, wäre daneben auch eine Untersuchung der Brutto-Lageränderungen (Umsatzmengen) bzw. der resultierenden Flüsse erforderlich, die dem Übergang zwischen dem „*Status quo*“ und dem Szenario I zugrunde liegen (Abb. 5-58). Sie sind in Abb. 5-59 dargestellt. Der Mehrwert dieser Darstellung wird beispielsweise beim Kupferumsatz in den Stromanlagen deutlich, wo über 30'000 t eingebaut und 45'000 t ausgebaut werden, doch in Abb. 5-58 ist nur die Netto-Abnahme von 15'000 t ersichtlich.

Legt man für den Umbau eine Zeitspanne von 25 a bis zum Erreichen der Umnutzung der PRG in MFH zugrunde (Szenario I), so würden die Input- und Outputflüsse der Gebäude (Hilfsvariablen X_{60} bzw. X_{67}) rechnerisch wie folgt anwachsen:

- durch die Umnutzung der PRG werden ca. 99'000 t Kupfer frei. Bei gleichmäßigem Ausbau steigt dadurch der jährliche Lageroutput (Schrottmenge) aus den Gebäuden um fast 40 % gegenüber dem Stand 2000.
- durch den Umbau zu MFH werden zusätzlich ca. 132'000 t Kupfer eingebaut (Szenario Ia), bei Vermeiden des Kupfers im Aussenbereich immerhin noch 57'000 t (Szenario Ib). Bei gleichmäßigem Einbau steigt dadurch der jährliche Lagerinput (Kabel, Rohre etc.) um ca. 29 % (Szenario Ia) bzw. 13 % (Szenario Ib) an.

Deutlich ist erkennbar, dass die zusätzlichen Schrotte überwiegend in Form von Blechen und Kabeln anfallen werden und nur vermindert als Rohre und Armaturen (Abb. 5-59).

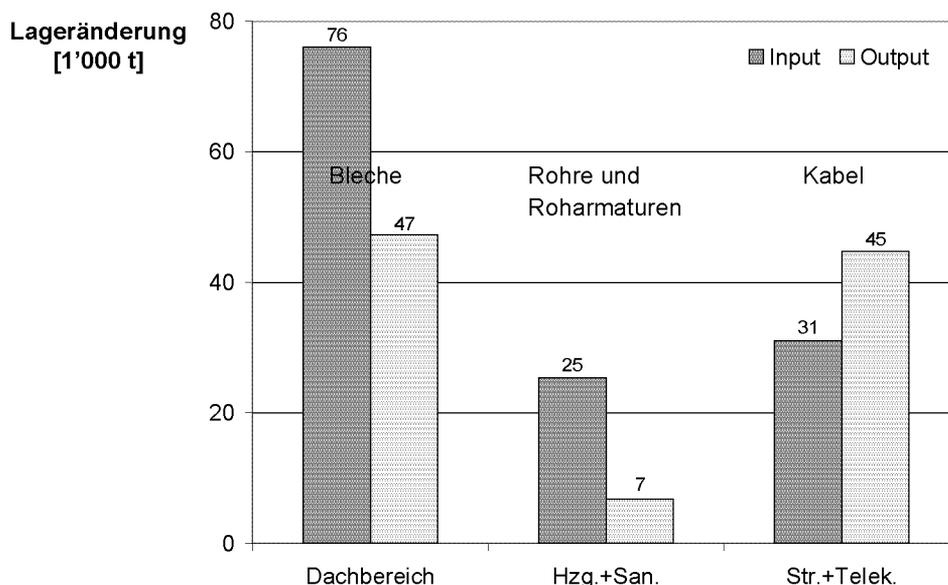


Abb. 5-59: Lageränderungen beim Übergang vom „*Status quo*“ hin zu Szenario I, aufgegliedert in die Funktionsbereiche Dachbereich, Heizungs- und Sanitäranlage (Hgz.+San.), Strom- und Telekommunikationsanlage (Str.+Telek.). Die Inputs und Outputs sind separat dargestellt. Zusätzlich sind die dominanten Produktgruppen eingetragen. Gegenüber Szenario Ia entfällt bei Szenario Ib der Lagerinput in das Dach (Säule am linken Rand: 76'000 t).

5.5.2 Szenario II

Umbau der Produktionsgebäude (PRG) in Dienstleistungsgebäude (DLG)

Die andere Möglichkeit der Umnutzung ist die Umwandlung der PRG in Geschäftsraum, also DLG. Die Kupfergehalte in DLG sind in allen Produktgruppen höher als in PRG (Ausnahme: *Blitzableiter*), und bezogen auf die Bezugsflächen gilt dies auch gegenüber den MFH (Tab. 3.14). Demnach ist die

Lagerzunahme bei einer Umnutzung der PRG zu DLG noch grösser als bei der Umnutzung zu Wohnraum (vgl. Szenario I, Kap. 5.5.1).

Durch Umnutzung der PRG zu DLG erhält man unter analogen Annahmen wie in Szenario I folgende Werte (Abb. 5-60):

Bei einfacher Entwicklung in der Variante „Status quo“ wächst das Kupferlager in den Gebäuden bis 2025 um ca. 3 % (Tab. 5-3). Ein Umbau der PRG zu DLG würde eine Zunahme um 120'000 t bewirken, das entspricht einer Zunahme um 21 %. Selbst bei Verzicht auf Kupferanwendungen im Aussenbereich würde der Zuwachs noch 6 % betragen.

Tab. 5-3: Auswirkung der Szenarien IIa und IIb auf das Kupferlager in den Gebäuden der Schweiz bis zum Jahr 2025. Zum Vergleich ist die Variante „Status quo“ angegeben, bei der die Entwicklung ohne gezielte Eingriffe fortschreitet. Angabe der absoluten Netto-Veränderungen im Vergleich zu heute. und Die Prozentangabe beschreibt, wie gross die Veränderung gegenüber dem heutigen Gesamtlager in den Gebäuden ist.

Lagerveränderungen bis 2025	M _{DLG} +M _{PRG} (2000)	Absolute und relative Netto-Veränderung vs. heute, 568'000 t
	225'000 t	
„Status quo“	DLG 142'000 t + PRG 99'000 t 241'000 t	Zunahme +16'000 t (+3 %)
Szenario IIa Umnutzung PRG→DLG Kupfernutzung im Aussenbereich wie bisher	DLG, neu 345'000 t	Zunahme +120'000 t (+21 %)
Szenario IIb Umnutzung PRG→DLG kein Kupfer im Aussenbereich der Umnutzungen	DLG, neu 345'000 t - Dach(PRG) 85'000 t 260'000 t	Zunahme +35'000 t (+6 %)

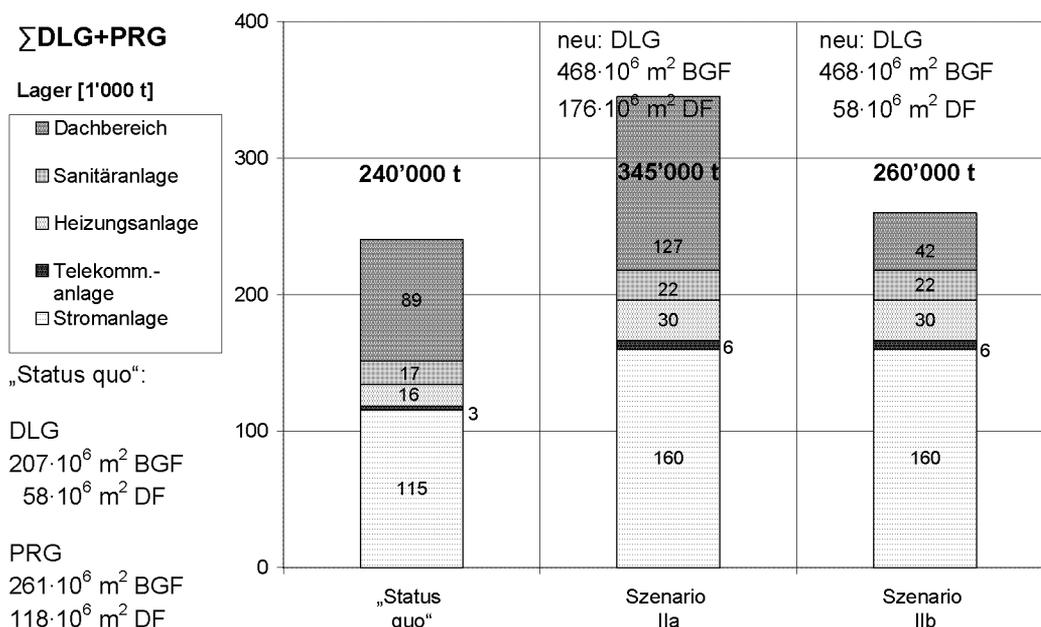


Abb. 5-60: **Szenarien IIa und IIb** – Transfer des Kupferlagers durch Umnutzung aller Produktionsgebäude (PRG) in Dienstleistungsgebäude (DLG). Dargestellt sind die beiden Szenarien eines kompletten Umbaus der PRG in DLG (Ausbau auf Stand 2000)(Szenario IIa) bzw. **zusätzlicher** Vermeidung des Kupfers im Aussenbereich (Szenario IIb) gegenüber der Variante „Status quo“. Die Berechnung basiert auf der Annahme, dass keine zusätzlichen Neubauten erstellt werden und die umgenutzten und renovierten Gebäude den aktuellen Ausstattungsgrad (hier: Kupfergehalt KG) implementieren.

5.5.3 Diskussion der Szenarien

Die Szenarien zeigen einerseits, dass die Kupferlager in der Variante „*Status quo*“ wegen der Sättigung nur noch langsam wachsen. Andererseits wird auch deutlich, dass distinkte Eingriffe in das System den Stoffhaushalt nachhaltig beeinflussen können, insbesondere erfordert die Umnutzung der PRG zu DLG zusätzliche Kupfermengen von ca. 120'000 t bzw. 17 kg/capita (!). Die beiden Szenarien veranschaulichen die Rohstoffrelevanz des regionalen Umbaus anhand

- struktureller Änderungen im Arbeitsbereich (Wegfall von PRG) (Szenarien Ia/Ila) und/oder
- gezielter politischer Vorgaben – hier zum Umweltschutz (Szenarien Ib/Ilb).

Die beiden Szenarien Ia/b und Ila/b sind gewählt worden, um die Wirkung der beiden Massnahmen zu verdeutlichen. Wahrscheinlicher ist der Fall, dass die Umnutzungen von PRG weder ausschliesslich zu Gunsten der MFH noch der DLG erfolgen, sondern einer Kombination von beiden. Würde man bis 2025 die heutigen PRG halb zu MFH, halb zu DLG umnutzen, so wäre das Lager nahezu der Mittelwert der beiden Szenarien (I und II), da sich beide Zunahmen (DLG und MFH) halbieren. Je deutlicher die Umnutzung zugunsten der DLG verläuft, desto bedeutsamer ist der Mehrbedarf an Kupfer zu erwarten (Abb. 5-61, Abb. 5-62).

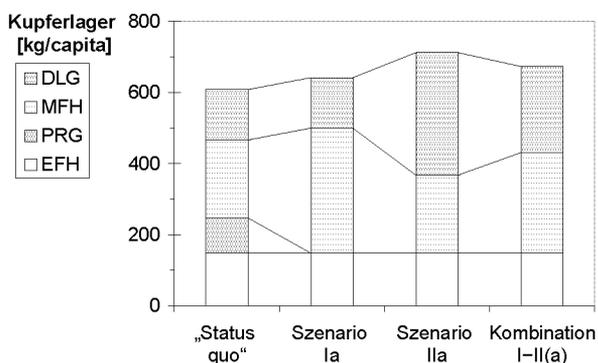


Abb. 5-61: Endstadien (2025) der Kupferlager im Gebäudebestand der Schweiz: „*Status quo*“ und Szenarien nach Umnutzung der Produktionsgebäude **ohne** Entfernung des Kupfers aus dem Aussenbereich: Umbau zu Mehrfamilienhäuser (Szenario Ia) bzw. zu Dienstleistungsgebäude (Szenario Ila) sowie in Kombination I-II(a).

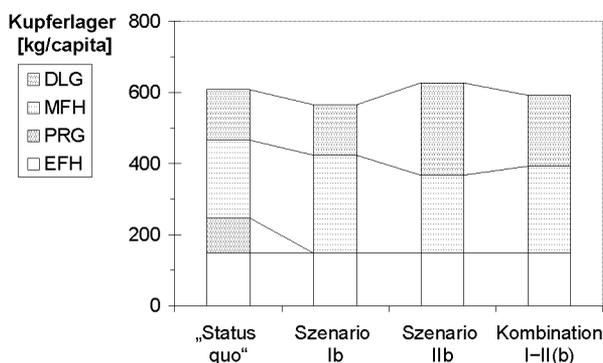


Abb. 5-62: Endstadien (2025) der Kupferlager im Gebäudebestand der Schweiz: „*Status quo*“ und Szenarien nach Umnutzung der Produktionsgebäude **mit** Entfernung des Kupfers aus dem Aussenbereich: Umbau zu Mehrfamilienhäuser (Szenario Ib) bzw. zu Dienstleistungsgebäude (Szenario Ilb) sowie in Kombination I-II(b).

