

Anhang

Inhaltsverzeichnis des Anhangs

A.1 Gebäude	A-3
A.1.1 Gebäudebestand	A-3
A.1.2 Umfang der Produktgruppen	A-5
A.1.3 Referenzgebäude	A-6
A.1.4 Spezifische Masse	A-8
A.1.5 Installationsdichte	A-11
A.1.6 Häufigkeiten	A-19
A.1.7 Historische Entwicklung des Hauptlagers <i>Gebäude</i>	A-24
A.1.8 Einfluss langanhaltender Renovationszyklen auf das Hauptlager <i>Gebäude</i>	A-26
A.2 Infrastruktur	A-29
A.2.1 Stromnetz.....	A-29
A.2.2 Verkehrsnetze der Schweiz.....	A-31
A.3 Übersicht über die Lager	A-33
A.3.1 Die urbanen Lagerstätten der Schweiz	A-33
A.3.2 Unsicherheitsanalyse der Hochrechnungen.....	A-34
A.3.3 Wachstumskurven	A-41
A.4 Modell	A-43
A.4.1 System	A-43
A.4.2 Systemvariablen und Unbekannte.....	A-43
A.4.3 Modellparameter	A-47
A.4.4 Systemgleichungen	A-54
A.4.5 Bewertungskriterien	A-62
A.4.6 Kalibrierung des Modells <i>Cuprum</i>	A-63
A.5 Literaturverzeichnis des Anhangs	A-79
Curriculum vitae	A-81

A.1 Gebäude

A.1.1 Gebäudebestand

A.1.1.1 Heterogenität des Gebäudebestands

Die Materialgehalte von Gebäuden streuen stark. Der Metallgehalt kann beispielsweise bis zu Faktor 10 und mehr streuen (Abb. A-1). Möglicherweise nahm der Metallgehalt im Verlauf des 20. Jahrhunderts zu; für eine gesicherte Aussage wären weitere Untersuchungen notwendig.

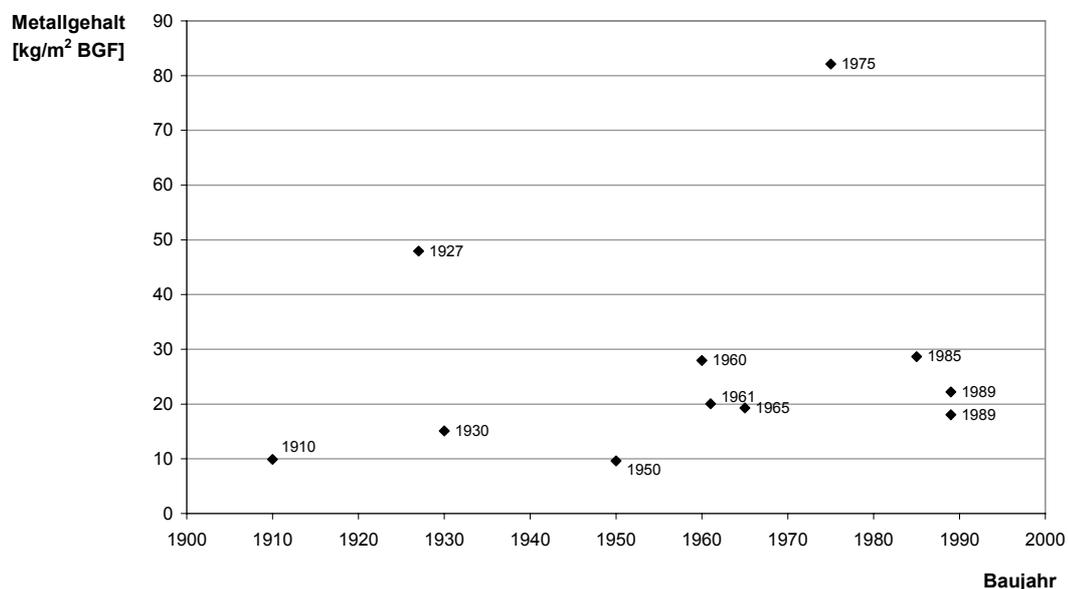


Abb. A-1: Metallgehalt von Gebäuden (Eisen plus Nichteisenmetalle, inklusive Bau- und Betonstahl, Kabel) in Abhängigkeit des Baujahrs (20. Jahrhundert). Quelle: ausgewählte Gebäude nach GRUHLER *et al.* (2002).

A.1.1.2 Gebäudetypologie

Um Aussagen über Gebäude machen zu können, teilt man die Grundgesamtheit von Gebäuden in übersichtlichere, da homogenere Teilgesamtheiten (Gebäudeklassen), die trotz Verschiedenartigkeit der einzelnen Gebäude in sich homogen sind. Zur Abbildung und Beschreibung der Gebäude gibt es verschiedene Vorschläge zur Gruppierung bzw. Klassifizierung auf der Grundlage definierter Merkmale (FRIEDRICHS 1973). Häufig anzutreffende Klassifizierungskriterien sind je nach Ziel der Arbeit die Nutzung¹, das Baujahr, die Grösse (Geschosszahl) und die Bauweise² (SCHULZE und WALTHER 1990; GÖRG 1997; GRUHLER *et al.* 2002).

Oft werden die einzelnen Gebäudetypen durch einen Gebäudetypvertreter verkörpert, ein Gebäude, das real existiert und typisch ist für die Individuen des Gebäudetyps. Vereinfachend setzt man bei diesem Ansatz das typische Gebäude als durchschnittlich für seine Typklasse. Die Gesamtzahl der er-

¹ Nutzungstypen sind z.B. Einfamilienhäuser, Mehrfamilienhäuser, Dienstleistungsgebäude usw.

² Z.B. Massivbau, Fachwerk usw.; gelegentlich wird auch der Term „Bauart“ benutzt (beispielsweise bei GÖRG (1997)).

forderlichen Gebäudetypvertreter eines Gebäudebestandes hängt von der Genauigkeit des Gebäude-modells ab; üblich sind 20 bis 150 solcher Vertreter (GÖRG 1997; GRUHLER *et al.* 2002; KOHLER *et al.* 1999).

Ein neuerer Ansatz ist die Bildung eines fiktiven Modell-Gebäudes, das die durchschnittliche Grösse des Gebäudetyps mit der durchschnittlichen stofflichen Zusammensetzung des Gebäudebestandes verknüpft und damit nicht nur ein Repräsentant, sondern Durchschnittsgebäude des Teilbestandes ist (LICHTENSTEIGER 2006). Dieser Ansatz wird im Projekt ARK04 verfolgt, bei dem die Durchschnittsgebäude ARK-Häuser genannt werden. Folglich bilden die ARK-Häuser die Gebäudeeigenschaften ihres Teilbestandes „im Kleinen“ ab: Ein ARK-Haus hat die durchschnittliche Grösse eines Gebäudes dieses Teilbestandes, zum Beispiel ist seine Geschossfläche gleich der Geschossfläche des gesamten Teilbestandes dividiert durch die Anzahl seiner Individuen. Analog gilt dies auch für seine Geometrie und seine Bauweise: Das ARK-Haus hat teilweise ein geneigtes Dach, teilweise ein Flachdach; teilweise Aussenwände aus Beton, teilweise aus Ziegelstein usf. Mit ziemlicher Sicherheit existiert solch ein konzipiertes ARK-Haus demnach nicht.

A.1.1.3 Schweizerischer Gebäudebestand

Der schweizerische Gebäudebestand vervielfacht sich im Verlauf des 20. Jahrhunderts: Sowohl die Bruttogeschoss-, als auch die Dachflächen wachsen auf mehr als das Dreifache (Abb. A-2, Abb. A-3).

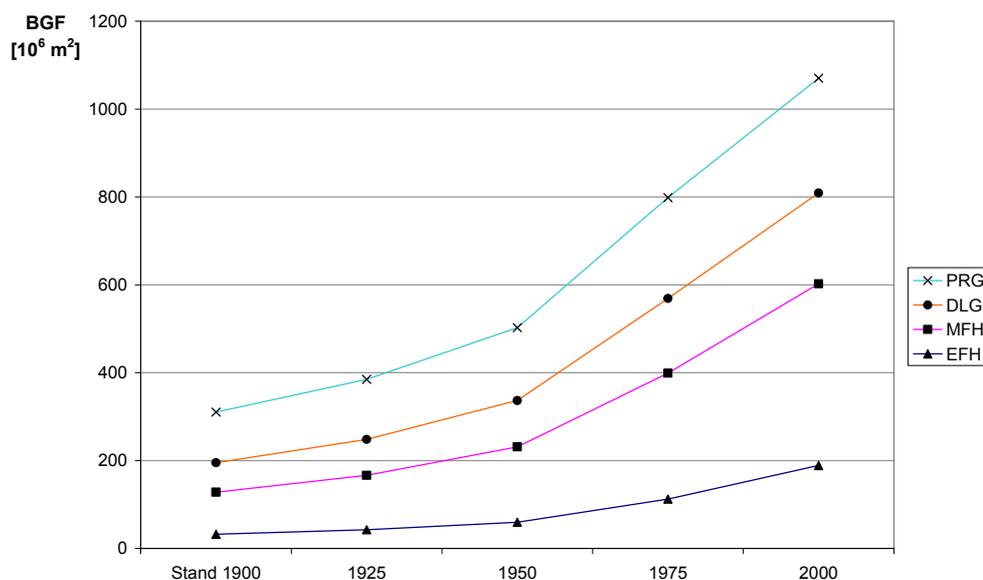


Abb. A-2: Entwicklung der **kumulierten** Bruttogeschossflächen (BGF) der Schweiz im 20. Jahrhundert (die oberste Linie bedeutet also die Summe aller vier Teilbestände). Lineare Interpolation der berechneten Werte. Quelle: nach HENSELER *et al.* (2006).