Es ist ferner zu erwarten, dass die Umnutzung entgegen der vereinfachenden Annahme nicht vollständig erfolgt. Trotzdem zeigen die Szenarien auf, welcher Art von Änderungen die urbanen Lagerstätten in welchem Umfang ausgesetzt sind. Von der Seite der Produktion und des Rohstoffhandels wäre zu prüfen, wie auf solche Entwicklungen reagiert werden könnte.

Mit der Grösse und Lokalisierung der Lager ändert sich auch deren Emissionspotential. Im vorliegenden Ansatz werden die Emissionen aus dem Dach über einen Proportionalitätsfaktor berücksichtigt, so dass die Emissionen mit dem Lager im Dach korrelieren. Damit lässt sich das Emissionspotential für die verschiedenen Szenarien darstellen (Abb. 5-63).

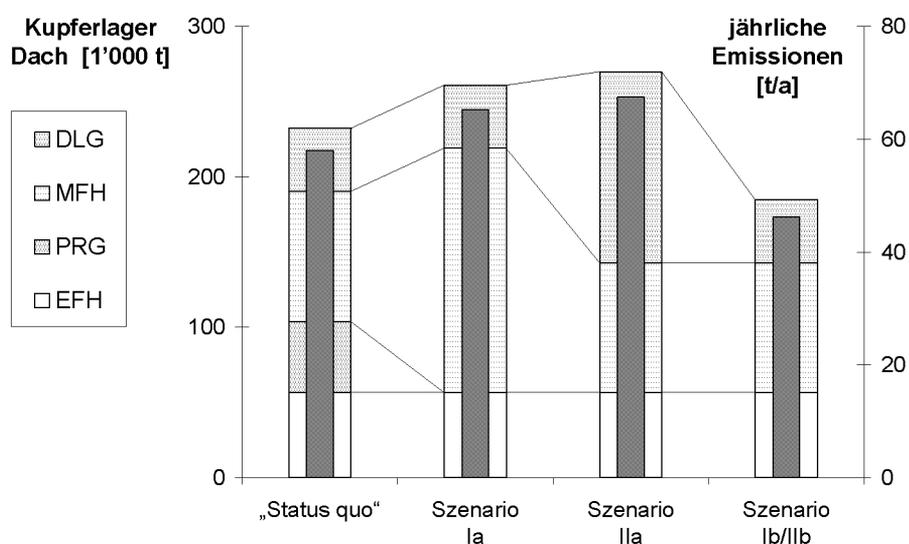


Abb. 5-63: Kupferlager im und jährliche Emissionen aus dem Dach des Gebäudebestands der Schweiz: Zustand in den Endstadien (2025) der Variante „Status quo“ und nach Umnutzung der Produktionsgebäude: Umbau zu Mehrfamilienhäuser (Szenario Ia), Umbau zu Dienstleistungsgebäude (Szenario IIa) und Verzicht auf Kupfer im Aussenbereich (Szenario Ib/IIb). Die jährlich zu erwartenden Emissionen sind für die verschiedenen Zustände jeweils durch die dunklen Balken angezeigt (rechte Ordinatenachse).

Die Umnutzung der Produktionsgebäude zu Mehrfamilienhäuser oder Dienstleistungsgebäude bewirkt also eine Zunahme der Emissionen im Aussenbereich um ca. 12 % bzw. 16 %, ein gleichzeitiger Verzicht auf den Einsatz von Kupferblechen hat hingegen eine Emissionsabnahme von ca. 21 % zur Folge (Abb. 5-63).

5.5.4 Ausblick zur dynamischen Modellierung

Die Treffsicherheit des Modells *Cuprum* kann durch weitere Kenntnisse über die Entwicklungen der Hauptlager bei Bedarf angepasst bzw. aktualisiert werden, namentlich durch Kenntnisse des Lagerverlaufs, der Transferfunktion, der Lebensdauerverteilung und ihrer Unsicherheit. Der Aufwand für die Anpassung des Modellansatzes ist – abgesehen von der Datenbeschaffung – gering im Vergleich zum Aufbau des Modells (schätzungsweise < 10 %).

Die Szenarien sind bisher in einer vereinfachten mathematischen Form bearbeitet („stationär“). Für die oben beschriebenen Fragestellungen ist eine Berechnung mit dem dynamischen Modell (Kap. 5.1 bis 5.4) durchzuführen, um den **zeitlichen Verlauf** der Variablen und der Bewertungskriterien in Abhängigkeit der Szenarienannahmen zu ermitteln. Technisch ist dafür also der Modellansatz an die Fragestellung obiger Szenarien anzupassen. Es wäre daraus die Wirkung der Szenarien in Bezug auf das Lagerverhalten der Umweltkompartimente und der Deponien sowie deren jährliche Belastung (Input-Flüsse) ableitbar. Zudem ergäben sich verlässlichere Hinweise auf kupferbedingte soziale und wirtschaftliche Auswirkungen (zum Beispiel bezüglich Arbeitsplätze etc.).

Das Modell *Cuprum* kann neben dem Nachzeichnen des historischen Kupferhaushalts und der Szenarienberechnung auch zur Lösung anderer konkreter Fragen zum Kupferhaushalt eingesetzt werden. Folgende Fragen drängen sich auf und erlauben eine Betrachtung durch eine Parametervariation, konnten jedoch aus Zeitgründen in der vorliegenden Arbeit nicht bearbeitet werden:

- Welche Änderungen im Kupferhaushalt bewirkt im Gebäudelager der Übergang zum „MinergieP-Standard“, bei dem keine Heizungs- und Kühlungsanlagen, aber mehr Lüftungen erforderlich sind?
- Wie verändert sich der Versorgungsgrad durch höhere Rezyklierungsraten des Rückbaus und der Mobilien (Pf₁₄ bzw. Pf₁₁).
- Wie verändert sich der physische Aussenhandelsumsatz, wenn mehr Kupferschrott regionsintern aufbereitet wird (Pf₁₆), z.B. durch den Aufbau moderner Kupferelektroöfen?
- Welche Auswirkungen auf den Kupferhandel hat eine radikale Verlagerung der meisten Produktionsstufen in das Hinterland, so dass der Güterexport auf ein Minimum sinkt?
- Wie wirkt sich eine Zunahme des Direktimports (Gebäude und Infrastruktur, Pf₂₃ bzw. Pf₂₁) infolge grösserer Handelsverflechtung auf den Versorgungsgrad aus?
- Wie gross ist der Einfluss von Änderungen beim Einsatz von Pflanzenschutzmitteln (Pf₁₃) auf die Immissionen der Umweltkompartimente?

6 Schlussfolgerungen und Ausblick

6.1 Zur Methode der Exploration urbaner Lagerstätten

Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit zeigen, auf welche Weise die urbanen Lagerstätten eines Spurenstoffes im regionalen Rahmen lohnend exploriert werden können: Die urbanen Lagerstätten werden nach ihrem Aufbau untersucht. Der Charakterisierung (detaillierte Systemkenntnis) folgt die Erfassung (Datensammlung) der Lager. Entscheidend ist dabei die Unterteilung des Gesamtbestandes in homogene Teilbestände. Diese „Homogenisierung“ (hier: Schaffung von homogenen Teillagern) erfolgt auf verschiedenen Skalen und erfordert eine hohe „Tiefenschärfe“. Beispielsweise gilt es bei der Untersuchung des Lagers im Gebäudebereich, den Einfluss der Nutzungstypen (Gebäudetypen) herauszuschälen, doch auch jenen von Häufigkeit, Grösse und „Dichte“ der eingesetzten Produktgruppen. Aus der Arbeit wird deutlich, dass die massgeblichen Einflussgrössen im Allgemeinen durch eine bewusste oder unbewusste Auswahl des Stoffes bzw. der Produkte durch die Nutzenden bestimmt werden und dass weniger die technische Variationsbreite über die Lagergrösse entscheidet. Dies deutet darauf hin, dass bei Explorationen in anderen Regionen die Abweichungen von den schweizerischen Lagern stärker durch die gesellschaftlichen Unterschiede geprägt sind als durch technische Unterschiede.

Die urbane Kupferlagerstätte der Schweiz umfasst insgesamt 269 ± 31 kg/capita. Durch die modulare Erfassung ist die Zuordnung zu den verschiedenen Teillagern automatisch gegeben. Die Grösse einer urbanen Lagerstätte hängt von der heutigen und der historischen Nutzung ab sowie von dem Anteil der Rezyklierung, der Deponierung und der dissipativen Verluste. Die Eigenschaften der Lagerstätte, also die Zusammensetzung durch verschiedene Produktgruppen und deren Alter, hängen zusätzlich von den Aufenthaltszeiten der Güter ab.

Aus der Zusammenschau der Exploration urbaner Lagerstätten von Spurenstoffen und Hauptstoffen lässt sich ableiten, dass sie unterhalb der Konzeptebene unterschiedlicher methodischer Schritte bedürfen (LICHTENSTEIGER 2006). Spurenstoffe weisen häufig kleinere Mengen in zahlreicheren Einsatzfeldern auf; im Gebäudebestand erfordern sie – im Gegensatz zu den Hauptstoffen – ein differenzierteres Bauteilkonzept als die Hauptstoffe, mehrere Bezugsflächen und sind zudem bereits bei Renovationen betroffen.

Zum Entwerfen des Explorationsvorgehens beschränkte sich die vorliegende Arbeit auf Kupfer als Material mit stark diversifizierten Einsatzfeldern. Wegen des Aufwands zur Charakterisierung der Einsatzfelder ist für Folgearbeiten eine kombinierte Exploration von Materialien sinnvoll, die ähnliche Funktionen wahrnehmen und sich gegenseitig substituieren können. Dabei kann auch die Komplementarität der Häufigkeiten dieser Materialien ausgenutzt werden, um Unsicherheiten zu verringern, indem beispielsweise die gesamte Dachfläche einer Region bekannt ist.

Ein wichtiger Bestandteil der urbanen Exploration ist die Validierung der Lagerergebnisse aus dem *bottom-up*-Ansatz durch die historische „Rohstoffgewinnung“ der Region in einem dynamischen Modell. In dieser Arbeit konnte dies über die Auswertung des Aussenhandels erreicht werden; im Allgemeinen ist zusätzlich der Rohstoffabbau aus den regionseigenen geogenen Lagern zu berücksichtigen. Sobald auch benachbarte Regionen exploriert sind, können mit Hilfe von Vergleichen (Pro-Kopf-Lager und -Flüsse, Versorgungsgrad) die Rollen der Regionen schärfer definiert werden, die sie beim Austausch der untersuchten Ressourcen miteinander einnehmen.

Mitentscheidend für die Genauigkeit des Ergebnisses sind die Kenntnisse über das Ausmass der dissipativen Verluste. Sind diese relativ gross oder nur ungenau bekannt, so ist eine Bestimmung des anthropogenen Lagers über die „Rohstoffgewinnung“ (siehe oben) nicht erfolgreich. Grosse kriegs-

oder katastrophenbedingte Zerstörungen in der Region wären eine weitere methodische Erschwernis wegen der teils übergrossen und unkontrollierten Stoffflüsse.

Durch die Kombination mit dem dynamischen Modell, in dem die *Lager* über die *Lebensdauern* mit den *Flüssen* verknüpft werden, erfahren die gewonnenen Kenntnisse über die Lagergrösse und -zusammensetzung einen entscheidenden Mehrwert zum Verständnis der zeitlichen Veränderungen im System. Denn die unterschiedlichen Lebensdauern in den verschiedenen Teillagern sind ausschlaggebend, welche Umsätze das System an welcher Stelle verzeichnet.

Die Möglichkeiten des dynamischen Modells *Cuprum* sind bisher noch nicht ausgereizt. Es ist nahe liegend, die Szenarien zur Gebäudebewirtschaftung mit Einsatz des dynamischen Modells zu untersuchen, so dass der zeitliche Verlauf der Versorgungs- und Entsorgungsflüsse deutlich wird (bisher wurde dieser Effekt gleichverteilt über den Zeitraum von 25 Jahren angenommen). Zudem können weitere Kenntnisgewinne nach Bedarf in den Modellansatz integriert werden, um die Unsicherheiten der Systemvariablen zu vermindern. Bisher wurde die historische Entwicklung des Lagers in der Infrastruktur aufgrund der knappen Datenlage nur grob rekonstruiert. Es ist anzustreben, diese durch Archivauswertungen bedeutender Elektrizitätsverteiler genauer zu analysieren. Dies gilt analog für die historische Entwicklung des Lagers in den Mobilien. Zudem könnte man durch Auswertung der Aussenhandelsstatistik die Anzahl der Stichproben erhöhen, so dass potentielle Ausreisserjahrgänge besser kontrolliert werden können, und zudem die Unsicherheit dieser Jahresmessungen ermitteln. Auf der Basis des dynamischen Kupferhaushaltsmodells sind Zukunftsszenarien zu berechnen, um Veränderungen im regionalen Umbau abzuschätzen. Die Ergebnisse sind ihrer hohen Auflösung wegen künftig auch nutzbar als wertvolle Datengrundlage für entropiebasierende Bewertungsmethoden (vgl. (RECHBERGER und GRAEDEL 2002)).