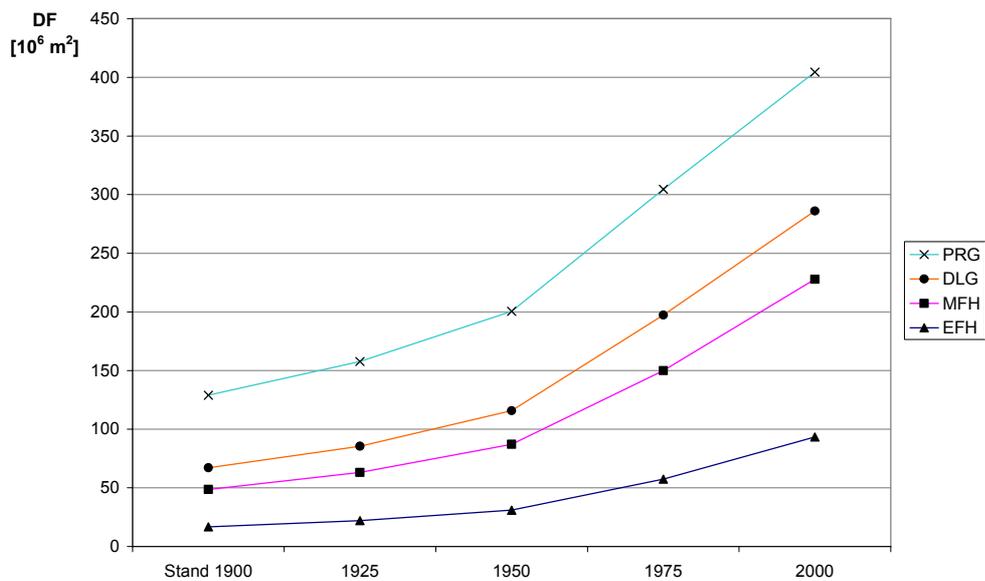


Abb. A-3: Entwicklung der **kumulierten** Dachflächen (DF) der Schweiz im 20. Jahrhundert (die oberste Linie bedeutet also die Summe aller vier Teilbestände). Die Dachfläche ist abgeleitet von der Bruttogeschossfläche unter eigenen Annahmen zur durchschnittlichen Gebäudegeometrie (siehe Kap. 2.4.3). Lineare Interpolation der berechneten Werte. Quelle: nach HENSELER *et al.* (2006) und eigenen Annahmen.

A.1.2 Umfang der Produktgruppen

Die in Tab. A-1 aufgeführten Produktgruppen entsprechen den üblichen Begriffsdefinitionen der Handwerker und der Literatur (für die Zuordnung zu Funktionsbereichen und Bauelementen: siehe Tab. 2.6). Im Folgenden wird daher die Zuordnung von Produkten zu Produktgruppen in dem Sinne kommentiert, dass Ausnahmen begründet und zweifelhafte Fälle erläutert werden.

Tab. A-1: Die flächen-, längen- und stückspezifischen Einheiten der Produktmengen, der spezifischen Massen und der Installationsdichten, angegeben für die 14 untersuchten Produktgruppen.

Produktgruppe (PG)	Produktmenge	spezifische Masse (sM)	Installationsdichte (ID)
Bedachung/Abdeckung	[m ²]	[kg/m ²]	[m ² /m ² DF]
Dachrinnen	[lfm]	[kg/lfm]	[lfm/m ² DF]
Regenfallrohre	[lfm]	[kg/lfm]	[lfm/m ² DF]
Dachgaupen	[m ²]	[kg/m ²]	[m ² /m ² DF]
Blitzableiter	[lfm]	[kg/lfm]	[lfm/m ² DF]
Stromkabel	[lfm]	[kg/lfm]	[lfm/m ² BGF]
Telekommunikationskabel	[lfm]	[kg/lfm]	[lfm/m ² BGF]
Wasserrohre	[lfm]	[kg/lfm]	[lfm/m ² BGF]
Fittings(Sanitär)	[Stück]	[kg/Stück]	[Stück/m ² BGF]
Roharmaturen(Sanitär)	[Stück]	[kg/Stück]	[Stück/m ² BGF]
Heizungsrohre(Verteilung)	[lfm]	[kg/lfm]	[lfm/m ² BGF]
Fittings(Heizung)	[Stück]	[kg/Stück]	[Stück/m ² BGF]
Roharmaturen(Heizung)	[Stück]	[kg/Stück]	[Stück/m ² BGF]
Heizungsrohre(Fläche)	[lfm]	[kg/lfm]	[lfm/m ² BGF]

Aussenbereich

Im Aussenbereich konnten alle wesentlichen Produktgruppen erfasst werden. Unberücksichtigt blieben Traufenbleche und Haften, Nägel, Rohrschellen, Rinneneinhangstutzen, Rinnenböden usw., Schneefanggitter, Einfassungen, Ziergegenstände wie Wetterhähne oder Messingschilder.

Haustechnik

In der Haustechnik wurden alle Steig- und Verteilleitungen berücksichtigt. Bei den *Stromkabeln* war die Zuleitung ab der Bauwerksaussenkante bis zum Hauptverteiler eingeschlossen. Nicht berücksichtigt wurden der Stromzähler und die Sicherungs- und Verteilkästen. Ebenso wurden die *Telekommunikationskabel* ohne Steuerungsgeräte untersucht. Steuerungskabel aus Glasfaser wurden nicht untersucht.

Bei den Sanitäranlagen waren die Roharmaturen, die sich üblicherweise in Kellerräumen nahe dem Wasserzähler befinden, vollumfänglich eingeschlossen. Die Armaturen zur Wasserentnahme etc. (Feinarmaturen, beispielsweise Wasch- und Spültischarmaturen, Dusch- und Wannenarmaturen, wurden nicht berücksichtigt. Bei den Heizungsanlagen wurden die Verteilrohre inklusive der Fittings und Roharmaturen aufgenommen, ebenso auch die Rohre der Flächenheizungen (Boden-, Decken- und Wandheizungen). Auf eine Betrachtung der Warmwasserboiler wurde wegen Datenengpässen verzichtet; auch ist der Einfluss einer zentralen Warmwassererzeugung – gekoppelt an die Heizungsanlage – nicht einfach zu beurteilen. Aufgrund der Vielfalt bei den Heizungsanlagen wurden die Feuerungsanlagen ausgespart. Dies hatte zur Folge, dass auch Erdwärme- und Solaranlagen unberücksichtigt blieben. Des Weiteren wurde in einer Voruntersuchung gezeigt, dass kupferne Ölleitungen vernachlässigbar sind, sobald die Verteilrohre aus Kupfer bestehen. Aus demselben Grund blieben die Gasleitungen³ unberücksichtigt, die in Gebäuden zur Versorgung von Boilern, Gasherden oder -öfen genutzt werden; zudem sind über die Häufigkeit von Gasleitungen keine Informationen verfügbar.

A.1.3 Referenzgebäude

Die Erhebungen zur Untersuchung der Gebäudeteilbestände wurden in ausgewählten Referenzgebäuden durchgeführt (vgl. Kap. 2.4.3), die in Tab. A-2 aufgelistet sind.

³ Gas kann sowohl als Brennstoff für Heizungen als auch zur Warmwasserbereitung (Gasboiler) dienen. Dementsprechend unterscheiden sich die ID der Gasverteilungen für die beiden Varianten:

Gasboiler: Bei der dezentralen Warmwasserversorgung werden die Gasboiler in oder nahe den Räumen mit Warmwasserbedarf installiert. Dabei sind ein oder mehrere Boiler pro Wohnung üblich, die über die Gasleitung mit Erdgas versorgt werden; zusätzlich wird oft ein Gasherd in der Küche betrieben. Die ID variieren zwischen 0.03 und 0.06 lfm/m² BGF (auf der Basis von fünf MFH aus der Arbeit von GÖRG (1997), siehe Tab. A-16), wobei die Installationsdichte mit zunehmender BGF abnimmt. Ähnliche Werte sind für EFH mit Gasboilern zu erwarten.

Gasheizung: Seit ca. 1960 erfolgt die Warmwasserversorgung überwiegend zentral, so dass nurmehr die Zentralheizung mit Gas versorgt wird. In diesem Fall ist die Versorgungsleitung entsprechend kürzer und die ID daher kleiner.

In beiden Fällen ist damit eine $ID_{\text{Gasleitung}} < 0.1 \text{ lfm/m}^2 \text{ BGF}$ zu erkennen, also ca. um den Faktor 10 niedriger als für die Heizungsrohre (siehe Tab. A-14), da sie nur bis zu den Wärmequellen reichen und nicht bis zu den Wärmespendern (z.B. Radiatoren).

Tab. A-2: Übersicht über die untersuchten Referenzgebäude: Baujahr, Renovationsjahr, Gebäudevolumen, Bruttogeschossfläche, Dachfläche. – n.b. = nicht bestimmt.

Nutzungstyp	Gebäude (Bezeichnung)	Standort	Baujahr	Renovationsjahr	Gebäudevolumen [m ³]	Bruttogeschossfläche [m ² BGF]	Dachfläche [m ² DF]
EFH	EFH1	Stettbach, Dübendorf ZH	1870	1960 2001	967	492	190
EFH	EFH2	Baltenswil ZH	1877	2002	1'176	415	166
EFH	EFH3	Geeren ZH	2002	-	1'052	366	122
EFH	EFH4*	Bergstrasse, Zürich	2002	-	2'944	796	160
EFH	EFH5*	Pfaffhausen ZH	2002	-	965	279	167
EFH	EFH6	BK115	1990	-	890	332	145
MFH	MFH1	Singelsenhof, Riehen BS	2001	-	3'824	1'339	382
MFH	MFH2	Riehen BS	1966	2001	3'599	1'068	426
DLG	DLG1	Rapperswil ZH	1999	-	50'815	11'430	n.b.
DLG	DLG2	Basel	1995	-	n.b.	1'893	286
DLG	DLG3	VZ Werd, Zürich	n.b.	2003	73'211	20'907	1'381

* EFH4 and EFH5 sind beide jeweils Zweifamilienhäuser.