Das Ziel eines *urban mining* ist die planmässige Gewinnung von Sekundärressourcen und erfordert sowohl ihre Exploration als auch ihre Extraktion. Die urbane Exploration vermittelt die erforderlichen Kenntnisse über den Aufbau dieser Lagerstätten und unterstützt dadurch adäquat eine zielstrebige Ressourcenextraktion. Anschliessend wären die Beurteilung der Abbaufähigkeit und schliesslich die geeignete „Abbautechnik“ (Rückbauprozesse, Sammelsysteme usw.) hinsichtlich der Rohstoff-Extraktion qualitativ zu untersuchen und in den bisher aufgezeigten Ablauf zu integrieren. Hierfür sind erste Ansätze für eine Klassierung der Abbaufähigkeit urbaner Lagerstätten angedacht (HEDBRANT 2003).

6.2 Zum Entwurf einer Bewirtschaftungsstrategie

Zur Bewirtschaftung einer Ressource gehört die Kontrolle der Lager und Stoffströme. Für eine Verbesserung des Gesamtsystems genügt es nicht, den Verbrauch der Ressourcen pauschal zu verringern; es geht vielmehr um eine gezielte Steuerung der Stoffströme (BRAHMER-LOHSS *et al.* 2004). In manchen Fällen sorgt erst der physische Ausbau einer Anlage für einen vorteilhaften Betrieb. Für diejenigen Stoffe, die bezogen auf die geogenen Reserven in bedeutendem Anteil in die urbanen Lagerstätten transferiert werden oder bereits wurden, ist ein Haushalten nur im Kontext der urbanen Entwicklungsprozesse möglich. Da diese in ihrer Richtung und Geschwindigkeit unbestimmt sind, benötigt es Instrumente der Früherkennung und die Szenarientechnik. In dieser Hinsicht bietet der Ansatz dieser Arbeit erste konkrete Lösungen an.

Die Arbeit zeigt ein differenziertes Bild der Genese der urbanen Kupferlagerstätten und gibt die Geschwindigkeit an, mit der sich die Teillager momentan verändern. Wegen der unterschiedlichen Nutzungsdauern sind Änderungen in den Lagern der Immobilien nur langsamer zu bewerkstelligen als in den Mobilien. Dementsprechend sind Kenntnisse über die durchschnittlichen Nutzungsdauern der immobiliengebundenen Bestände für das Verständnis und für Planungsmöglichkeiten bedeutend (JOHNSTONE 1994,2001a; VAN DER VOET *et al.* 2000).

In der Schweiz verlangsamt sich das Wachstum der anthropogenen Kupferlager in einigen Bereichen und erfährt dort mittel- bis langfristig eine Sättigung. Bei den Immobilien ist dieser Zustand mit einer „Reifung“ der Lager gleichzusetzen, die sich allmählich vollzieht und einen regionsspezifischen Entwicklungspfad darstellt. Dieser wurde mit der Exploration durch die Momentaufnahme und die Retrospektive derart analysiert, dass die Ursachen für Änderungen in der Wachstumsgeschwindigkeit klar wurden. Dadurch können bereits Aussagen zur voraussichtlichen Lagerentwicklung eines Landes gemacht werden, das in seinem heutigen techno-ökonomischen Entwicklungsstand von der Schweiz abweicht, aber eine ähnliche Entwicklung durchmachen wird, wie sie die Schweiz hinter sich hat.

Um die dissipativen Verluste möglichst gering zu halten, sind die entsprechenden Einsatzfelder in der Landwirtschaft zu minimieren. Die weitaus grösseren Kupferverluste gelangen jedoch in die Deponie. Im Betrachtungszeitraum stammten die grösseren Ressourcenverluste aus den Mobilien und die kleineren aus den Immobilien. Daher sollte eine Erhöhung der Rezyklierungsrate bei den Mobilien ansetzen. Mit der Einführung der EE-Schrott-Rezyklierung kommt man hierbei einen wichtigen Schritt voran (OETIKER 2002); zunehmend wird auch die Rezyklierung des Metallanteils von Verbrennungsrückständen forciert (JORDI 2005)(www.umtec.ch). Aufgrund der Kupferemissionen können strengere Schwermetallgrenzwerte auch bei der Siedlungsentwässerung zu Vorgaben führen, die indirekt eine Umgestaltung des Lagers im Dachbereich bedeuten. Dies kann ein Wechsel zu beschichteten Kupferblechen sein, aber auch die verordnete Entfernung von Kupferblechen bzw. ein Einbaustopp. Auf diese Weise können Rechtsvorschriften die Umsätze stoffgebundener Branchen (hier: Kupferindustrie) einschränken, z.B. die Erzeugung, die Verarbeitung und den Handel (ICSG 2003).

Für Kupfer, das in grossem Masse auf dem Weltmarkt gehandelt wird, erfordert eine Bewirtschaftungsstrategie auch den Einbezug von regionsexternen Einflüssen wie dem Rohstoffpreis. Ein „Ungleichgewicht“ von Angebot und Nachfrage, ein zu rascher Nachfrageanstieg, resultiert in Knappheit oder Überfluss. Beides ist ökonomisch schädlich; Knappheit kann zusätzlich zu sozialen Spannungen führen (MASON und MÜLLER 2004). Aktuell treten Knappheiten und entsprechende Preissteigerungen bei manchen Metallen wegen des rasch wachsenden Rohstoffhungers in Fernost auf (China, Indien), und in Zukunft ist vermehrt mit derartigen kurz- bis mittelfristigen Knappheiten bei den Metallen oder den Energieträgern zu rechnen. Möglicherweise kann die Rohstoffhandelsbranche mit den Explorationsergebnissen Marktprognosen besser einschätzen und darauf schneller reagieren.

7 Abkürzungen

a	Jahr
A	Fluss
AHS	Schweizerische Aussenhandelsstatistik
BGF	Bruttogeschossfläche
cap.	capita (Einwohner)
CH	Schweiz
Cu	Kupfer
DA	Bauelement „Dach“
DF	Dachfläche
DLG	Nutzungstyp „Dienstleistungsgebäude“
EE-Schrott	Elektro- und Elektronikschrott
EFH	Nutzungstyp „Einfamilienhaus“
fM	Häufigkeit des Materials
fP	Häufigkeit der Produktgruppe
Gew.%	Gewichtsprozent
HT	Bauelement „Haustechnik“
ID	Installationsdichte
k_{ij}	Transferkoeffizient
KG	Kupfergehalt eines ARK-Hauses
KG_i	Kupfergehalt eines Referenzgebäudes
KVA	Kehrichtverbrennungsanlage (dt.: Müllverbrennungsanlage)
l _{fm}	Laufmeter
M	Lager
MFH	Nutzungstyp „Mehrfamilienhaus“
Mt	Megatonne
ND_A	Flächennetzdichte
ND_{EW}	Einwohnernetzdichte
p_i	Parameter
p.a.	pro anno
Pf_i	Parameterfunktion
PG	Produktgruppe
PKG	potentieller Kupfergehalt
PRG	Nutzungstyp „Produktionsgebäude“
RESH	Reststoffe aus Shredderwerken der Altautoverwertung
RGRR	Rauchgasreinigungsrückstände von Kehrichtverbrennungsanlagen
SFA	Stoffflussanalyse
sM	spezifische Masse

t	metrische Tonne
TS	Trockensubstanz
VG	Versorgungsgrad einer Region
X_i	Variable

Zusätzlich wurden weitere gängige Abkürzungen des SI-Systems genutzt.

8 Glossar

Die kursiven Begriffe sind in der vorliegenden Arbeit eingeführt worden.

Akteure	soziale →Systeme (Unternehmen, Haushalte usw.), die den Güterumsatz und den damit verbundenen Ressourcenaufwand eines →Stoffhaushaltssystems direkt oder indirekt beeinflussen.
anthropogene Lagerstätte	siehe →urbane Lagerstätte
Anthroposphäre	Lebensraum des Menschen, in dem seine von ihm gebauten und betriebenen biologischen und technischen Prozesse stehen und in dem seine Aktivitäten stattfinden. Dieser Lebensraum kann auch als ein komplexes →System von Materie-, Energie- und Informationsflüssen verstanden werden. Die Anthroposphäre ist Teil der Biosphäre (BACCINI und BRUNNER 1991).
<i>ARK-Haus</i>	fiktives Modellgebäude nach der →ARK-Haus-Methode, das einen Gebäudeteilbestand vertritt und dessen durchschnittliche Grösse und Zusammensetzung hat.
<i>ARK-Haus-Methode</i>	eine Methode zur Bestimmung der Zusammensetzung und Grösse von Gebäudebeständen urbaner Regionen (siehe Kap. 2.4.1).
Aussenhandelsstatistik	nationale Statistik des (schweizerischen) Zolls, die den Warengrenzverkehr mit anderen Ländern dokumentiert. Die Zollansätze richten sich nach Warenpositionen und werden meist über das Gewicht erhoben, selten über Stückzahlen (OZD 2001).
<i>Bauelement</i>	Gliederungsstufe zur →Exploration in Gebäuden (Kap. 2.4.1.1). Ein Bauelement umfasst →Bauteile eines oder mehrerer →Funktionsbereiche. In dieser Arbeit werden die zwei Bauelemente „Dach“ und „Haustechnik“ angewendet.
Bauteil	niedrigste Gliederungsstufe zur →Exploration in Gebäuden.
Bauwerk	Oberbegriff für gebaute Objekte des Hoch- und Tiefbaus, z.B. Gebäude, Strassen, Bahnen und zugehörige Infrastrukturbauten (REDLE 1999).
Bezugsfläche	Kenngrösse zur Beschreibung von Gebäuden und Modellgebäuden. Die Bezugsfläche ist abhängig vom →Funktionsbereich: Die in der →Haustechnik eingesetzten Stoffmengen beziehen sich auf die →Bruttogeschossfläche, jene im Dach eingesetzten auf die →Dachfläche.

Blech	dünn ausgewalztes Metall in Form von Tafeln, Platten, Bändern oder Streifen.
Bronze	Legierung aus 90 % →Kupfer und 10 % →Zinn. Bronze ist härter als reines Kupfer, wurde dadurch in der Frühgeschichte zur wichtigsten Legierung und gab der Bronzezeit ihren Namen (1700 bis 1100 v. Chr.) (SUHLING 1983).
Bruttogeschossfläche (BGF)	baurechtliche Grösse, welche in den kantonalen Baugesetzen geregelt, aber gesamtschweizerisch sehr ähnlich verwendet wird. Sie beinhaltet alle der →Nutzung dienenden Gebäudeflächen (ober- und unterirdische Geschossflächen, Treppenhaus- und Liftanlagen inkl. Mauer- und Wandquerschnitte).
Dachfläche (DF)	alle Aussenflächen des Gebäudes, die primär vor Niederschlägen schützen, also jene Flächen in der oberen Gebäudehälfte mit horizontaler Komponente.
dissipativer Einsatz	Nutzungsform eines →Stoffes, der durch die →Nutzung verbraucht wird, zum Beispiel Korrosion, Abrieb und sonstige Verluste in die Umwelt. Die weite Verteilung über eine grosse Fläche hat zur Folge, dass der →Rohstoff nicht zurückgewonnen werden kann.
Effizienz	1. Wirksamkeit, Wirkkraft; 2. Wirtschaftlichkeit, bestmöglicher Wirkungsgrad (vor allem wirtschaftspolitisch); 3. Leistungsfähigkeit (DUDENREDAKTION 1990).
Exploration	allgemeiner Begriff für Erkundung (Untersuchung und Befragung); in der Geologie verwandt für Aufsuchen und Bewerten neuer bergbau-licher Abbaufelder inklusive der Untersuchung von Lagerstätten, Boden oder Gelände (MURAWSKI 1992). hier: →Rohstoffe/Ressourcen durch geologische Beobachtung o.Ä. ausfindig machen und untersuchen (Prospektion) plus ihre Bewertung
Fluss	Systemelement der →Stoffflussanalyse (BACCINI und BRUNNER 1991). Danach ist ein Fluss eine Verbindung von →Prozessen eines →Systems. Man unterscheidet Flüsse zwischen den Prozessen eines Systems (innerer Fluss), Flüsse von ausserhalb des Systems zu einem →Prozess (Input-Fluss) und Flüsse von einem Prozess nach ausserhalb des Systems (Output-Fluss). Ein Fluss ist stets mit einem physischen Stoff- bzw. Gütertransport verbunden.
<i>Funktionsbereich</i>	Gliederungsstufe zur →Exploration in Gebäuden (Kap. 2.4.1.1). Ein Funktionsbereich umfasst →Bauteile eines oder mehrerer → <i>Produktgruppen</i> . In dieser Arbeit werden die fünf Funktionsbereiche <i>Dachbereich</i> , <i>Stromanlage</i> , <i>Telekommunikationsanlage</i> , <i>Sanitäranlage</i> und <i>Heizungsanlage</i> angewendet.