EFH1: „Haus Bleiker“, Stettbachstr. 59, Dübendorf-Stettbach; EFH2: „Haus Neyer“, Bassersdorferstr. 30, Baltenswil; EFH3: Geerenackerstr. 14, Geeren, Dübendorf-Gockhausen; EFH4: „Stadthaus im Wald“, Bergstr. 62/64, Zürich; EFH5: Doppel-EFH *specogna*, Witikonstr. 9-19, Pfaffhausen; EFH6: BK115, oblm 610083; MFH1: „Singelsenhof“, Gartengasse 18/Rössligasse 21, Riehen; MFH2: Pfarreiheim, Pfarrei St. Franziskus, Pfaffenloh, Riehen; DLG1: Hochschule Rapperswil, Foyergebäude, Rapperswil; DLG2: Stellwerk „Auf dem Wolf“, Stellwerk 4, Güterbahnhof Basel; DLG3: „VZ Werd“, Verwaltungszentrum der Stadt Zürich (ehem. UBS AG), Werdstr. 75/79, Zürich.

A.1.4 Spezifische Masse

Auf den folgenden Seiten sind Berechnungen und Überlegungen zur spezifischen Masse dokumentiert, welche in Kap. 3.2.1 genutzt werden.

A.1.4.1 Bleche

Aufgrund der Proportionalität lässt sich die spezifische Masse bei Kenntnis der Blechdicke bestimmen (Abb. A-4).

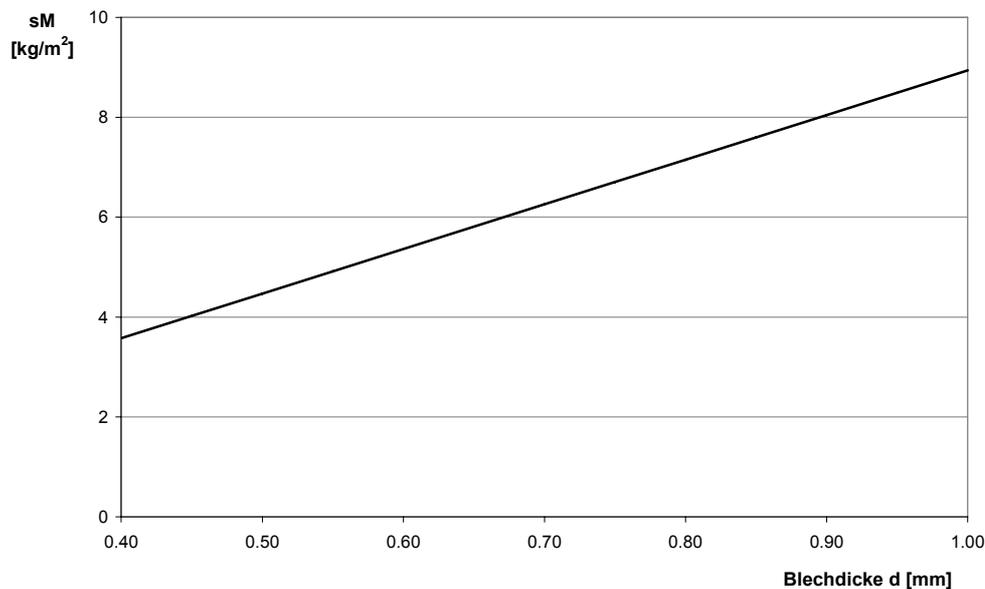


Abb. A-4: Spezifische Masse (Flächengewicht) von Kupferblechen, berechnet als Funktion der Blechdicke mit $\rho_{Cu} = 8.94 \text{ kg/dm}^3$.

A.1.4.2 Dachrinnen und Regenfallrohre

Die Entwässerungsanlage hängt unter anderem von der maximalen Regenspender der Region (Klima), der Grundrissfläche und dem Abflussbeiwert $\psi = \psi(\text{Dachneigung})$ ab. In Abhängigkeit von der Dachfläche (DF) variieren also mit der Rinnenausführung auch die Blechdicken und -breiten für das eingesetzte Metall (SCHMITT und HEENE 1996)(Tab. A-3). Die Zuschnittsbreite für kastenförmige Dachrinnen ist gleich derjenigen der halbrunden Rinnen.

Tab. A-3: Dimensionierung (Masse) von Dachrinnen und Regenfallrohren zur Dachentwässerung nach der DIN 18460 (nach SCHMITT und HEENE (1996)).

DACH-GRUND-FLÄCHE m ²	RICHT-GRÖSSE DIN 18460	ZU-SCHNITT mm	TEILIG	DACH-RINNEN d ₁ φ mm	ZUSCHNITTEILE mm			QUER-SCHNITT cm ²	REGEN-FALL-RÖHRE φ mm	GERINGSTE BLECHDICKE mm			
					d ₂	e ₁	f ₁			ZN	CU	AL	STZN
443	250	500	4		22	9	21	245	150	0,8	0,7	0,8	0,7
243	190	400	5		22	9	11	145	120	0,7	0,7	0,8	0,7
150	150	333	6		20	9	11	92	100	0,7	0,6	0,7	0,6
83	125	285	7		18	7	10	63	80	0,7	0,6	0,7	0,6
83	100	250	8		18	7	10	43	80	0,65	0,6	0,7	0,6
37	80	200	10		16	5	8	25	60	0,65	0,6	0,7	0,6

A.1.4.3 Rohre und Fittings

Die spezifische Masse von Rohren und Fittings hängt vom Durchmesser der Rohre und der Wanddicke ab, die sich im Allgemeinen bei der Anwendung in Sanitär- und Heizungsanlagen unterscheiden. Daher ist die Häufigkeit der verschiedenen Rohrdurchmesser zu untersuchen (Tab. A-4).

Tab. A-4: Sanitäranlage: Häufigkeitsverteilung verschiedener Durchmesser von Wasserrohren und deren Fittings anhand von Produktions-/Verkaufszahlen des Optipress-Systems (vgl. Tab. A-21). Quelle: nach GYSIN (2002).

Durchmesser		Material- querschnitt [mm ²]	Verteilung Laufmeter		Verteilung Material		relat. Anteil der Ø		„Durchschnittsrohr“	
Ø _{aus} [mm]	Ø _{inn} [mm]		Rohre	Fittings	Rohre	Fittings	Rohre [%]	Fittings [%]	Rohre [mm ²]	Fittings [mm ²]
15	13	44.0	224.4	413.7	9'870	18'195	6.5%	8.9%	2.86	3.90
18	16	53.4	102.1	186.1	5'453	9'939	3.6%	4.8%	1.92	2.59
22	20	66.0	398.8	680.1	26'310	44'869	17.4%	21.9%	11.46	14.43
28	25	124.9	310.6	455.4	38'787	56'870	25.6%	27.7%	31.97	34.62
35	32	157.9	223.3	259.4	35'251	40'950	23.3%	20.0%	36.73	31.51
42	39	190.9	80.7	81.7	15'402	15'593	10.2%	7.6%	19.40	14.51
54	50	326.7	62.6	57.3	20'453	18'721	13.5%	9.1%	44.10	29.82
					151'526	205'137	100.0%	100.0%	148.4	131.4

Die Korrelation von spezifischer Masse und Durchmesser ist für Kupferrohre in Abb. A-5 dargestellt. Die spezifische Masse von Heizungsrohren ist aufgrund einer geringeren Wanddicke kleiner als bei Wasserrohren.

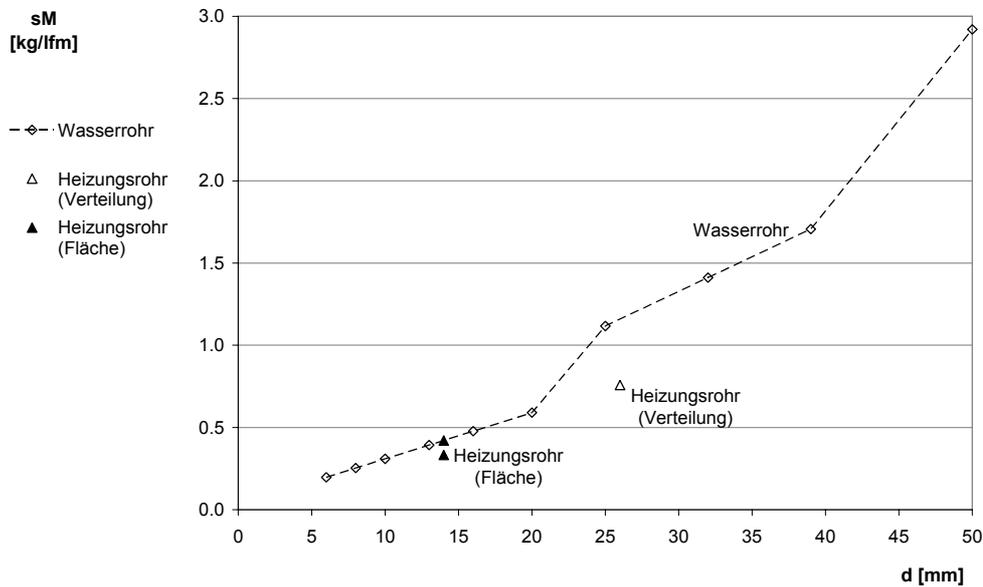


Abb. A-5: Spezifische Masse (sM) häufiger Kupferrohrtypen in Sanitär- und Heizungsanlagen, mit Innendurchmessern (d) von 1/8" bis 2". Die verschiedenen Wasserrohrtypen sind durch die gestrichelte Linie linear interpoliert. Im Vergleich dazu ist die spezifische Massen geläufiger Heizungsrohrtypen (Verteilleitungen bzw. Flächenheizung) geringer. Gewichtsangabe pro Laufmeter Rohr.