Gut	Systemelement der →Stoffflussanalyse (BACCINI und BRUNNER 1991). Ein Gut ist hier ein →Stoff oder Stoffgemisch mit vom Menschen ökonomisch bewerteten Funktionen. Güter werden als →Fluss pro Jahr bzw. als →Lager gemessen.
Halbzeug	technischer Sammelbegriff für Industrieprodukte in standardisierter Form (z.B. Barren, Stangen, Profile, →Bleche, Rohre, Drähte) aus Metall oder Kunststoff, das noch zum fertigen →Produkt weiterverarbeitet wird.
Hinterland	externe Gebiete einer Region, welche zur Aufrechterhaltung irgendwelcher Funktionen innerhalb der Region beansprucht werden (z.B. Lagerstätten oder Produktionsstätten von →Stoffen) (MÜLLER <i>et al.</i> 1998).
Immobilien	Gebäude, Grundstücke, unbewegliches Vermögen. Gegensatz: →Mobilien (DUDENREDAKTION 1990).
Infrastruktur	notwendiger wirtschaftlicher und organisatorischer Unterbau einer hochentwickelten Wirtschaft (Verkehrsnetz, Arbeitskräfte usw.)(DUDENREDAKTION 1990)
Kalibrierung (Kalibration)	1. das Eichen von Messinstrumenten. 2. das Ausrichten von Werkstücken auf ein genaues Mass (DUDENREDAKTION 1990). hier: Eichung und Schätzung der Modellparameter und Konstanten mit dem Ziel, eine möglichst gute Übereinstimmung zwischen dem Modell-Output und den Datensätzen zu erreichen (RYKIEL 1996).
Kehrichtverbrennungs- anlage (KVA)	technische Anlage zur thermischen Behandlung von Siedlungs- und Industrieabfällen (dt.: Müllverbrennungsanlage (MVA))
Kupfer	rötliches halbedles Metall, das aufgrund seiner technischen Eigenschaften legiert und unlegiert in vielen Anwendungen eingesetzt wird.
<i>Kupfergehalt (KG)</i>	Kenngroesse zur quantitativen Beschreibung des vorhandenen Kupfer-einsatzes in den →Produktgruppen bzw. →Funktionsbereichen eines Gebäudebestands bzw. eines Modellgebäudes, welches ihn repräsentiert (hier: →ARK-Haus). Der KG ist als Quotient von eingesetzter Kupfermasse zu →Bezugsfläche definiert.
Lager	Systemelement der →Stoffflussanalyse (BACCINI und BRUNNER 1991). Die aufgrund der Nutzungszeit in einem →Prozess akkumulierte Stoffmenge (entsprechend auch summiertes „Lager einer Region oder eines Landes“).
Lagerstätte	„Anhäufung eines mineralischen →Rohstoffes in einer Konzentration, die über die durchschnittliche Verteilung dieses →Stoffes in der Erdkruste hinausgeht (sicher gemessenes, technisch gewinnbares und wirtschaftlich verwertbares Vorkommen)“ (LAWATSHECK 1990)

<i>Materialisierung</i>	hier: methodischer Vorgang, der den Übergang von der abstrakten funktionsgesteuerten →Installationsdichte hin zur konkreten Ausgestaltung des Produktes in einem Gebäude beschreibt (einschliesslich bei den fiktiven →ARK-Häusern).
Mobilien	bewegliche →Güter (Wirtschaft). Gegensatz: →Immobilien (DUDENREDAKTION 1990).
Modell	vereinfachte Darstellung der Funktion eines Gegenstandes oder des Ablaufes eines Sachverhalts, die eine Untersuchung oder Erforschung erleichtert oder erst möglich macht (DUDENREDAKTION 1990)
Nichteisenmetalle (NE-Metalle)	Gruppe von Metallen, die relevant sind für technische Prozesse, ausgenommen Eisen bzw. Stahl. Zu den Nichteisenmetallen gehören →Kupfer, Zink, Zinn, Blei.
Nutzung	Zustand von →Waren und →Stoffen, bei dem beabsichtigte oder unbeabsichtigte Funktionen erfüllt werden. Die Waren müssen vor der Nutzung produziert bzw. nutzbar gemacht werden. Nach der Nutzung werden die meisten Waren entsorgt (gilt nicht für →dissipativ eingesetzte Waren).
Patina	basisches Kupferkarbonat, das infolge Korrosion als grünliche Schutzschicht die Oberfläche von →Kupfer oder Kupferlegierungen überzieht („Edelrost“)(DUDENREDAKTION 1990)
<i>potentieller Kupfergehalt (PKG)</i>	deskriptive Kenngrösse zur quantitativen Beschreibung des Kupfer-einsatzes in den →Produktgruppen bzw. →Funktionsbereichen, der in einem bestimmten Gebäudebestand möglich ist bzw. in dem Modellgebäude, welches ihn repräsentiert (hier: →ARK-Haus). Der PKG ist als Quotient von eingesetzter Kupfermasse zu →Bezugsfläche definiert.
Produkt	physisches Erzeugnis eines händischen oder maschinellen Arbeitsvorgangs, das durch die Bearbeitung der Edukte einen Wert-zuwachs erfährt und als Produkt einem bestimmten Zweck dient.
<i>Produktgruppe (PG)</i>	Sammelbegriff für Produkte in Gebäuden, die dieselbe Funktion erfüllen und daher ähnlich aufgebaut sind. Beispielsweise umfasst die PG „Stromkabel“ sämtliche Stromkabeltypen, unabhängig von dem Durchmesser, der Aderanzahl, der Abschirmung, dem Isolatormaterial, der Phasenkennzeichnung und dem Hersteller.
Prozess	Systemelement der →Stoffflussanalyse (BACCINI und BRUNNER 1991). Nach der SFA ist ein Prozess ein Bilanzvolumen, in welchem →Stoffe oder →Güter transportiert, transformiert oder gelagert werden oder ihren Wert verändern, z.B. durch →Nutzung.
Rezyklierung (Recycling)	Aufbereitung und Wiederverwendung bereits benutzter →Rohstoffe, von Abfällen und Nebenprodukten (DUDENREDAKTION 1990).

Renovation (schweiz.für Renovierung)	Erneuerung, Instandsetzung (Wiederherstellung) (DUDENREDAKTION 1990).
Reserve	allg.: Vorrat; Rücklage für den Bedarfs- oder Notfall (DUDENREDAKTION 1990). In der Lagerstättenkunde derjenige Teil der →Ressource, der exakt nachgewiesen und wirtschaftlich gewinnbar ist (KESLER 1994).
Ressource	im weiteren Sinn: natürliches Produktionsmittel für die Wirtschaft (DUDENREDAKTION 1990) bzw. alle Produktionsfaktoren (Arbeit, Boden, Kapital); im engeren Sinn: →Rohstoffe. Unter „mineralische Ressource“ versteht man die Gesamtheit eines mineralischen Rohstoffes (KESLER 1976,1994; LAWATSHECK 1990).
<i>Referenzgebäude</i>	reale Gebäude, die der Erhebung von →Installationsdichten, →spezifischen Massen und weiteren Informationen dienen
retrospektive Erhebung	ursprgl. aus der Medizin: nicht-zufällige Stichprobe aus einer definierten Grundgesamtheit, wobei man zu erfassende Zielgrößen (Messvariablen, Einflussgrößen, Erfassungsmethoden) naturgemäss nicht frei festlegen kann, weil die Erhebung nicht im Voraus geplant werden kann. Eine freie Zuteilung von mindestens einer Einflussgrösse zu den Beobachtungseinheiten (etwa im Rahmen einer randomisierten Studie) ist nicht möglich. hier: sinngemässe Übertragung auf die Untersuchung bzw. Erfassung von Lagern
Rohstoff	„Bestandteil der Natur, der von Menschen gezielt angeeignet und genutzt wird“ (Brockhaus, 1996). Rohstoffe sind stoffliche →Ressourcen
Sensitivitätsanalyse	Vorgehen zur Untersuchung der Auswirkung der Variation eines bestimmten Parameters auf eine Variable
<i>spezifische Masse</i>	Messgrösse eines →Produktes bzw. →Bauteils bei der Erhebung, die die Stoffmasse pro funktionale Einheit angibt, z.B. in Kilogramm pro Laufmeter.
Stoff	chemisches Element bzw. chemische Verbindung (BACCINI und BADER 1996)
Stoffflussanalyse	Methode zur Erfassung, Beschreibung und Interpretation von →Stoffhaushaltssystemen (BACCINI und BRUNNER 1991). Die Stoffflussanalyse ist ein naturwissenschaftliches Verfahren, um für einen definierten Raum in einer bestimmten Zeitperiode (Systemgrenzen) den Stoffumsatz zu quantifizieren.
Stoffhaushaltssystem	offenes →System mit →Prozessen und →Gütern bzw. →Stoffen als Systemelementen innerhalb der Systemgrenze (BACCINI und BADER 1996)

System	Menge von Elementen, zwischen denen bestimmte Beziehungen bestehen (DUDENREDAKTION 1990).
Transferkoeffizient	Quotient einer Outputmenge bzw. einer Lagerzunahme zur Summe aller Inputmengen, bezogen auf den betrachteten →Prozess. Für jeden Prozess ist die Summe der Transferkoeffizienten gleich eins.
Umbau	sämtliche anthropogene Eingriffe, welche zu einer Veränderung der Struktur →urbaner Systeme führen (bei den →Immobilien z.B. Neubau, Abbruch, →Renovation).
urbane Lagerstätte	bewusst oder unbewusst anthropogen angehäufte physische →Ressource ¹⁵⁵ im urbanen Raum, deren Wiederverwertung zur Zeit oder zu einem späteren Zeitpunkt möglich ist. Sie umfasst sowohl in →Nutzung befindliche →Rohstoffe als auch ehemals genutzte.
urbanes System	Gross-System aus erdgeschichtlich entstandenen (natürlichen oder geogenen) und kulturell gestalteten (anthropogenen) Subsystemen. Es ist ein flächendeckendes, dreidimensionales Netzwerk von vielfältigen sozialen und physischen Verknüpfungen.
<i>urban mining</i>	Die Gewinnung von →Rohstoffen aus →urbanen Lagerstätten. Analog zur Gewinnung von Rohstoffen aus Primärressourcen umfasst <i>urban mining</i> die →Exploration, die Beurteilung und den Abbau aus Sekundärressourcen.
Validierung	Nachweis, dass ein →Modell innerhalb seines Anwendungsbereichs eine für den Anwendungszweck ausreichend treffende Beschreibung des →Systems liefert.
Versorgungsgrad (VG) (auch Selbstversorgungsgrad, Autarkiegrad)	Anteil des Ressourcenangebots einer Region am Ressourcenbedarf, der zur Befriedigung aller wirtschaftlichen Aktivitäten der Region nötig ist.
Ware	handelsfähiges physisches →Gut mit positivem Wert

¹⁵⁵ Nicht gemeint sind die geogenen Lagerstätten in urbanen Lebensräumen.

9 Literaturverzeichnis

- ADRIAANSE, A., BRINGEZU, S., HAMMOND, A., MORIGUCHI, Y., RODENBURG, E., ROGICH, D. und SCHÜTZ, H. (1998). *Stoffströme: Die materielle Basis von Industriegesellschaften*. Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie; World Resources Institute; Ministerium für Wohnungswesen, Raumordnung und Umwelt der Niederlande; Japanisches Institut für Umweltstudien, Berlin, Basel, Boston. 111 p.
- AEGERTER, C. (2003). Auskunft zum Leiterquerschnitt von Freileitungen. Persönliche Mitteilung vom 14.08.2003. EBM Netz AG, Münchenstein.
- AHNERT, R. und KRAUSE, K.H. (2000). *Typische Baukonstruktionen von 1860-1960 zur Beurteilung der vorhandenen Bausubstanz*. 6. stark bearb. und erweit. Aufl., Verlag Bauwesen, Berlin.
- ALBRECHT, R., PARKER, L., REHBERG, S. und REINER, Y. (1984). *Umweltentlastung durch ökologische Bau- und Siedlungsweisen. Band 2: Auswirkungen auf Baustoffverwendung, Energiebedarf, Luft und Klima, Abfallbeseitigung und Wasserhaushalt, Lärm, Flächenbedarf, Kosten und Arbeitsmarkt*. Bauverlag, Wiesbaden, Berlin. 276 p.
- AMSTEIN UND WALTHERT (1998). *Umweltrelevanz der Haustechnik. Eine Entscheidungsgrundlage*. Teilprojekt von IEA CBS Annex 31, "Energy Related Environmental Impact of Buildings". Bundesamt für Energie, Bern. 65 p.
- AMT FÜR UMWELTSCHUTZ UND ENERGIE BL (1991). *BASORAG Stoffflussanalyse*. Teilbericht über Probenahme, Probenaufbereitung und Analytik der Produkte der Bauschutt-sortieranlage BASORAG, Allschwil, und Beurteilung der Sortierprodukte hinsichtlich Verwertung/Entsorgung. Amt für Umweltschutz und Energie, Kanton Basel-Landschaft, Liestal. 94 p.
- ARPACI, E. (1995). Kupfer in kommunalen Abwässern und Klärschlämmen. DKI Sonderdruck. s.197. Deutsches Kupferinstitut, Stand September 1995. Düsseldorf. 22 p.
- ARPACI, E. (2000). *Kupfer - Werkstoff der Zukunft: Trends der Technologie- und Marktentwicklung*. Arbeitsheft. Otto Brenner Stiftung, Berlin. 40 p.
- AUE BL (1991). *Stoffflussanalyse der Bauabfallsortieranlage BASORAG*. Hauptbericht. Amt für Umweltschutz und Energie, Kanton Basel-Landschaft. 51 p.
- AYRES, R.U., AYRES, L.W. und RADE, I. (2002). *The Life Cycle of Copper, its Co-Products and By-Products*. Report of the Project Mining, Minerals and Sustainable Development (MMSD). International Institute for Environment and Development, Fontainebleau Cedex, France, Gothenborg, Sweden. 163 p.
- BACCINI, P. und BRUNNER, P.H. (1991). *Metabolism of the anthroposphere*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, London, Paris, Tokyo, Hong Kong, Barcelona, Budapest. 157 p.
- BACCINI, P., BELEVI, H. und LICHTENSTEIGER, T. (1992). Die Deponie in einer ökologisch orientierten Volkswirtschaft. *GAIA* 1(1): 34-49.
- BACCINI, P. und GAMPER, B. (Ed.)(1994). *Deponierung fester Rückstände aus der Abfallwirtschaft: Endlager-Qualität am Beispiel Müllschlacke. Tagung in der Kartause Ittingen, 14.-16.09.1993*. Praxisorientierte EAWAG-Kurse PEAK V1 93. vdf Hochschulverlag an der ETH Zürich, Zürich. 100 p.
- BACCINI, P. und BADER, H.-P. (1996). *Regionaler Stoffhaushalt: Erfassung, Bewertung und Steuerung*. Spektrum, Heidelberg, Berlin, Oxford. 420 p.