A.1.4.4 Roharmaturen (Heizung)

Die Verschiedenartigkeit der Roharmaturen erfordert eine Bestimmung des Gewichts und des Vorhandenseins der diversen Roharmaturentypen (Tab. A-5). Das durchschnittliche Stückgewicht beträgt 0.64 kg/Stück; unter Berücksichtigung des Messinganteils erhält man damit 0.40 kg Cu/Stück.

Tab. A-5: Basisdaten zur Bestimmung der spezifischen Masse und Installationsdichte von Roharmaturen der Heizungsanlage eines Einfamilienhauses (EFH3, BGF = 366 m²): Durch Multiplikation von Stückzahl und geschätztem durchschnittlichem Stückgewicht (Einzelgewicht) wird das Gesamtgewicht des Roharmaturentyps berechnet. Anschliessend wird das Messinggewicht (Ms) in Kupfer (Cu) umgerechnet. Die Roharmaturen bestehen aus Messing mit 63 % Kupferanteil. k.A.: keine Angabe. Quelle: eigene Erhebung.

Roharmaturentyp	Armaturen [Stück]	Stückgewicht Ms [kg]	Gesamtgewicht Ms [kg]	Stückgewicht Cu [kg]	Gesamtgewicht Cu [kg]
Kugelhahnen	8	0.6	4.8	0.378	3.024
Mischer	1	0.8	0.8	0.504	0.504
Umwälzpumpen	1	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
Bodenheizverteiler	3	2.2	6.6	1.386	4.158
Manometer	1	0.2	0.2	0.126	0.126
Entlüfter	1	0.015	0.015	0.009	0.009
Absperrventile	1	0.25	0.25	0.158	0.158
Kugelkesselhahnen	4	0.6	2.4	0.378	1.512
Thermometer	4	0.052	0.21	0.033	0.131
Total	24		15.273		9.6

Zusammenfassend werden zur Berechnung des Kupferlagers im Hauptlager *Gebäude* die spezifischen Massen gemäss Tab. A-6 eingesetzt.

Tab. A-6: Spezifische Massen der Produktgruppen, die zur Berechnung der potentiellen Kupfergehalte verwendet werden (vgl. Kap. 3.2.1).

Produktgruppe	[kg/lfm]	[kg/Stück]	[kg/m ²]	Einheit der ID
Bedachung/Abdeckung	–	–	5.581	[m ² /m ² DF]
Dachrinnen	1.784*	–	–	[lfm/m ² DF]
Fallrohre	2.000**	–	–	[lfm/m ² DF]
Dachgaupen	–	–	5.358	[m ² /m ² DF]
Blitzableiter	0.351	–	–	[lfm/m ² DF]
Stromkabel	0.057	–	–	[lfm/m ² BGF]
Telekommunikationskabel	0.013	–	–	[lfm/m ² BGF]
Wasserrohre	0.582	–	–	[lfm/m ² BGF]
Fittings(Sanitär)	–	0.100	–	[Stück/m ² BGF]
Roharmaturen(Sanitär)	–	2.129	–	[Stück/m ² BGF]
Heizungsrohre(Verteilung)	0.757	–	–	[lfm/m ² BGF]
Fittings(Heizung)	–	0.100	–	[Stück/m ² BGF]
Roharmaturen(Heizung)	–	0.600 [#]	–	[Stück/m ² BGF]
Heizungsrohre(Fläche)	0.380***	–	–	[lfm/m ² BGF]

* Aufgrund der Dachgrösse sind bei DLG grössere Dachrinnen notwendig, daher gilt dort 2.500 kg/lfm.

** Aufgrund der Dachgrösse werden bei EFH schmalere Fallrohre eingesetzt (1.179 kg/lfm) und bei DLG weitere (2.375 kg/lfm).

*** Quelle: LUTZ (2004)

[#] Aufgrund der Gebäudegrösse sind bei DLG und PRG eine grössere Anzahl kleinerer Roharmaturen notwendig, daher gilt dort 0.200 kg/Stück.

A.1.5 Installationsdichte

Auf den folgenden Seiten sind die Berechnungen der Installationsdichte in den Referenzgebäuden durch Angabe der Produktmengen und der Bezugsflächen dokumentiert (eigene Messergebnisse aus Kap. 3.2.1). Die zur Ermittlung der PKG genutzten Werte werden zudem mit Literaturwerten verglichen.

A.1.5.1 Dachrinnen und Regenfallrohre

Aus der Literatur sind Wertebereiche von Installationsdichten nur für Wohngebäude zu berechnen. Die Werte in Tab. 3-2 stimmen mit den folgenden aus der Literatur überein (GRUHLER *et al.* 2002): $ID_{Rinne,EFH} \in [0.11-0.22]$ lfm/m² DF, $ID_{Fallrohr,EFH} \in [0.05-0.15]$ lfm/m² DF, $ID_{Rinne,MFH} \in [0.06-0.17]$ lfm/m² DF, $ID_{Fallrohr,MFH} \in [0.09-0.38]$ lfm/m² DF. In Görgs Arbeit sind die Rinnen- und Fallrohrängen bereits summiert, sodass ein Vergleich für die Summe der Installationsdichten von Rinnen und Fallrohren möglich ist (GÖRG 1997): Für EFH stimmt der Wert mit $ID_{Rinne} + ID_{Fallrohr} \in [0.22-0.32]$ überein; für MFH erhält Görg niedrigere Werte mit $ID_{Rinne} + ID_{Fallrohr} \in [0.04-0.20]$. Die Basisdaten der eigenen Erhebungen sind in Tab. A-7 aufgeführt.

Tab. A-7: Basisdaten (Messdaten) zur Bestimmung der Installationsdichten von Dachrinnen in Wohngebäuden: Rinnenlänge, Bruttogeschossfläche (BGF), berechnete Installationsdichte (ID). Der Installationsgrad wurde vom ausführenden Spengler eingeschätzt. Quelle: eigene Erhebungen.

Gebäudetyp	Objekt	Rinnenlänge [lfm]	DF [m ²]	ID [lfm/m ² DF]	Bemerkung zum Installationsgrad
EFH	EFH1	31	190	0.16	Renovation
EFH	EFH5	77	333	0.23	Renovation
MFH	MFH1	54	382	0.14	innenliegende Rohre

A.1.5.2 Stromkabel

Die Basisdaten der Erhebungen zu Stromkabeln in Referenzgebäuden sind in Tab. A-8 aufgelistet.

Tab. A-8: Basisdaten (Messdaten) zur Bestimmung der Installationsdichten von Stromkabeln in Wohngebäuden: Stromkabellänge, Bruttogeschossfläche (BGF), berechnete Installationsdichte (ID). Der Installationsgrad wurde vom ausführenden Elektriker eingeschätzt. Quelle: eigene Erhebungen.

Gebäudetyp	Objekt	Kabellänge [lfm]	BGF [m ²]	ID [lfm/m ² BGF]	Bemerkung zum Installationsgrad
EFH	EFH1	548	492	1.1	Standard
EFH	EFH2	854	415	2.1	Standard
EFH	EFH4	3'600	796	4.5	hoch, komfortabel
EFH	EFH5	1'452	558	2.6	gehoben
MFH	MFH1	ca. 5'500	1'339	4.1	gehoben

In Tab. A-9 sind Literaturwerte zur Installationsdichte von Stromkabeln zusammengestellt, wobei der Gebäudekatalog nach GÖRG (1997) eine Hauptquelle ist⁴. Die in GÖRG (1997) zitierten EFH bewegen sich im Durchschnitt mit 1.6 ± 0.9 lfm/m² BGF etwas höher als diejenigen der MFH 1.3 ± 0.5 lfm/m² BGF. Die eigenen Messergebnisse decken sich also mit den aus der Literatur abgeleiteten Installationsdichten.

⁴ Görg hat zur Entwicklung eines Prognosemodells für Bauabfälle einen Gebäudekatalog mit 38 Gebäudetypen erstellt (GÖRG 1997), von diesen stellt er Gebäudesteckbriefe für fünf EFH und acht MFH zur Verfügung. Sechs der acht MFH sind aus einem Gebäudeatlas entnommen (SCHULZE und WALTHER 1990). Die anderen Gebäude sind jeweils zur Hälfte aus anderen Quellen entnommen (HETTENBACH 1992; HALDIMANN 1991; ALBRECHT *et al.* 1984) und direkt aus Architektur- und Ingenieurbüros und Leistungsverzeichnissen erhoben.

Görg führte Gebäudeanalysen durch, die die Materialisierung der MFH beschreiben und hierdurch über die geometrischen Werte des Gebäudeatlas' hinausreichen (BGF, DF, Länge von Dachrinnen und Fallrohren). Die Angaben der Leitungslängen (Stromkabel, Wasserrohre, Heizungsrohre, Gasleitungen) ermöglichen damit eine Bestimmung der entsprechenden *Installationsdichten*. Allerdings ist nicht sicher, auf welche Weise diese Längen bestimmt wurden und zu welchem Zeitpunkt (Ist das Bezugsjahr das Bau-, Renovations- oder Abrissjahr?), vermutlich aber für alle in gleicher Weise. Dasselbe gilt ebenso für die EFH, doch die Gebäudeanalysen der fünf EFH stammen aus vier verschiedenen Literaturquellen, was die Vergleichbarkeit einschränkt; auch hier fehlt bei GÖRG (1997) eine Erläuterung der Erhebungsweise.

Die Leitungslängen der verschiedenen Funktionsbereiche sind nicht für alle Gebäude vorhanden. Mit Abstand am umfassendsten ist der Datensatz der Stromkabel (10 von 13), die anderen Gewerke sind nur in durchschnittlich 40 % der Gebäudeanalysen erfasst. Die mangelnden Erläuterungen lassen auch offen, ob die einzelnen Leitungslängenerhebungen vollständig sind oder möglicherweise bestimmte Teilbereiche ausnehmen (z.B. Steigleitungen). In diesem Sinne sind die Werte als „Mindestwerte“ zu verstehen.

Tab. A-9: Basisdaten aus der Literatur zur Bestimmung der Installationsdichten von Stromkabeln in Wohngebäuden: Kabellängen, Bruttogeschossflächen (BGF) und berechnete Installationsdichten (ID). Der Installationsgrad der aufgeführten Gebäude ist nicht dokumentiert. k.A.: keine Angabe; n.b.: nicht bestimmt. Quelle: diverse Erhebungen nach GÖRG (1997) (angeführt als Primärquelle, mit Ausnahme des letzten Gebäudes.

Gebäude- typ	Objekt (Typvertreter)	Primärquelle	Kabellänge [lfm]	BGF ⁵ [m ²]	ID [lfm/m ² BGF]
EFH	EF I/MB	HETTENBACH (1992)	k.A.	k.A.	n.b.
EFH	EF II/MB	HALDIMANN (1991)	ca. 100	120	ca. 0.8
EFH	EF III/MB	HETTENBACH (1992)	200	k.A.	n.b.
EFH	EF IV/MB	Büro Wörner	588	ca. 230	2.5
EFH	EF V/MB	Dorndorf	313	ca. 230	1.4
MFH	MF I/MB	SCHULZE UND WALTHER (1990)	625	630	0.99
MFH	MF II/MB	SCHULZE UND WALTHER (1990)	760	876	0.87
MFH	MF III/MB	SCHULZE UND WALTHER (1990)	875	881	0.99
MFH	MF IV/MB	SCHULZE UND WALTHER (1990)	1'750	1'722	1.0
MFH	MF IV-V/BL	SCHULZE UND WALTHER (1990)	936	720	1.3
MFH	MFV/MB	LV Massivbau	1'430	ca. 720	2.0
MFH	MF IV-V/SK	ALBRECHT <i>et al.</i> (1984)	ca. 8'100	ca. 4'000	ca. 2.0
MFH	MF IV-V/PL	SCHULZE UND WALTHER (1990)	1'100	971	1.1
MFH	–	HERRMANN (1977)	ca. 4'600	ca. 2'700	ca. 1.7

⁵ Für das Mehrfamilienhaus „MF V/MB“ und die Einfamilienhäuser „EF IV/MB“ und „EF V/MB“ war statt der BGF die Wohnfläche angegeben. In diesen Fällen wurde – in Anlehnung an HENSELER *et al.* (2006) – die BGF durch einen Zuschlag zur Wohnfläche von 50 % (EFH) bzw. 100 % (MFH) ermittelt.

Exkurs: Indirekte Bestimmung über die Rückbau-Methode: Ergebnisse

Der Rückbau eines Dienstleistungsgebäudes wurde zur Bestimmung der eingesetzten Materialmassen genutzt („Rückbau-Methode“)(Abb. A-6).

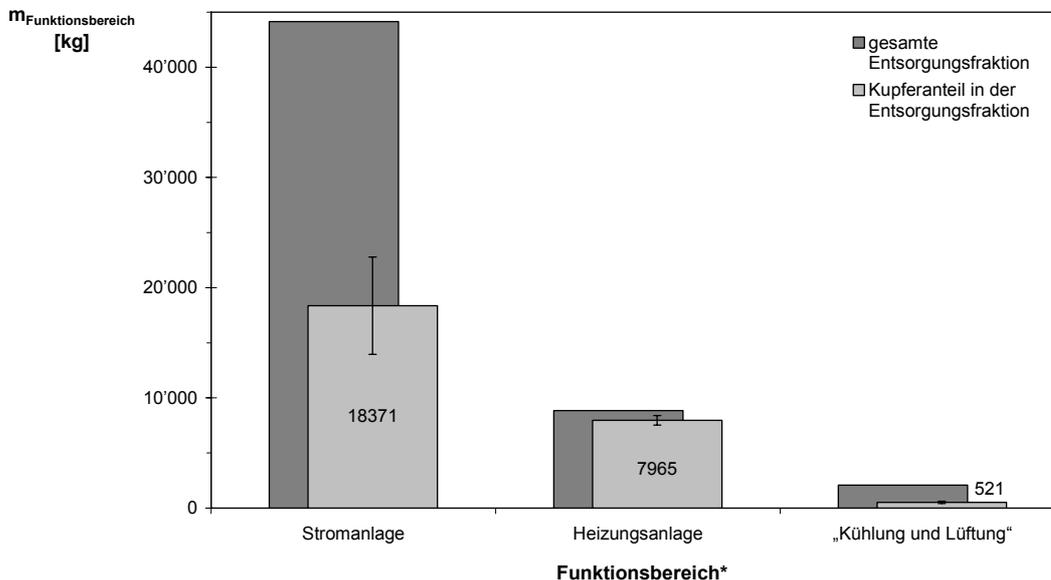


Abb. A-6: Ergebnisse der „Rückbau-Methode“: Massen der Entsorgungsfractionen beim Umbau des „Verwaltungszentrum Werd“, Zürich (DLG, ehemaliges Hauptbürogebäude der UBS AG). Dargestellt sind die gesamten kupferrelevanten Güterflussmassen (dunkelgrau) und der Massenanteil des Kupfers (hellgrau) für die Funktionsbereiche *Stromanlage*, *Heizungsanlage* und für „Kühlung und Lüftung“⁶; dazu sind die Unsicherheiten als Fehlerbalken sowie die Massen des Kupferanteils in Kilogramm angegeben. Quelle: eigene Erhebung der Güterflüsse in Zusammenarbeit mit S. Rubli (vgl. RUBLI (2003)).

A.1.5.3 Telekommunikationskabel

Eigene Erhebungen der Installationsdichte von Telekommunikationskabeln wurden in vier EFH und einem MFH durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Tab. A-10 zusammengefasst.

Tab. A-10: Basisdaten (Messdaten) zur Bestimmung der Installationsdichten von Telekommunikationskabeln in Wohngebäuden: Länge der Telekommunikationskabel, Bruttogeschossfläche (BGF), berechnete Installationsdichte (ID). Der Installationsgrad wurde vom ausführenden Handwerker eingeschätzt. Quelle: eigene Erhebungen.

Gebäude-typ	Objekt	Kabellänge [lfm]	BGF [m ²]	ID [lfm/m ² BGF]	Bemerkung zum Installationsgrad
EFH	EFH1	200	492	0.41	Renovation eines Altbaus. Hoher Installationsgrad (jede Wohneinheit mit Tel und TV)
EFH	EFH2	82	415	0.20	normaler Installationsgrad Sonnerie per U72
EFH	EFH4	845	796	1.1	hoher Installationsgrad
EFH	EFH5	471	558	0.84	normaler Installationsgrad (Standard)
MFH	MFH1	815	1'339	0.61	–

⁶ Unter „Kühlung und Lüftung“ wurden bei der Erhebung vor allem die Elektromotoren der Lüftungsventilatoren berücksichtigt.

A.1.5.4 Wasserrohre

Eigene Erhebungen der Installationsdichte von Wasserrohren wurden im EFH4 durchgeführt: Eine Rohrlänge von 660 lfm auf einer BGF von 796 m² resultiert in einer Installationsdichte von 0.83 lfm/m² BGF.

In Tab. A-11 sind Literaturwerte zur Installationsdichte von Wasserrohren zusammengestellt (nach GÖRG (1997))⁷. Diese Installationsdichten variieren zwischen Einfamilienhäusern (1.08 lfm/m² BGF) und Mehrfamilienhäusern (0.10 ± 0.06 lfm/m² BGF) unerklärlich stark und können lediglich der Orientierung dienen.

Tab. A-11: Basisdaten aus der Literatur zur Bestimmung der Installationsdichten von Wasserrohren in Wohngebäuden: Rohrlänge, Bruttogeschossfläche (BGF) und berechnete Installationsdichte (ID). Quelle: diverse Erhebungen nach GÖRG (1997)(angeführt als Primärquelle).

Gebäude- typ	Objekt (Typvertreter)	Primärquelle	Rohrlänge [lfm]	BGF ⁸ [m ²]	ID [lfm/m ² BGF]
EFH	EF IV/MB	Büro Wörner	334	ca. 230	1.4
MFH	MF I/MB	SCHULZE UND WALTHER (1990)	120	630	0.19
MFH	MF II/MB	SCHULZE UND WALTHER (1990)	134	876	0.15
MFH	MF III/MB	SCHULZE UND WALTHER (1990)	82	881	0.09
MFH	MF IV/MB	SCHULZE UND WALTHER (1990)	90	1'722	0.05
MFH	MF IV-V/BL	SCHULZE UND WALTHER (1990)	57	720	0.08
MFH	MF IV-V/PL	SCHULZE UND WALTHER (1990)	50	971	0.05

EFH4 weist eine ca. vierfach höhere Installationsdichte auf als die MFH nach Görg (vgl. Tab. A-11). Ursache für diese hohe Installationsdichte ist einerseits der sehr komfortable Installationsgrad (Villengebäude), andererseits das Raumprogramm des Gebäudes mit einer Erstreckung der Wohnfläche auf fünf Stockwerke⁹.

Die Wasserrohrlänge des EFH EF IV/MB nach Görg ist fragwürdig hoch: Die BGF von 230 m² deutet nicht auf ein luxuriöses EFH hin; zudem sind die Leitungslängen von Trinkwasser- und Abwasserrohren üblicherweise ähnlich (vgl. GÖRG (1997)), jedoch beim EFH EF IV/MB ist die Länge der Trinkwasserrohre ca. 10mal grösser. Vermutlich handelt es sich um einen Ausreisser bzw. ist die Messungenauigkeit dort gross.