- BACCINI, P. und OSWALD, F. (1998). *Netzstadt. Transdisziplinäre Methoden zum Umbau urbaner Systeme. Ergebnisse aus dem ETH-Forschungsprojekt SYNOIKOS - Nachhaltigkeit und urbane Gestaltung im Raum Kreuzung Schweizer Mittelland. 2.*, unveränd. Auflage, vdf Hochschulverlag an der ETH Zürich, Zürich. 251 p.
- BACCINI, P., LICHTENSTEIGER, T., BADER, H.-P. und KYTZIA, S. (2003). *Mining the Urban System: Exploration in Environmental Engineering. Annual Report (2002)*. Department of Civil, Environmental and Geomatics Engineering, Swiss Federal Institute of Technology, Zurich, Switzerland. 8-10 p.
- BADER, G., SCHWAIGER, B. und FERRARA, C. (2001). *Methoden zur Analyse von Gebäudebeständen, Alterungsmodelle und Prognose von Stoffströmen mit Anwendung auf den Gebäudebestand der Stadt Ettlingen*. Arbeitsbericht in der Version vom 15.08.2001. Institut für Mathematische Stochastik, Institut für Industrielle Bauproduktion, Universität Karlsruhe, Karlsruhe. 76 p.
- BADER, H.-P. und BACCINI, P. (1996). Systemmodelle und Simulationsprogramme im Umweltmanagement - Eine kritische Analyse zum Stand der Technik. *GAIA* 5(6): 263-275.
- BADER, H.-P. und SCHEIDEGGER, R. (1996). Exkurs über Stoffhaushalts-Simulationsprogramme (Anhang A1). In: *Regionaler Stoffhaushalt: Erfassung, Bewertung und Steuerung*. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, Berlin, Oxford: 383-389.
- BADER, H.-P., SCHEIDEGGER, R. und REAL, M.G. (2005). Global renewable energies: a dynamic study of implementation time, greenhouse gas emissions and financial needs. *Clean Technologies and Environmental Policy*. **in press**.
- BÄTZING, W. (2003). *Die Alpen. Geschichte und Zukunft einer europäischen Kulturlandschaft. 2.*, aktualis. und völlig neu konzip. Fassung, Verlag C.H.Beck, München. 431 p.
- BELEVI, H. (1998). *Environmental Engineering of Municipal Solid Waste Incineration*. Habil., Eidgenössische Technische Hochschule Zürich. vdf Hochschulverlag an der ETH Zürich, Zürich.
- BERGBÄCK, B., JOHANSSON, K. und MOHLANDER, U. (2001). Urban Metal Flows - A Case Study of Stockholm. *Water, Air and Soil Pollution: Focus* 1(3/4): 3-24.
- BFS (1993). *Kantone und Städte der Schweiz. Statistische Übersichten*. Schweiz. Bundesamt für Statistik, Bern.
- BFS (1994). *Schweizerische Verkehrsstatistik*. vol. 11: Schweiz. Bundesamt für Statistik, Neuchâtel.
- BFS (Ed.)(1997-1999). *Statistisches Jahrbuch der Schweiz*. SCHWEIZ. BUNDESAMT FÜR STATISTIK. Verlag Neue Zürcher Zeitung, Zürich.
- BILITEWSKI, B. (1990). *Bauschutt- und Asphaltrecycling. Grundlagen - Technik - Wirtschaftlichkeit. 2.*, neubearb. und erweit. Auflage, Schmidt, Berlin. 96 p.
- BILITEWSKI, B. (1993). *Recycling von Baureststoffen*. EF-Verlag für Energie- und Umwelttechnik, Berlin. 369 p.
- BINDER, B. (1999). *Elektrifizierung als Vision. Zur Symbolgeschichte einer Technik im Alltag*. Diss., Eberhard-Karls-Universität Tübingen. Tübingen. 399 p.
- BINDER, C., BADER, H.-P., SCHEIDEGGER, R. und BACCINI, P. (2001). Dynamic models for managing durables using a stratified approach: the case of Tunja, Colombia. *Ecological Economics* 38: 191-207.
- BLACK, W.T. und LYMAN, W.S. (1990). *The Flow of Copper to US Markets*. Copper '90: Refining, Fabrication, Markets, Vaesteras, Sweden. Institute of Metals. 15-23 p.
- BLUMER-ONOFRI, F. (1994). *Die Elektrifizierung des dörflichen Alltags. Eine Oral History-Studie zur sozialen Rezeption der Elektrotechnik im Baselbiet zwischen 1900 und 1960*. Verlag des Kantons Basel-Landschaft, Liestal. 512 p.

- BOLLER, M.A. (1998). Kupfer: langfristig drohen irreversible Schäden. *VGL-Information (Schweiz. Vereinigung für Gewässerschutz und Lufthygiene)* 3: 19-21.
- BOLLER, M.A. und STEINER, M. (2001). *Diffuse emission and control of copper in urban surface runoff*. IWA 2nd World Water Congress, Berlin.
- BRAHMER-LOHSS, M., DRÄGER, H.-J., VON GLEICH, A., GÖSSLING, S., GOTTSCHICK, M., GROSSMANN, D., HORN, H., JEPSEN, D., KRACHT, S., LOHSE, J., LORENZEN, S. und SANDER, K. (2004). *Nachhaltige Metallwirtschaft Hamburg: Erkenntnisse - Erfahrungen - praktische Erfolge*. Endbericht des BMBF-Projektes "Effizienzgewinne durch Kooperation bei der Optimierung von Stoffströmen in der Region Hamburg". Hamburg. 275 p.
- BRUCH, K.H., GOHLKE, D., KÖGLER, C., KRÜGER, J., REUTER, M., RÖPENACK, I.v., ROMBACH, E., ROMBACH, G. und WINKLER, P. (1995). Sachbilanz einer Ökobilanz der Kupfererzeugung und -verarbeitung, Teil 1. *Metall* 4: 252-257.
- BRUGG KABEL (1996). *Energiekabel*. Kabelkatalog (Produktkatalog). Brugg Kabel AG, Brugg.
- BRUNNER, C.U. (2001). *Energieverbrauch im Schienenverkehr*. Kurzstudie. Bundesamt für Energie, Zürich. 18 p.
- BRUNNER, P.H. und MÖNCH, H. (1986). The flux of metals through municipal solid waste incinerators. *Waste Management & Research* 4: 105-119.
- BRUNNER, P.H. und RECHBERGER, H. (2004). *Practical Handbook of Material Flow Analysis*. Lewis Publishers, Boca Raton, FL. 318 p.
- BUWAL (1998a). *Abfallstatistik 1998*. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern. 149 p.
- BUWAL (1998b). *Die Rückstände der Verbrennung: Flugasche und Filterkuchen*. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern. 184 p.
- BUWAL (Ed.) (1999a). *Sonderabfälle in der Schweiz. Vom Problem zur Lösung*. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft. 25 p.
- BUWAL (1999b). Aushubrichtlinie. Richtlinie für die Verwertung, Behandlung und Ablagerung von Aushub-, Abraum- und Ausbruchmaterial. Abfall und Altlasten (Dokumentation). Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft. 20 p.
- BUWAL (Ed.) (2000). *Wegleitung zur Verordnung über die Rückgabe, die Rücknahme und die Entsorgung von elektrischen und elektronischen Geräten (VREG)*. Abfall. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern. 71 p.
- BUWAL (2001). *Bauabfälle Schweiz - Mengen, Perspektiven und Entsorgungswege. Band 2: Kantonale Werte*. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern. 171 p.
- CIROTH, A., FLEISCHER, G. und STEINBACH, J. (2004). Uncertainty Calculation in Life Cycle Assessments. A Combined Model of Simulation and Approximation. *International Journal of Life Cycle Assessments* 9(4): 216-226.
- CKW (2003). Leitungspläne. Centralschweizerische Kraftwerke. Online in Internet: http://www.ckw.ch/02_verteilnetz_plan.asp. Stand 15.07.2003.
- COLOMBI SCHMUTZ DORTHE AG (1998). *Behandlung strassenbürtiger Abfälle*. Grundlagenbericht. Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft des Kantons Zürich (AWEL), Bern.
- CONRAD, R. und TESTER, J. (2001). Local loop: Das Anschlussnetz heute. In: Local loop. **TC5**. Seminarsarbeit, Stand 22.01.2001. Chur. 3 p.
- COOTALIDES, R., FISCHER, K. und GANZ, R. (2000). *Ökopprofil von Metaldächern*. Langfassung. Bau- und Umweltchemie, Zürich. 87 p.

- CRAIG, J.R., VAUGHAN, D.J. und SKINNER, B.J. (2001). *Resources of the earth origin, use and environmental impact*. 3rd ed., Prentice Hall, Upper Saddle River. 520 p.
- DANIELS, K. (1996). *Gebäudetechnik: Ein Leitfaden für Architekten und Ingenieure*. 2. Aufl., Oldenbourg, München und vdf Hochschulverlag an der ETH Zürich, Zürich. 722 p.
- DKI (Ed.)(1982). *Kupfer*. Deutsches Kupferinstitut, Düsseldorf. 199 p.
- DKI (Ed.)(1992). *Kupferwerkstoffe in der Elektrotechnik und Elektronik*. DKI Informationsdruck i.010. Deutsches Kupferinstitut, Düsseldorf, Deutschland. 16 p.
- DKI (Ed.)(1999a). *Kupfervorkommen Gewinnung Eigenschaften Verarbeitung Verwendung*. DKI Informationsdruck i.004. Deutsches Kupferinstitut, Düsseldorf. 24 p.
- DKI (Ed.)(1999b). *Gewichtstabellen für Kupfer und Kupferlegierungen*. DKI Informationsdruck i.029. Deutsches Kupferinstitut, Düsseldorf. 15 p.
- DKI (Ed.)(2002). *Dachdeckung und Aussenwandbekleidung mit Kupfer*. DEUTSCHES KUPFERINSTITUT. Informationsdruck i.030. Deutsches Kupferinstitut, Düsseldorf. 17 p.
- DUDENREDAKTION (Ed.)(1990). *Duden - Fremdwörterbuch*. WISSENSCHAFTLICHER RAT DER DUDENREDAKTION. Der Duden in 12 Bänden. Das Standardwerk zur deutschen Sprache, Band 5. Dudenverlag, Mannheim, Leipzig, Wien, Zürich. 832 p.
- EDI (1988). *Bericht zum Entwurf für eine technische Verordnung über Abfälle (TVA)*. Eidgenössisches Departement des Innern, Bern. 68 p.
- EGGENBERGER, H.P. (1990). Wo braucht es Freileitungen - wo sind Kabel möglich? *Strom* **2**: 16-18.
- EGL GRID AG (2003). Informationen aus dem Schweizer Übertragungsnetz. Stand 25.04.2003. 4 p.
- EIDG. KOMMISSION FÜR ABFALLWIRTSCHAFT (1986). *Leitbild für die schweizerische Abfallwirtschaft*. Bundesamt für Umweltschutz, Bern. 41 p.
- EKG (1995). Elementkostengliederung. **Schweizer Norm 506 502**. 152 p.
- EKSTRAND, S., ÖSTLUND, P. und HANSEN, C. (2001). Digital Air Photo Processing for Mapping of Copper Roof Distribution and Estimation of Related Copper Pollution. *Water, Air and Soil Pollution: Focus* **1**: 267-278.
- EleG (1933). Verordnung über die Erstellung, den Betrieb und den Unterhalt der elektrischen Einrichtungen von Bahnen. **SR 734.42**.
- EleG (1994). Verordnung über elektrische Leitungen. **LeV 734.31**. 63 p.
- ELSENER, J. und STRUB, P. (1993). *Material- und Energiebilanz für den Güterverkehr. Teil Infrastruktur und Fahrzeugpark*. Semesterarbeit. Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Abt. XB Umweltnaturwissenschaften, Zürich.
- EMCH, G. (2003). Auskunft zum Leitungsnetz der ewz. Persönliche Mitteilung vom 28.07.2003. Elektrizitätswerk der Stadt Zürich (ewz), Zürich.
- ENQUETE-KOMMISSION DES DT. BUNDESTAGS (Ed.)(1993). *Verantwortung für die Zukunft - Wege zum nachhaltigen Umgang mit Stoff- und Materialströmen. Zwischenbericht der Enquete-Kommission "Schutz des Menschen und der Umwelt - Bewertungskriterien und Perspektiven für umweltverträgliche Stoffkreisläufe in der Industriegesellschaft" des 12. Deutschen Bundestags*. Economica-Verlag, Bonn. 332 p.
- ERDMANN, L., HANDKE, V., BEHRENDT, S., SCHARP, M. und KLINSKI, S. (2002). *Ergebnisse und Forschungsprozess zum Projekt "Nachhaltige Bestandsbewirtschaftung nicht erneuerbarer knapper Ressourcen": Handlungsoptionen und Steuerungsinstrumente zur Schliessung von Kreislaufücken für Kupfer und Blei*