A.1.5.5 Fittings (Sanitär)

Die Installationsdichte von Wasserrohrfittings wurde in zwei EFH bestimmt (Tab. A-12). Bei beiden Gebäuden handelt es sich um Neubauten; der Installationsgrad des EFH4 ist komfortabel, und die Wohnfläche erstreckt sich über mehrere Stockwerke.

⁷ siehe Fussnote ⁴

⁸ siehe Fussnote ⁵

⁹ Das Raumprogramm dieses Doppelfamilienhauses weist eine Besonderheit auf: Da das Gebäude in Hanglage gebaut ist und einen kleinen Grundriss hat, ist die Wohnfläche auf fünf Stockwerken angeordnet. Alle fünf Stockwerke sind in beiden Wohnungen mit Sanitärinstallationen ausgestattet, was zu einer grossen Leitungslänge und hohen Installationsdichte der Wasserleitung führt.

Tab. A-12: Basisdaten (Messdaten eigener Erhebungen) zur Bestimmung der Installationsdichten von Fittings in Sanitäranlagen in Wohngebäuden: Stückzahl der Fittings, Bruttogeschossfläche (BGF), berechnete Installationsdichte (ID), mit Beschreibung des Fittingmaterials bzw. Installationsgrades (wurde vom ausführenden Handwerker eingeschätzt).

Gebäude- typ	Objekt	Fittings [Stück]	BGF [m ²]	ID [Stück/m ² BGF]	Bemerkung zum Installationsgrad
EFH	EFH4	227	796	0.29	Material: Grauguss komfortabel
EFH	EFH5	56	558	0.10	Material: Rotguss

A.1.5.6 Roharmaturen (Sanitär)

Die Installationsdichte von Roharmaturen in Sanitäranlagen wurde in vier EFH bestimmt (Tab. A-13). Es ist möglich, dass die Einfamilienhäuser EFH1, EFH2 und EFH5 nicht vollständig erfasst sind. EFH4 hat einen hohen Installationsgrad.

Tab. A-13: Basisdaten zur Bestimmung der Installationsdichten von Roharmaturen in Sanitäranlagen in Wohngebäuden: Stückzahl der Roharmaturen, Bruttogeschossfläche (BGF), berechnete Installationsdichte (ID), mit Beschreibung des Armaturenmaterials bzw. Installationsgrades (wurde vom ausführenden Handwerker eingeschätzt). Quelle: eigene Erhebungen.

Gebäude- typ	Objekt	Armaturen [Stück]	BGF [m ²]	ID [Stück/m ² BGF]	Bemerkung zum Installationsgrad
EFH	EFH1	7	492	0.01	Material: Rotguss karge Ausführung
EFH	EFH2	4	415	0.01	Material: Rotguss
EFH	EFH4	69	796	0.07	Material: Rotguss ¹⁰ komfortabel
EFH	EFH5	12	558	0.02	Material: Rotguss

A.1.5.7 Heizungsrohre (Verteilung)

Die Installationsdichte von Heizungsrohren zur Verteilung wurde in EFH5 durchgeführt, jedoch beschränkt auf Steigstränge und Kellerverteilung. Eine Rohrlänge von 40 bis 60 lfm auf einer BGF von 558 m² resultiert in einer minimalen Installationsdichte von 0.07 bis 0.11 lfm/m² BGF.

In Tab. A-14 sind Literaturwerte zur Installationsdichte von Heizungsrohren zusammengestellt (nach GÖRG (1997)). Diese übersteigen mit 0.58 lfm/m² BGF für ein Einfamilienhaus und 0.49 bzw. 0.10 lfm/m² BGF für Mehrfamilienhäuser etwas den Wert des EFH5. Aufgrund der Aufnahme der Rohranteile in der Etagenverteilung sind die höheren Werte in der Literatur plausibel.

Tab. A-14: Basisdaten aus der Literatur zur Bestimmung der Installationsdichten von Heizungsrohren(Verteilung) in Wohngebäuden: Rohrlänge, Bruttogeschossfläche (BGF) und berechnete Installationsdichte (ID). Quelle: diverse Erhebungen nach GÖRG (1997) (angeführt als Primärquelle).

Gebäude- typ	Objekt (Typvertreter)	Primärquelle	Rohrlänge [lfm]	BGF ¹¹ [m ²]	ID [lfm/m ² BGF]
EFH	EF IV/MB	Büro Wörner	180	ca. 310	0.58
MFH	MF V/MB	LV Massivbau	350	ca. 720	0.49
MFH	MF IV-V/PL	SCHULZE UND WALTHER (1990)	98	971	0.10

¹⁰ Das eingesetzte System war das Optipress/Optiflex-System der Fa. R. Nussbaum AG, Olten (siehe Tab. A-21).

¹¹ siehe Fussnote ⁵

Die Installationsdichten der drei Wohngebäude aus der Literatur liegen in einem Intervall von 0.1 bis 0.6 lfm/m² BGF. Der Vergleich zeigt, dass das EFH mit fast 0.6 lfm/m² BGF den Mittelwert der beiden MFH um ca. das zweifache übersteigt – trotz früherem Baujahr. Dies deutet an, dass:

- a) die Installationsdichte in EFH höher als in MFH ist (dies kann auf geometrische „Synergieeffekte“ bei grösseren Gebäuden zurückzuführen sein) und/oder
- b) die Installationsdichte von Heizungsrohren weniger homogen verteilt als die von Stromkabeln ist (zumindest bei Wohngebäuden)(vgl. Kap. A.1.5.2)

A.1.5.8 Fittings (Heizung)

Die Installationsdichte der Fittings für Heizungsrohre wurde im EFH3 (Neubau) bestimmt: Eine Anzahl Fittings von 20 Stück bezogen auf eine BGF von 366 m² resultiert in einer Installationsdichte von 0.05 Stück/m² BGF.

A.1.5.9 Roharmaturen (Heizung)

Die Installationsdichte von Roharmaturen in Heizungsanlagen wurde mit eigenen Erhebungen bestimmt (Tab. A-15). Die Erhebungen des EFH3 und insbesondere DLG1 sind detailliert und stückgenau; das Roharmatureninventar von EFH3 ist in Tab. A-5 aufgelistet. Die Erhebung an EFH5 könnte unvollständig sein und ist daher eine untere Grenze.

Tab. A-15: Basisdaten zur Bestimmung der Installationsdichten von Roharmaturen in Heizungsanlagen: Stückzahl der Roharmaturen, Bruttogeschossfläche (BGF), berechnete Installationsdichte (ID), mit Beschreibung des Armaturenmaterials. Quelle: eigene Erhebungen.

Gebäude- typ	Objekt	Armaturen [Stück]	BGF [m ²]	ID [Stück/m ² BGF]	Bemerkung
EFH	EFH3	24	366	0.07	Material: Messing
EFH	EFH5	10	558	0.02	Material: Messing
DLG	DLG1	1'330	11'430	0.12	Material: Messing, Ametal

A.1.5.10 Gasleitungen

Die ID von Gasleitungen in Wohngebäuden, die zur Versorgung der Gasboiler und Heizungen dienen, konnte auf der Basis der Arbeit von Görg bestimmt werden (GÖRG 1997)(Tab. A-16). Zur Versorgung von Gasboilern benötigt man Installationsdichten von 0.03 bis 0.06 lfm/m² BGF (fünf MFH)¹².

Tab. A-16: Basisdaten aus der Literatur zur Bestimmung der Installationsdichten von Gasrohren (Gasleitungen) in Wohngebäuden: Rohrlängen, Bruttogeschossflächen (BGF) und berechnete Installationsdichten (ID). Quelle: diverse Erhebungen nach GÖRG (1997) (angeführt als Primärquelle).

Gebäude- typ	Objekt (Typvertreter)	Primärquelle	Gasrohr- länge [lfm]	BGF ¹³ [m ²]	ID [lfm/m ² BGF]
MFH	MF I/MB	SCHULZE UND WALTHER (1990)	31	630	0.05
MFH	MF II/MB	SCHULZE UND WALTHER (1990)	33	876	0.04
MFH	MF IV/MB	SCHULZE UND WALTHER (1990)	51	1'722	0.03
MFH	MF IV-V/BL	SCHULZE UND WALTHER (1990)	42	720	0.06
MFH	MF IV-V/PL	SCHULZE UND WALTHER (1990)	32	971	0.03

¹² Das Gasleitungsnetz zur Versorgung von Heizungen ohne Gasboiler ist wesentlich kleiner; entsprechend sind bedeutend kleinere Installationsdichten zu erwarten (< 0.01 lfm/m² BGF).

¹³ siehe Fussnote ⁵

A.1.5.11 Überlegungen zum Einfluss äusserer Parameter

Exkurs I: Einfluss der Gebäudegeometrie auf die Installationsdichte im Dachbereich

- a) Die Installationsdichte der Dachrinnen ist gegeben durch den Quotient von Länge der Dachrinnen zur Dachfläche ($DF = A \cdot B$) und hängt damit von der Dachform ab (Tab. A-17).

Tab. A-17: Länge der Dachrinnen bei einfachem rechteckigem Grundriss mit FL = Firstlinie, A = lange Gebäudeseite, B = kurze Gebäudeseite. Angaben für die 2 Ausführungsweisen FL \parallel A und FL \parallel B.

Dachform	FL \parallel A	FL \parallel B
Flachdach	A	B
Pultdach	2·A	2·B
Walmdach/Mansarddach/Zeltdach	2·(A+B)	
Satteldach mit Krüppelwalm	2·A + [0..1]·2B	2·B + [0..1]·2A
Sheddach	(2+x)·A	(2+x)·B

- b) Die Installationsdichte der Fallrohre ist direkt proportional zur Dachhöhe und zur Anzahl der Fallrohre, welche ihrerseits abhängig ist von der Dachfläche ($DF = A \cdot B$), der Dachform (s.o.) und der Länge der Gebäudeseiten (A, B).