- unter Einbeziehung ökonomischer, rechtlicher und ökologischer Kriterien.* Abschlussbericht. Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung GmbH, Berlin. 356 p.
- FALLER, M. (2001). Metallabtrag und Metallabschwemmung von Metalldächern: Untersuchungsergebnisse der Freibewitterungsversuche in der Schweiz. *BAUMETALL* 4: 52-59.
- FAVA, R. (2002). Auskunft zum Stand der Technik bei Sanitäreanlagen. Persönliche Mitteilung vom 27.09.2002. Sanitär- & Heizungsinstallation Fava, Bassersdorf.
- FISCHER, J.C. und PRY, R.H. (1970). *A Simple Substitution Model of Technological Change*. Technical Information Series. General Electric Company, R+D Centre, Schenectady NY.
- FRICK, O., KNÖLL, K., NEUMANN, D., NEUMANN, F. und WEINBRENNER, U. (1987). *Baukonstruktionslehre*. 29., neubearb. und erweit. Aufl., Teubner, Stuttgart.
- FRISCHKNECHT, R. und SUTER, P. (1995). *Ökoinventare für Energiesysteme. Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Energiesystemen und den Einbezug von Energiesystemen in Ökobilanzen für die Schweiz*. 3. Aufl., Laboratorium für Energiesysteme ETH Zürich, Zürich.
- GENSKE, D.D. (2003). *Die Branche als Chance. Ein transdisziplinärer Dialog über verbrauchte Flächen*. Springer, Berlin. 287 p.
- GÖRG, H. (1997). *Entwicklung eines Prognosemodells für Bauabfälle als Baustein von Stoffstrombetrachtungen zur Kreislaufwirtschaft im Bauwesen*. Diss., Technische Hochschule Darmstadt. Darmstadt. 299 p.
- GRABER, W. (2003). Auskunft über das Stromnetz der Schweiz. Persönliche Mitteilung vom 10.07.2003. Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen (VSE), Aarau.
- GRUHLER, K., BÖHM, R., DEILMANN, C. und SCHILLER, G. (2002). *Stofflich-energetische Gebäudesteckbriefe - Gebäudevergleiche und Hochrechnungen für Bebauungsstrukturen*. Institut für ökologische Raumentwicklung, Dresden. 307 p.
- GUGERLI, D. (1996). *Redeströme zur Elektrifizierung der Schweiz 1880-1914*. Chronos Verlag, Zürich. 350 p.
- GYSIN, B. (2002). Aufbau einer Haustechnik. Internes Manuskript, Stand 20.11.2002. R. Nussbaum AG, Olten. 4 p.
- HAEMMERLE, L. (2001). *Geschichte des Schweizer-Stromnetzes*. 12 p.
- HÄRIG, S., GÜNTHER, K. und KLAUSEN, D. (1996). *Technologie der Baustoffe. Handbuch für Studium und Praxis*. 13. Aufl., Müller, Heidelberg. 546 p.
- HARTMANN, W. (2002). Auskunft über den Einsatz von Baubronze beim Objekt *Hochschule Rapperswil* und im Allgemeinen. Persönliche Mitteilung vom 13.05.2002. eurAL Systeme, Baiersbronn, Deutschland.
- HÄSSIG, A. (1930). *Schweizer Baukatalog*. Bund Schweizer Architekten (B.S.A.), Zürich.
- HE, W., WALLINDER, I.O. und LEYGRAF, C. (2001). A Comparison Between Corrosion Rates and Runoff Rates from New and Aged Copper and Zinc as Roofing Material. *Water, Air and Soil Pollution: Focus* 1(3/4): 67-82.
- HEDBRANT, J. (2003). *Structuring Empirical Knowledge on Environmental Issues: Urban Heavy Metal Metabolism*. Diss., Linköping University. Linköping, Sweden. 150 p.
- HENSELER, G., LICHTENSTEIGER, T. und BACCINI, P. (2006). Gebäudepark Schweiz: Die Entwicklung des Gebäudebestandes im 20. Jahrhundert. In: *Bauwerke als Ressourcennutzer und Ressourcenspender in der langfristigen Entwicklung urbaner Systeme. Ergebnisse aus dem Forschungsprojekt ARK04 - Gebäude im Umbau urbaner Kulturlandschaften*. LICHTENSTEIGER, T. (Ed.). vdf Hochschulverlag an der ETH Zürich, Zürich: 61-102.

- HENSELING, K.O. (1981). *Bronze, Eisen, Stahl: Bedeutung der Metalle in der Geschichte*. Originalausgabe, Rowohlt Taschenbuch Verlag, Reinbek bei Hamburg. 220 p.
- HENSTOCK, M.E. (1996). *The Recycling of Non-Ferrous Metals*. International Council on Metals and the Environment (ICME), Ottawa, Ontario. 342 p.
- HERMANN, U. (1982). *Knaurs Herkunftswörterbuch. Etymologie und Geschichte von 10000 interessanten Wörtern*. Völlig neu bearb. und erweit. Lizenzausg., Lexikographisches Institut, München. 487 p.
- HERRMANN, R. (1981). Baurestmassen gehören nicht auf die Deponie. Rückführung des Abbruchmaterials in den Stoffkreislauf. *Müll und Abfall* (9): 262-270.
- HUG, F. (2002). *Ressourcenhaushalt alpiner Regionen und deren physiologische Interaktionen mit den Tiefländern im Kontext einer nachhaltigen Entwicklung*. Diss. ETH Nr. 14'540, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich/EAWAG Dübendorf. Zürich. 166 p.
- ICSG (2003). *Case Study of Regulatory Impacts on Copper Use in Building Construction within the European Union*. International Copper Study Group, Lisbon. 36 p.
- IDARIO (Ed.) (2001). *Für eine Schweiz mit Zukunft. Nachhaltige Entwicklung als Chance für Wirtschaft, Umwelt und Gesellschaft*. Interdepartementaler Ausschuss IDARIO, Bern. 30 p.
- IMBAUMGARTEN (2003a). Zur Problematik der Erfassung von Netzlängen verschiedener Netzbetreiber. Persönliche Mitteilung vom 15.07.2003. Nordostschweizerische Kraftwerke (NOK), Abt. Netzplanung, Baden.
- IMBAUMGARTEN (2003b). Allgemeine Auskünfte zum schweizerischen Starkstromnetz. Persönliche Mitteilung vom 16.07.2003. Nordostschweizerische Kraftwerke (NOK), Abt. Netzplanung, Baden.
- IMBODEN, D. und BACCINI, P. (1996). *Konzepte für eine nachhaltige Schweiz: Mit welchen Ressourcen in welchen Siedlungen auf wessen Land?* CASS-Tagung, Bern. Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Zürich. 32 p.
- IP BAU (1993). *Feindiagnose im Hochbau*. IMPULSPROGRAMM BAU - ERHALTUNG UND ERNEUERUNG (Ed.). Bundesamt für Konjunkturfragen, Bern. 322 p.
- JAFFÉ, F.C. (1986). Switzerland. In: *Mineral Deposits of Europe. vol.3: Central Europe*. DUNNING, F.W., EVANS, A.M., NOTHOLT, A.J.G. und JONES, M.J. (Ed.). The Institution of Mining and Metallurgy (Great Britain), The Mineralogical Society (Great Britain), London: 41-54.
- JÄGER, M. (2003). Verfügbarkeit von Netzdaten der Elektrizitätswerke. Persönliche Mitteilung vom 22.07.2003. Elektrizitätswerk des Kantons Zürich (EKZ), Zürich.
- JANN, C. (2002). *Filterung von kupferhaltigem Dachwasser*. Fachhochschule beider Basel, Muttenz. 40 p.
- JENSCH, W. (1988). *Vergleich von Energieversorgungssystemen unterschiedlicher Zentralisierung*. Lehrstuhl und Laboratorium für Energiewirtschaft und Kraftwerkstechnik, Technische Universität München, München. 170 p.
- JOHNSTONE, I.M. (1994). The Mortality of New Zealand Housing Stock. *Architectural Science Review* **37**: 181-188.
- JOHNSTONE, I.M. (2001a). Energy and mass flows of housing: estimating mortality. *Building and Environment* **36**: 43-51.
- JOHNSTONE, I.M. (2001b). Energy and mass flows of housing: a model and example. *Building and Environment* **36**: 27-41.
- JORDI, B. (2005). Aufbereitung der Schlacke entlastet die Umwelt. *GSA Informationsbulletin* **1**: 38-43.

- JOSEPH, G. (1999). *Copper: its Trade, Manufacture, Use, and Environmental Status*. ASM International, Materials Park, Ohio. 451 p.
- KARLSSON, S. und HOLMBERG, J. (1998). Resource and environmental restrictions on metal flows and stocks in a future global industrial society. In: *On the Societal Metabolism of Metals: Final report*. Swedish Environmental Protection Agency (EPA), Stockholm: 39-53.
- KBOB-IPB (2001). *Metalle für Dächer und Fassaden*. Empfehlung Nachhaltiges Bauen, Recommendation Construction durable 2001/1. Koordination der Bau- und Liegenschaftsorgane des Bundes, Interessengemeinschaft privater professioneller Bauherrn, 10 p.
- KELLER, C. (1999). *Thermal treatment of automotive shredder residues (ASR) under reducing conditions - experiences from investigations on technical and laboratory scale*. Re'99, Geneva. 187-192 p.
- KESLER, S.E. (1976). *Our finite mineral resources*. McGraw-Hill, New York. 120 p.
- KESLER, S.E. (1994). *Mineral resources, economics and the environment*. Macmillan College Publishing Company, New York. 391 p.
- KILGA, M. (1999). *Strassenbürtige Abfälle - Ist eine separate Aufbereitung sinnvoll?* Diplomarbeit, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich. Zürich. 26 p.
- KISTLER, R.C. (1986). *Das Verhalten der Schwermetalle bei der Pyrolyse von Klärschlamm*. Diss. ETH Nr. 7'954, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich. Zürich.
- KLAAS, A. (2004). Wasserleitungen. Fa. Klaas, Plettenberg, Deutschland. Online im Internet: <http://www.wasser.de/haupt.pl?url=http://www.wasser.de/verbraucher/wasserleitung/index.htm>. Stand 26.07.2004.
- KLEINE-ALLEKOTTE, H. und GRESSMANN, T. (1999). *Kupfer im Hochbau*. Deutsches Kupferinstitut, Düsseldorf. 154 p.
- KNOEPFEL, I. (1995). *Indikatorensystem für die ökologische Bewertung des Transports von Energie*. Diss. ETH Nr. 11'146, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich. Zürich.
- KOHLER, N., HASSLER, U. und PASCHEN, H. (Ed.)(1999). *Stoffströme und Kosten in den Bereichen Bauen und Wohnen*. ENQUETE-KOMMISSION "SCHUTZ DES MENSCHEN UND DER UMWELT" DES 13. DT. BUNDESTAGES; BUNDESHAUS BONN. Konzept Nachhaltigkeit. Springer-Verlag, Berlin. 301 p.
- KOMMUNIKATION SBB (Ed.)(2001). *Zahlen SBB*. Bern.
- KÜNG, L. (2003a). Auskunft zum Übertragungsnetz der ewz. Persönliche Mitteilung vom 10.07.2003. Elektrizitätswerk der Stadt Zürich (ewz), Zürich.
- KÜNG, L. (2003b). Auskunft zu den Leiterquerschnitten des ewz. Persönliche Mitteilung vom 16.07.2003. Elektrizitätswerk der Stadt Zürich (ewz), Zürich.
- KÜNG, M. (2003c). Auskunft zum Stromnetz der IWB. Persönliche Mitteilung vom 15.07.2003. Industrielle Werke Basel (IWB), Basel.
- LANDNER, L. und LINDESTROM, L. (1998). *Copper in society and in the environment. An account of the facts on fluxes, amounts and effects of copper in Sweden*. 2nd rev. ed., Swedish Environmental Research Group MFG. 329 p.
- LANGBEIN, S., STEINER, M. und BOLLER, M.A. (2005). *Wasser- und Materialflüsse bei der Entwässerung von Metall-, Ziegel-, Kies- und Gründächern*. Forschungsprojekt-Schlussbericht. Eidgenössische Anstalt für Wasserversorgung Abwasserreinigung und Gewässerschutz (Eawag), Hochschuler für Architektur, Bau und Holz (HSB), Amt für Gewässerschutz und Abfallwirtschaft des Kantons Bern (GSA), Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), Dübendorf. 84 p.