Exkurs II: Einfluss von Material- und Lohnkosten auf die Installationsdichte in der Haustechnik

Im Gegensatz zum Aussenbereich, bei dem die Installationsdichten durch die Gebäudegeometrie und die Eigenschaften der gewählten Materialien bestimmt sind, spielt in der Haustechnik der individuelle Anspruch an das Gebäude eine entscheidende Rolle. Da erhöhte Installationsgrade i.d.R. auch erhöhte Kosten bedeutet, resultiert die Entscheidung für einen bestimmten Installationsgrad beim Bau bzw. der Renovation eines Gebäudes aus einem individuellen Abwägen zwischen Bedarf und Kosten. Dementsprechend stark variiert die Installationsdichte (z.B. der Starkstrominstallation).

Zuweilen kann diese individuelle Wertschätzung nicht nur auf einen individuell hohen Lebensstil, sondern auch auf andere regionale Faktoren zurückgeführt werden (Demographie, Kundenpotential, Spar- und Investitionsverhalten der Region). Der zusätzliche Aufwand kann nämlich auch eine Investition in die künftige Marktfähigkeit einer Immobilie sein¹⁴.

These: Eine weitere Einflussgrösse auf den Ausbaustandard ist das regionale Lohnkostenniveau, da dadurch das Verhältnis von Material- zu Lohnkosten beeinflusst wird. Die Kosten für die international gehandelten Kupferwaren (Bleche, Rohre, Kabel etc.) sind auf dem umgebenden europäischen Markt einander weit ähnlicher als die Lohnkosten, deren regionale, meist national abgeschottete Märkte grosse Unterschiede aufweisen. Z.B. sind in der Schweiz auch die VDE-geprüften Installationskabel erlaubt, ist also ein Import aus Deutschland möglich, doch der Marktpreis für Dienstleistungen der Elektriker ist in der Schweiz tendenziell höher als im Umland. Da der Anteil der Materialkosten (vorgefertigter) Starkstromkabel an den gesamten Installationskosten relativ gering ist, spielt der zeitliche Aufwand des Installateurs eine Schlüsselrolle.

¹⁴ Ein aktuelles Beispiel dafür ist der vermehrte Einbau von Personenaufzügen in Mehrfamiliengebäude von ≥ 3 Stockwerken im Grossraum Zürich, obwohl ein Einbau nicht aufgrund der Feuerschutzrichtlinie vorgeschrieben ist. Allein die Perspektive, dass es gerade die Menschen in der zweiten Lebenshälfte sind, die bevorzugt als potentielle Wohnungskäufer auftreten, macht den Einbau eines Personenaufzugs zu einer wertsteigernden Investition, insbesondere hinsichtlich des Wiederverkaufswertes in künftigen Dekaden. Quelle: STUCKI (2002).

A.1.6 Häufigkeiten

A.1.6.1 Häufigkeit der Produktgruppe

Die Häufigkeit des Vorkommens der Produktgruppen, also in welchem Anteil der Gebäude die Produktgruppe realisiert ist, wird näherungsweise durch das Verteilmuster in Tab. A-18 bestimmt.

Tab. A-18: Übersicht über die relative *Häufigkeit der Produktgruppe* (Realisierung) (f_{PG}) angegeben für die 14 untersuchten Produktgruppen in den 4 Nutzungstypen Einfamilienhaus (EFH), Mehrfamilienhaus (MFH), Dienstleistungsgebäude (DLG) und Produktionsgebäude (PRG).

Produktgruppe PG	f_{PG} [%] in EFH	f_{PG} [%] in MFH	f_{PG} [%] in DLG	f_{PG} [%] in PRG
Bedachung/Abdeckung	100	100	100	100
Dachrinnen	100	100	100	100
Regenfallrohre	80	50	50	50
Dachgaupen	35	40	20	0
Blitzableiter	30	20	50	80
Stromkabel	100	100	100	100
Telekommunikationskabel	100	100	100	65
Wasserrohre	100	100	100	95
Fittings(Sanitär)				
Roharmaturen(Sanitär)				
Heizungsrohre(Verteilung)	100	100	100	10
Fittings(Heizung)				
Roharmaturen(Heizung)				
Heizungsrohre(Fläche)	60	30	10	2

A.1.6.2 Häufigkeit des Stoffes

Dachbereich

Im Dach sind die Möglichkeiten des Zusammenbaus unterschiedlicher Metalle wegen der elektrochemischen Spannungsreihe eingeschränkt. Kupfer selbst ist aufgrund seiner positiven Stellung nicht gefährdet, doch kann es andere unedlere Metalle gefährden. So sind beim Zusammenbau feuerverzinkter Stahl und Titanzink sowie Aluminium unterhalb des Kupfers oder im Kontakt dazu zu unterlassen (Tab. A-19). Durch Beschichtung oder Anodisierung können jedoch auch diese Metalle vor der Bildung eines elektrochemischen Elements geschützt werden (RÖBBERT 1994).

Tab. A-19: Möglicher Zusammenbau von Metallen am Bau. Blechmaterialien: Al: Aluminium; Pb: Blei; Cu: Kupfer; Zn: Zink; nrSt: nichtrostender Stahl; fvSt: feuerverzinkter Stahl. Quelle: SCHMITT und HEENE (1996).

	Al	Pb	Cu	Zn	nrSt	fvSt
Al	+	+	-	+	+	+
Pb	+	+	+	+	+	+
Cu	-	+	+	-	+	-
Zn	+	+	-	+	+	+
nrSt	+	+	+	+	+	+
fvSt	+	+	-	+	+	+

Die *Häufigkeit des Stoffes (fM)* ist bisher nicht ausreichend bestimmt worden. Aufgrund der optischen Unterscheidbarkeit der verschiedenen Materialien ist für den *Dachbereich* eine Erhebung durch eine Siedlungsbegehung möglich. Hilfreich ist bei der Bestimmung der Umstand, dass ein Zusammenbau verschiedener Materialien aus korrosionschemischen und ästhetischen Gründen häufig vermieden wird (Kap. 2.3.3).

Die Machbarkeit eines solchen Vorgehens wurde durch eine Gemeindebegehung in Bettingen BS untersucht, bei der pro Objekt die Ausführung der Spenglerarbeiten aufgenommen wurde (Tab. A-20). Da sich die Tabellenstruktur bei der Erhebung bewährt hat, kann sie als Vorlage für künftige Gemeindebegehungen dienen. Aus praktischen Gründen bietet sich eine gleichzeitige Untersuchung der *Häufigkeit der Produktgruppe* an.

Sanitäranlage

Für die Sanitäranlagen ist die Häufigkeit der Ausführung in Kupfer (fM) durch die Sanitärssysteme bestimmt, die in der Schweiz vertrieben werden. Eine Übersicht der Systeme, die aufzeigt, woraus die Rohre, Fittings und Armaturen bestehen, liefert Tab. A-21.

Tab. A-21: Sanitärssysteme in der Schweiz: Hersteller, Systembezeichnung und Materialisierung der Rohre, Fittings und Armaturen (Rohrarmaturen). Die Systeme sind getrennt nach formstabilen Keller- und Steigleitungen (oben) und flexible Stockwerkverteilungen (unten). Zusätzlich ist ein Leitungssystem für Gas aufgeführt. k.A.: keine Angabe. Quelle: nach GYSIN (2002) und eigene Erhebungen.

	Hersteller	System	Rohre	Fittings	Armaturen	Bemerkungen
Keller- und Steigleitungen	GF - Georg Fischer	Instaflex	Kunststoff Polybuten	Kunststoff Polybuten <i>verschweisst</i>	k.A.	
		Temperguss- fittings	Eisen, verzinkt	Temperguss, verzinkt	k.A.	Bedeutung abnehmend
	Gunzenhauser	Sanipex	Kunststoff PE-X, <i>mit Al</i>	Rotguss	k.A.	
		Sanipex MT	Kunststoff PE-X, mit Al	Kunststoff PE-X	k.A.	
	Geberit	Mapress Edelstahl	Edelstahl (Inox)	Edelstahl	Edelstahl	Bedeutung zunehmend
		Mapress Kupfer	Kupfer	Kupfer auch Rotguss	k.A.	
		Mapress C-Stahl	C-Stahl	C-Stahl	k.A.	
		Mapress Edelflex	Edelstahl (Inox) mit PE-Mantel	Cr-Ni-Mo-Stahl	k.A.	neu auf dem Markt
	Nussbaum	Optipress	Edelstahl	Edelstahl Spezial-Rotguss	Edelstahl	
		Cupress	Kupfer	Kupfer <i>auch Rotguss</i>	Rotguss	auch in Solaranlagen
Stockwerkverteilung	Geberit	Mepla	Kunststoffe PE-Xb und PE-HD, mit Al	Kunststoff PVDF auch Rotguss <i>Messing</i>	k.A.	
	GF - Georg Fischer	Flexalino	Kunststoff Polybuten	<i>Edelstahl und Messing verschweisst</i>	k.A.	
	Gunzenhauser	Sanipex	Kunststoff PE-X, mit Al	Rotguss	k.A.	
		Sanipex MT	Kunststoff PE-X, mit Al	Kunststoff PE-X	k.A.	
	Nussbaum	Optiflex plus	Kunststoff PE-Xc (VPE-c-Rohr), mit Al	Rotguss	Rotgussgehäuse und Messing-Teile	existiert auch formstabil
Gas	Nussbaum	Cupress-G	Kupfer	Kupfer auch Rotguss	Messing	

Heizungsanlage

Die Material-Einsatzprofile der *Referenzgebäude* sind Ausgangspunkt für die Bestimmung der bevorzugten Materialien (fM). Für den Funktionsbereich *Heizungsanlage* wird die Materialwahl in Tab. A-22 aufgelistet.