- LAWATSHECK, J. (1990). *Mengen- und Wertbetrachtung der 50 wichtigsten mineralischen Rohstoffe der Welt*. Diss., Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg. Erlangen, Deutschland. 767 p.
- LEUENBERGER-MINGER, A.U., FALLER, M. und RICHNER, P. (2002). Runoff of copper and zinc caused by atmospheric corrosion. *Materials and Corrosion* **53**: 157-164.
- LICHTENSTEIGER, T., LANGMEIER, M. und BRUNNER, P.H. (1988). *Klärschlamm in Deponien. Cost-681-Forschungsprojekt. Schlussbericht*. Eidgenössische Technische Hochschule Zürich (ETH), Eidgenössische Anstalt für Wasserversorgung Abwasserreinigung und Gewässerschutz (EAWAG), Dübendorf. 57 p.
- LICHTENSTEIGER, T. (1996). Müllschlacken aus petrologischer Sicht. *Geowissenschaften* **14**(5): 173-179.
- LICHTENSTEIGER, T. (2002). Die petrologische Evaluation. In: *Im Einklang mit der Erde. Geowissenschaften für die Zukunft*. GESELLSCHAFT FÜR UMWELTGEOWISSENSCHAFTEN (GUG) IN DER DEUTSCHEN GEOLOGISCHEN GESELLSCHAFT (DGG) (Ed.). Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg: 228.
- LICHTENSTEIGER, T. (Ed.)(2006). *Bauwerke als Ressourcennutzer und Ressourcenspender in der langfristigen Entwicklung urbaner Systeme. Ergebnisse aus dem Forschungsprojekt ARK04 - Gebäude im Umbau urbaner Kulturlandschaften*. vdf Hochschulverlag an der ETH Zürich, Zürich. 162 p.
- LIENHARD, H. (1979). Das föderalistische System der schweizerischen Elektrizitätsversorgung. Bedeutung und Probleme. *Bull. ASE/UCS* **70**(16): 876-885.
- LIPKOW, A. (2001). Untersuchung von Stadtstrukturdaten in den Städten Leipzig, Zittau und Freiberg zur Ermittlung von Orientierungswerten zur Infrastrukturausstattung. In: Arbeitsgruppe "Stofflich-energetisch". **Bulletin Nr. 3.5**. Stand 14.05.2001. Dresden. 34 p.
- LITRA (2001). Schweizer Verkehrszahlen. Informationsdienst für den öffentlichen Verkehr (LITRA). Online im Internet: <http://www.litra.ch>. Stand 8.05.2003.
- LUTZ, S. (2004). Auskunft zur Installationsdichte von Bodenheizungen. Persönliche Mitteilung vom 5.04.2004. Störi Mantel Wärmetechnik AG, Wädenswil.
- MAIBACH, M., PETER, D., SEILER, B. und SCHREYER, C. (1995). *Ökoinventar Transporte: Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Transportsystemen und den Einbezug von Transportsystemen in Ökobilanzen. Technischer Schlussbericht. 2., korrig. Aufl., INFRAS, Zürich. 340 p.*
- MARTY (2003). Verfügbarkeit von Netzdaten des ESTI als Aufsichtsbehörde. Persönliche Mitteilung vom 11.07.2003. Eidg. Starkstrominspektorat (ESTI), Fehraltorf.
- MASON, S.A. und MÜLLER, A. (2004). *Umwelt- und Ressourcentrends 2000-2030. Konsequenzen für die Schweizer Sicherheitspolitik*. Studie. Forschungsstelle für Sicherheitspolitik - Center for Security Studies (CSS), Zürich. 83 p.
- MAYS, L.W. (Ed.)(1999). *Water distribution systems handbook*. McGraw-Hill Books of Interest. The McGraw-Hill Companies, New York.
- McGRAW-HILL (2005). Fundamentals on Graphics Communication, 3/e. McGraw-Hill Higher Education. Online im Internet: http://highered.mcgraw-hill.com/sites/0072322098/student_view0/glossary_s.html#. Stand 17.02.2005.
- MEADOWS, D. (1972). *Die Grenzen des Wachstums. Bericht des Club of Rome zur Lage der Menschheit*. Deutsche Verlags-Anstalt, Stuttgart. 183 p.
- MEADOWS, D.H., RANDERS, J. und MEADOWS, D. (2004). *Limits to growth: The 30-year update*. Rev. ed., Chelsea Green Publishing, White River Junction. 338 p.

- MEADOWS, D.L. (2005). Limits to Growth - Lessons from 30 Years of Research and Debate. Vortrag vom 21.01.2005. Zürich.
- MEIER (2002). Auskunft zur Renovation des Referenzgebäudes EFH2. Persönliche Mitteilung vom 23.09.2002. Bewohner des Nachbargebäudes, Baltenswil ZH.
- MEYER, P. (1999). *Gesamtleitung von Bauten. Ein Lehrbuch der Projektsteuerung*. vdf Hochschulverlag an der ETH Zürich, Zürich. 479 p.
- MITHRARATNE, N. und VALE, B. (2004). Life cycle analysis model for New Zealand houses. *Building and Environment* **39**: 483-492.
- MÜLLER, D., PERROCHET, S., FAIST, M. und JAEGER, J. (1998). Ernähren und Erholen mit knapper werdender Landschaft. In: *Netzstadt. Transdisziplinäre Methoden zum Umbau urbaner Systeme*. BACCINI, P. und OSWALD, F. (Ed.). vdf Hochschulverlag an der ETH Zürich, Zürich: 27-58.
- MURAWSKI, H. (1992). *Geologisches Wörterbuch für Geologen, Paläontologen, Mineralogen, Geographen, Geophysiker, Bodenkundler, Bau- und Bergingenieure, Studierende und alle Freunde der Geologie*. 9., völlig überarb. und erweit. Aufl., Enke, Stuttgart. 254 p.
- MUTZNER, J. (1995). *Die Stromversorgung der Schweiz: Entwicklung und Struktur*. Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke, Zürich. 40 p.
- NEERACHER, J.O. (1988). Blitzschutz aus der Sicht der Versicherer. In: *Die neuen Leitsätze des SEV für Blitzschutzanlagen (Informationstagung, Kongresshaus Zürich)*. Schweizerischer Elektrotechnischer Verein (SEV), Zürich: 11-19.
- NEUFERT, E. (1961). *Bauordnungslehre: Handbuch für rationelles Bauen nach geregelterem Mass*. Ullstein Fachverlag, Frankfurt/Main, Berlin. 336 p.
- NEXANS (2004). e-service product catalogue. Nexans HQ, Paris. Online im Internet: <http://www.nexans.com/internet/Navigate.nx?id=1260>. Stand 16.03.2004.
- OBERNOSTERER, R., MÖSLINGER, J. und BRUNNER, P.H. (1998). *Der Einfluss der Raumplanung auf den regionalen Stoff- und Energiehaushalt: Ein Beitrag zur Bestimmung und Quantifizierung*. Bericht im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Jugend und Familie. Technische Universität Wien, Institut für Wassergüte und Abfallwirtschaft, Wien. 113 p.
- OBERNOSTERER, R. und BRUNNER, P.H. (1999). *Diffusive Emissions from Urban Metal Stocks - An Environmental Problem?* EUROCORR'99 - European Corrosion Congress, Solution of Corrosion Problems in Advanced Technologies, Frankfurt am Main. 7 p.
- OBERNOSTERER, R. (2002). Urban metal management. Substance Flow and Stock Analysis as a tool to achieve sustainable development. In: Conference in the framework of the EUREGIA exhibition: Regional Cycles: Regional Economy towards Sustainability, 31. October-2. November 2002. Conference talk, Stand 2002. Leipzig.
- OBERNOSTERER, R., REINER, I. und SMUTNY, R. (2003). *Urbanes Ressourcen Management: Fallstudie Wien. Teilbereich Schadstoffmanagement diffuser Metallemissionen*. Endbericht. Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft und Kultur, Abtlg. Umweltwissenschaften, Wien/Villach. 255 p.
- OETIKER, D. (2002). *Abfall-Management von Elektronik-Produkten*. Diplomarbeit (Kurzfassung), Eidgenössische Technische Hochschule Zürich. Zürich. 32 p.
- OSWALD, F., BACCINI, P. und MICHAELI, M. (2003). *Netzstadt - Einführung in das Stadtentwerfen*. Birkhäuser, Basel. 303 p.
- OZD (2001). *Schweizerische Aussenhandelsstatistik - Jahresstatistik. Band I, 2000*. OZD SEKTION STATISTIK (Ed.). Eidgenössische Oberzolldirektion, Bern.

- PATURI, F.R. (1988). *Chronik der Technik*. Chronik-Verlag, Dortmund. 639 p.
- PESTEL, E. (1988). *Jenseits der Grenzen des Wachstums. Bericht an den Club of Rome*. Deutsche Verlags-Anstalt, Stuttgart. 208 p.
- PETERKA, V. (1977). *Macrodynamics of Technological Change: Market Penetration by New Technologies*. IIASA-Research Report.
- POHL, W. (1992). *W. & W.E.Petrascheck's Lagerstättenlehre. Eine Einführung in die Wissenschaft von den mineralischen Bodenschätzen*. 4. Aufl., Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart. 341 p.
- PRACHT, K. (2001). *Fassaden- und Dachelemente aus Metall*. Coleman, Lübeck. 160 p.
- PRIM, C., REICHENBACH, A. und ZURFLUH, K. (1997). *Analyse und Beschreibung des Kabel-Haushaltes des Gesamt-Leitungsnetzes der Telecom Schweiz und dessen zeitliche Entwicklung*. Semesterarbeit. Forschungsabteilung Stoffhaushalt und Entsorgungstechnik, ETH Zürich, Zürich. 31 p.
- PROTZER, H. und RÖBBERT, F. (1997). Verhalten von Kupferoberflächen an der Atmosphäre. DKI Sonderdruck. **s.131**. Deutsches Kupferinstitut. Düsseldorf.
- PTT (1994). *Statistisches Jahrbuch*. Generaldirektion Schweizerische Post- Telefon- und Telegrafengebäude, Bern.
- PÜTTMER, S. (2003). *Entfernung von Schwermetallen aus kontaminierten Böden und anschliessende Aufarbeitung der anfallenden Extraktionslösungen*. Diss., Technische Universität München. 208 p.
- QUACK, D. (1997). Komplexe Zusammenhänge. Ökobilanzen von Gebäuden liefern wichtige Informationen für die Bauplanung. *Müllmagazin* 2: 11-14.
- REAL, M.G. (1998). *A methodology for evaluating the metabolism in the large scale introduction of renewable energy systems*. Diss. ETH Nr. 12'937, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich. Zürich. 90 p.
- RECHBERGER, H. und GRAEDEL, T.E. (2002). The contemporary European copper cycle: statistical entropy analysis. *Ecological Economics* 42(1-2): 59-72.
- REDLE, M. (1999). *Kies- und Energiehaushalt urbaner Regionen in Abhängigkeit der Siedlungsentwicklung*. Diss. ETH Nr. 13'108, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich. Zürich.
- REICHERT, J.K. und DE HAAR, U. (Ed.)(1982). *Metalle*. Schadstoffe im Wasser Band I. Boldt, Boppard, Deutschland.
- RENTZ, O., RUCH, M., NICOLAI, M., SPENGLER, T. und SCHULTMANN, F. (1994). *Selektiver Rückbau und Recycling von Gebäuden, dargestellt am Hotel Post in Dobel, Landkreis Calw*. Forschungsbericht. Landesanstalt für Umweltforschung, Landsberg, Deutschland.
- RITZMANN-BLICKENSTORFER, H. und SIEGENTHALER, H. (1996). *Historische Statistik der Schweiz*. Chronos Verlag, Zürich. 1221 p.
- RÖBBERT, F. (1994). Dachentwässerung mit Kupfer. DKI Sonderdruck. **s.146**. Deutsches Kupferinstitut, Stand Juli 1994. Düsseldorf. 20 p.
- RUBLI, S. (2003a). *Güterflussanalyse der Bauabfallentsorgung des Verwaltungszentrum Werd*. Schlussbericht. Wertstoff-Börse GmbH, Zürich. 28 p.
- RUBLI, S. (2003b). Unterschiede der Installationsgrade von Strom- und Telekommunikationsanlagen zwischen den verschiedenen Gebäudenutzungstypen. Persönliche Mitteilung vom 4.07.2003. Wertstoff-Börse GmbH, Zürich.
- RYKIEL, E.J. (1996). Testing ecological models: the meaning of validation. *Ecological Modelling* 90: 229-244.

- SCHAAL, R. (Ed.)(1990). *Baukonstruktion der Moderne aus heutiger Sicht*. Birkhäuser, Basel.
- SCHACHERMAYER, E., BAUER, G., RITTER, E. und BRUNNER, P.H. (1997). *Messung der Güter- und Stoffbilanz einer Müllverbrennungsanlage*. Endbericht. Institut für Wassergüte und Abfallwirtschaft AWS, Technische Universität Wien, Wien. 105 p.
- SCHÄFER, T. und PRETZ, T. (2002). *Access to secondary copper from WEEE?* TMS Fall 2002, Extraction and Processing Division Meeting on Recycling and Waste Treatment in Mineral and Metal, Lulea. 8 p.
- SCHÄRER, J. (1975). *Die Verwertung des Klärschlammes in der schweizerischen Landwirtschaft*. Zürich. 121 p.
- SCHERER, G.A. (2004). VDE-Kompass. Grundwissen für das Elektrotechniker-Handwerk, 6. Ergänzungslieferung. Loseblattsammlung, Stand März 2004. 40 p.
- SCHMICKL, H. (1993). *Erstellung von Schadstoffbilanzen und Untersuchungen des Abbaus von organischen Schadstoffen der Müllverbrennungsanlage Spittelau*. Wien. 161 p.
- SCHMID (2003). Auskunft über das Höchstspannungsnetz. Persönliche Mitteilung vom 11.07.2003. ETRANS AG, Laufenburg.
- SCHMITT, H. und HEENE, A. (1996). *Hochbaukonstruktion. Die Bauteile und das Bauegefüge: Grundlagen des heutigen Bauens*. 13., aktual. Aufl., Vieweg, Braunschweig, Wiesbaden. 756 p.
- SCHNEIDERHÖHN, H. (1955). *Erzlagerstätten. Kurzvorlesungen zur Einführung und zur Wiederholung*. 3., vollst. neu bearb. Aufl., VEB Gustav Fischer Verlag, Jena. 375 p.
- SCHOLTZ, H. (1905). *Verschiedene Konstruktionen, insbesondere: Heizungs-, Lüftungs-, Wasserversorgungs- und Beleuchtungs-Anlagen, Haustelegraphen und Telephone. Grundbau. Mit einem Anhang: Die Bauführung*. 5., gänzlich Neubearb. Aufl., J. M. Gebhardt's Verlag, Leipzig. 526 p.
- SCHRANZ, D. (2002). Kupfereinsatz im Dachbereich. Persönliche Mitteilung vom 5.04.2002. Sanitäre Anlagen & Spenglerei Schranz AG, Riehen.
- SCHULZE, H.-J. und WALTHER, P. (1990). *Gebäudeatlas - Mehrfamilienwohngebäude der Baujahre 1880 bis 1980*. Bauinformation DDR, Berlin.
- SCHWAIGER, B. (2002). *Strukturelle und dynamische Modellierung von Gebäudebeständen*. Diss., Universität Karlsruhe (TH). Karlsruhe. 304 p.
- SEIFERT, E. und SCHLICK, F. (Ed.)(1985). *Der Fensterbau. Lehrbuch für Ausbildung und Fortbildung*. Hofmann, Schorndorf. 436 p.
- SEKINGER, M. (2004). Besichtigung des Rückbaus der Wohnsiedlung Werdwies in Altstetten. Exkursion der Forschungsabteilung Stoffhaushalt und Entsorgungstechnik/EAWAG vom 7.07.2004. Zürich-Altstetten.
- SELM (2002). Informationen zur Heizungstechnik: Bauteile und ihr Aufbau. Persönliche Mitteilung vom 12.04.2002. Selm Heizsysteme AG, Uznach.
- SEV (1988). *Neue Leitsätze des SEV für Blitzschutzanlagen*. Informationstagung, Kongresshaus Zürich. Schweizerischer Elektrotechnischer Verein, Zentrale Dienste. 113 p.
- SGTK (Ed.)(1997). *Die mineralischen Rohstoffe der Schweiz*. Schweizerische Geotechnische Kommission, Zürich. 522 p.
- SIA-Empfehlung 205 (1984). Verlegung von unterirdischen Leitungen. Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein. **Schweizer Norm 531 205**. 48 p.
- SIA (1993). *Flächen und Volumen von Gebäuden und Anlagen. Definitionen*. Ausg. 1993, Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein, Zürich. 32 p.

- SINGEISEN, C.W. und BOLLER, M.A. (1997). *Dachabfluss als Quelle diffuser Kupferbelastungen. Bilanzierung der Kupferfracht im Dachwasserabfluss über das Einzugsgebiet der Töss*. EAWAG, Dübendorf.
- SOMMER (2004). Auskunft zum Handelsvolumen der schweizerischen Kabelproduktion. Persönliche Mitteilung vom 8.03.2004. Brugg Cables Schweiz, Brugg.
- SÖRME, L., BERGBÄCK, B. und LOHM, U. (2001). Century Perspective of Heavy Metal Use in Urban Areas. *Water, Air and Soil Pollution: Focus* 1(3/4): 197-211.
- SPECOGNA (2002). Auskunft zum Einsatz von Kupfer in Heizungsanlagen. Persönliche Mitteilung vom 1.10.2002. Architekten Specogna + Partner AG, Oetwil am See.
- STADELMANN, P., RENNER, F. und CRESPI, C. (1995). *Zustandsbericht und Massnahmenkatalog für die Umsetzung des neuen Gewässerschutzgesetzes*. Kantonales Amt für Umweltschutz Luzern, Luzern. 80 p.
- STALDER, F. (1988). Anforderungen an Bauteile und Werkstoffe, Korrosionsprobleme. In: *Die neuen Leitsätze des SEV für Blitzschutzanlagen (Informationstagung, Kongresshaus Zürich)*. SEV (Ed.). Schweizerischer Elektrotechnischer Verein: 11-19.
- STEINER, M. (2003). *Adsorption von Kupfer aus Niederschlagsabflüssen an granuliertes Eisenhydroxid*. Diss. ETH Nr. 14'878, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich. Zürich. 140 p.
- StoV (2002). Verordnung über umweltgefährdende Stoffe. **SR 814.013**. 15 p.
- SUHLING, L. (1983). *Aufschliessen, Gewinnen und Fördern. Geschichte des Bergbaus*. Rowohlt Taschenbuch Verlag, Reinbek bei Hamburg. 245 p.
- SUHLING, L. (1990). Vom Erz zum Metall - Zur Montangeschichte des technisch wichtigsten Buntmetalls. In: *Der Schlag, der in den Ohren schallt: Zur Geschichte der Kupfergewinnung und Kupferverarbeitung*. LANDSCHAFTSVERBAND WESTFALEN-LIPPE (Ed.). Westfälisches Freilichtmuseum Hagen, Hagen, Deutschland: 27-72.
- SUTER, L., THAT, P. und TINNER, B. (2003). *Kupfer in Mobilien: Ressourcenwirtschaftliche Bedeutung des Elektronikschrottes*. Technischer Bericht zum Vertiefungsblock. Forschungsabteilung Stoffhaushalt und Entsorgungstechnik, ETH Zürich, Zürich. 20 p.
- SVGW (2000). *Statistische Erhebungen der Wasserversorgungen in der Schweiz*. Schweizerischer Verein des Gas- und Wasserfaches, Zürich.
- THUT, D. (2001). *Aufbereitung von Kehrichtschlacken mit mechanischen Separationsverfahren - Metallrecycling aus Kehrichtschlacke*. Diplomarbeit, Hochschule für Technik Rapperswil (HSR). Rapperswil.
- TRÄCHSEL, B. (1988). Begriffe "Äusserer Blitzschutz": Funktionen und Einrichtungen des äusseren Blitzschutzes, bestehend aus Fangleitern, Ableiter und Erdung; Begriffe, Dimensionierung, Beispiele. In: *Informationstagung "Die neuen Leitsätze des SEV für Blitzschutzanlagen"*. SEV (Ed.). Schweizerischer Elektrotechnischer Verein, Zürich: 31-51.
- TUCHSCHMID, M.P., DIETRICH, V.J., RICHNER, P., LIENEMANN, P., DESAULES, A., KÜNDIG, R. und VOGLER, R. (1995). *Quantifizierung und Regionalisierung von Schwermetall- und Fluorgehalten bodenbildender Gesteine der Schweiz*. Umwelt-Materialien. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL)(Ed.), Bern. 130 p.
- UNCED (1992). *The global partnership for environment and development. A guide to Agenda 21*. United Nations Conference on Environment and Development, Geneva. 116 p.
- VALDA, A. und WESTERMANN, R. (2004). *Die brachliegende Schweiz - Entwicklungschancen im Herzen von Agglomerationen*. Bundesamt für Raumentwicklung (ARE), Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), Bern. 19 p.

- VON BEERS, D. und GRAEDEL, T.E. (2003). The magnitude and spatial distribution of in-use copper stocks in Cape Town, South Africa. *South African Journal of Science* **99**: 61-69.
- VAN DER VOET, E., GUINÉE, J.B. und DE HAES, H.A.U. (Ed.)(2000). *Heavy Metals: A Problem Solved? Methods and Models to Evaluate Policy Strategies for Heavy Metals*. Environment & Policy 22. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands. 242 p.
- VDM (1988). *Usancen und Klassifizierungen des Metallhandels*. Unveränd. Nachdruck Juni 1999. Verein Deutscher Metallhändler e.V., Bundesverband des NE-Metallgrosshandels und der NE-Metallrecyclingwirtschaft, Bonn. 47 p.
- VKF und VBSF (1993). *Die neue Brandschutz-Norm der VKF. Broschüre zur VBSF-Herbsttagung im Rahmen der Informationstagung Sicherheit 93 vom 23. bis 26. November 1993, Zürich*. VEREINIGUNG KANTONALER FEUERVERSICHERUNGEN und SCHWEIZERISCHER VEREIN VON BRANDSCHUTZ- UND SICHERHEITSFACHLEUTEN (Ed.). MediaSec, Forch. 128 p.
- VON ARX, U. (2006). *Kupfer. Verbrauch, Umwelteinträge und -vorkommen*. Umwelt-Wissen 06/01. Bundesamt für Umwelt (BAFU), Bern. 163 p.
- VSA (2002). *Regenwasserentsorgung. Richtlinie zur Versickerung, Retention und Ableitung von Niederschlagswasser in Siedlungsgebieten*. Verband Schweizer Abwasser- und Gewässerschutzfachleute, Zürich. 120 p.
- VSE (2003). Webseite. Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke. Online im Internet: <http://www.vse.ch/de/internet/home.html>. Stand 10.07.2003.
- WELLMER, F.-W. und BECKER-PLATEN, J.D. (Ed.)(1999). *Mit der Erde leben. Beiträge Geologischer Dienste zur Daseinsvorsorge und nachhaltigen Entwicklung*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.
- WINKLER, W. und FRÖHLICH, P.J. (1998). *Hochbaukosten - Flächen - Rauminhalte. Kommentar zu DIN 276, DIN 277, DIN 18022 und DIN 18960*. 10., überarb. Aufl., Vieweg, Berlin. 284 p.
- WITTMER, D., LICHTENSTEIGER, T. und BACCINI, P. (2003). *Copper exploration for urban mining*. Copper 2003-Cobre 2003. The 5th International Conference, Santiago, Chile. Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum (CIM), Montreal, Quebec. 85-101 p.
- WOHLA (2002). Auskunft zur aktuellen Installationspraxis bei Sanitäranlagen. Persönliche Mitteilung vom 30.09.2002. Werdna AG Sanitär und Heizung, Dübendorf.
- WRI (1996). *World resources: A guide to the global environment. The urban Environment*. World Resources Institute (Washington DC), Amsterdam. 365 p.
- ZAUDY, R. (1930). Die neuen Vorschriften des VDE für die Errichtung von Starkstromanlagen mit Betriebsspannungen unter 1000 Volt. *Elektrotechnische Zeitschrift (Zentralblatt für Elektrotechnik)* **51**(1-26): 4-7.
- ZELTNER, C. (1998). *Petrologische Evaluation der thermischen Behandlung von Siedlungsabfällen über Schmelzprozesse*. Diss. ETH Nr. 12'688, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich. Zürich. 275 p.
- ZELTNER, C., BADER, H.-P., SCHEIDEGGER, R. und BACCINI, P. (1999). Sustainable metal management exemplified by copper in the USA. *Regional Environmental Change* **1**(1): 31-46.
- ZELTNER, C. und LICHTENSTEIGER, T. (2002). Thermal Waste Treatment and Resource Management - A Petrologic Approach to Control the Genesis of Materials in Smelting Processes. *Environmental Engineering and Policy* **3**(1-2): 75-86.
- ZIMMERMANN (2004). Auskunft zur Zolltarifizierung der Schweiz. Persönliche Mitteilung vom 14.02.2005. Eidgenössische Zollverwaltung (EZV), Bern.

Anhang