Tab. A-22: Synoptische Material-Einsatzprofile (fM_{PG}) der Referenzgebäude im Funktionsbereich *Heizungsanlage*. Gg: Grauguss; St: Stahl; Cu: Kupfer; Ms: Messing; Rg: Rotguss; Al-V.: Aluminium-Verbundrohre; V: Verbundstoffe; „–“: nicht realisiert; k.A.: keine Angabe.

Referenzgebäude	EFH1	EFH3	EFH4	EFH5	MFH1	DLG1	DLG3
Heizungsrohre(Verteilung)	St	k.A.	St	Cu	St	k.A.	St
Fittings(Heizung)	St	Gg	k.A.	Cu	St	k.A.	St
Roharmaturen(Heizung)	Rg,Ms	Ms	k.A.	Ms	Cu	Ms	–
Heizungsrohre(Fläche)	k.A.	k.A.	Al-V.	V	–	V	–

Die Häufigkeit der Ausführung in Kupfer (fM), also in welchem Anteil der Gebäude die Produktgruppe durch eine Kupferausführung realisiert ist, wird näherungsweise durch das folgende Verteilmuster bestimmt (Tab. A-23):

Tab. A-23: Übersicht über die *Häufigkeit des Stoffs* (Materialisierung in Kupfer)(fM_{PG}) angegeben für die 14 untersuchten Produktgruppen in den 4 Nutzungstypen Einfamilienhaus (EFH), Mehrfamilienhaus (MFH), Dienstleistungsgebäude (DLG) und Produktionsgebäude (PRG). –*: Für die Roharmaturen ergibt sich durch den Einsatz von Legierungen eine verminderte Häufigkeit des Stoffs (Cu): Rotguss in Sanitäranlagen (Kupferanteil 91 %) bzw. Messing in Heizungsanlagen (Kupferanteil 65 %).

Produktgruppe PG	fM _{Cu} [%] in EFH	fM _{Cu} [%] in MFH	fM _{Cu} [%] in DLG	fM _{Cu} [%] in PRG
Bedachung/Abdeckung	1	1	2	0
Dachrinnen	70	70	70	50
Regenfallrohre	70	70	70	50
Dachgaupen	80	80	80	60
Blitzableiter	100	100	100	100
Stromkabel	100	100	100	100
Telekommunikationskabel	95	95	85	85
Wasserrohre	10	10	10	10
Fittings(Sanitär)				
Roharmaturen(Sanitär)	91*	91*	91*	91*
Heizungsrohre(Verteilung)	10	5	5	5
Fittings(Heizung)				
Roharmaturen(Heizung)	65*	65*	65*	65*
Heizungsrohre(Fläche)	40	40	40	40

A.1.7 Historische Entwicklung des Hauptlagers *Gebäude*

Die historische Entwicklung der Kupfergehalte ist in Tab. A-24 zusammengefasst.

Tab. A-24: Historischer Verlauf der Kupfergehalte der Funktionsbereiche bzw. Produktgruppen (FB/PG) im schweizerischen Gebäudebestand, dargestellt für die vier Nutzungstypen Einfamilienhaus (EFH), Mehrfamilienhaus (MFH), Dienstleistungsgebäude (DLG) und Produktionsgebäude (PRG). Daneben ist die Einheit des Kupfergehalts für die verschiedenen Funktionsbereiche bzw. Produktgruppen angegeben. Die Kupfergehalte basieren auf eingeschätzten bzw. extrapolierten spezifischen Massen, Installationsdichten und Häufigkeiten.

EFH	FB/PG	Stand 1900	1925	1950	1975	2000
[kg/qm BGF]	Stromanlage	0.002	0.024	0.044	0.103	0.137
[kg/qm BGF]	Telekommunikationsanlage	0.000	0.000	0.002	0.007	0.010
[kg/qm BGF]	Heizungsanlage	0.000	0.000	0.014	0.086	0.380
[kg/qm BGF]	Sanitärianlage	0.015	0.011	0.025	0.117	0.071
[kg/qm DF]	Bedachung/Abdeckung	0.000	0.065	0.065	0.065	0.065
[kg/qm DF]	Dachentwässerung	0.216	0.236	0.236	0.273	0.306
[kg/qm DF]	Dachgaupen	0.000	0.021	0.042	0.122	0.195
[kg/qm DF]	Blitzableiter	0.007	0.007	0.013	0.027	0.040
MFH	FB/PG	Stand 1900	1925	1950	1975	2000
[kg/qm BGF]	Stromanlage	0.002	0.023	0.041	0.086	0.114
[kg/qm BGF]	Telekommunikationsanlage	0.000	0.000	0.001	0.004	0.005
[kg/qm BGF]	Heizungsanlage	0.000	0.000	0.014	0.053	0.191
[kg/qm BGF]	Sanitärianlage	0.017	0.012	0.013	0.103	0.057
[kg/qm DF]	Bedachung/Abdeckung	0.000	0.065	0.065	0.065	0.065
[kg/qm DF]	Dachentwässerung	0.201	0.299	0.290	0.323	0.328
[kg/qm DF]	Dachgaupen	0.153	0.167	0.167	0.195	0.223
[kg/qm DF]	Blitzableiter	0.007	0.007	0.013	0.020	0.027
DLG	FB/PG	Stand 1900	1925	1950	1975	2000
[kg/qm BGF]	Stromanlage	0.007	0.068	0.123	0.257	0.342
[kg/qm BGF]	Telekommunikationsanlage	0.001	0.001	0.005	0.012	0.013
[kg/qm BGF]	Heizungsanlage	0.000	0.000	0.014	0.052	0.115
[kg/qm BGF]	Sanitärianlage	0.017	0.012	0.013	0.058	0.042
[kg/qm DF]	Bedachung/Abdeckung	0.000	0.065	0.065	0.065	0.131
[kg/qm DF]	Dachentwässerung	0.201	0.353	0.345	0.401	0.409
[kg/qm DF]	Dachgaupen	0.077	0.084	0.084	0.098	0.111
[kg/qm DF]	Blitzableiter	0.007	0.007	0.013	0.027	0.067
PRG	FB/PG	Stand 1900	1925	1950	1975	2000
[kg/qm BGF]	Stromanlage	0.005	0.026	0.051	0.115	0.171
[kg/qm BGF]	Telekommunikationsanlage	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
[kg/qm BGF]	Heizungsanlage	0.000	0.000	0.000	0.001	0.008
[kg/qm BGF]	Sanitärianlage	0.014	0.010	0.012	0.020	0.029
[kg/qm DF]	Bedachung/Abdeckung	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
[kg/qm DF]	Dachentwässerung	0.121	0.242	0.224	0.250	0.292
[kg/qm DF]	Dachgaupen	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
[kg/qm DF]	Blitzableiter	0.013	0.013	0.040	0.093	0.107

Berechnungsvorschrift

Die stufenweise Lagerentwicklung wird mathematisch beschrieben durch Zuhilfenahme einer Hilfsvariablen i auf Ordinalniveau, die die Abfolge der diskreten Stichjahre abbildet (Tab. A-25). Mithilfe der Hilfsvariablen werden dann die Lager M_i aus den Bezugsflächen (BGF, DF) und den Kupfergehalten (KG)(vgl. Tab. A-24) für die Quartale berechnet (Tab. A-26).

Tab. A-25: Zuordnungstabelle von Stichjahr zur Hilfsvariablen $i \in \mathbb{N}$ zur Berechnung.

Stichjahr	1900	1925	1950	1975	2000
Hilfsvariable i	1	2	3	4	5

Tab. A-26: Berechnungsvorschrift für die Entwicklung der Teillager M_i . Die Entwicklungen der Bezugsflächen (BGF bzw. DF) sowie der Kupferhalte (KG) infolge Renovationstätigkeiten werden „rekursiv“ für die Stichjahre unter Zuhilfenahme der Hilfsvariablen i berücksichtigt.

Teillager	$i = 1$: 1900 ¹⁵	$i > 1$: 1925, 1950, 1975, 2000
Dachbereich	$M_i = DF_i \cdot KG_i$	
Strom- und Telekommunikationsanlage	$M_i = BGF_i \cdot KG_i$	$M_i = (BGF_i - BGF_{i-1}) \cdot KG_i + BGF_{i-1} \cdot KG_{i-1}$
Sanitär- und Heizungsanlage	$M_i = BGF_i \cdot KG_i$	$M_i = (BGF_i \cdot KG_i) + \sum_{j=1}^{i-1} \left(\left(BGF_{j+1} - \sum_{k=1}^j BGF_k \right) \cdot KG_{j+1} \right)$

¹⁵ Da die Dynamik der Lagerentwicklung zu Beginn des Jahrhunderts noch gering war, wurden die Kupferhalte (KG) für das Stichjahr 1900 vereinfacht abgeschätzt, zuweilen in fixer Relation des Kupfergehalts von 1925. Z.B. wurde für Telekommunikationskabel und Blitzableiter jeweils der gleiche KG angenommen wie 1925, für die Stromkabel ein Zehntel, für die Heizungsinstallation und die Bedachung/Abdeckung 0 usw.

A.1.8 Einfluss langanhaltender Renovationszyklen auf das Hauptlager Gebäude

Lagersättigung „Stand 2000“

Durch Multiplikation des aktuellen Kupfergehalts (Tab. 3-14) mit den entsprechenden Bezugsflächen der Nutzungstypen (Tab. 2-8) erhält man eine Gesamtmenge des Kupferlagers von ca. 660'000 t in den Gebäuden, was einem Pro-Kopf-Lager von 91 kg entspricht. Diese Menge, die eine Renovierung aller Altbauten im IV. Quartal impliziert, verteilt sich in den 4 Teilbeständen auf die Funktionsbereiche wie in Abb. A-7 dargestellt.

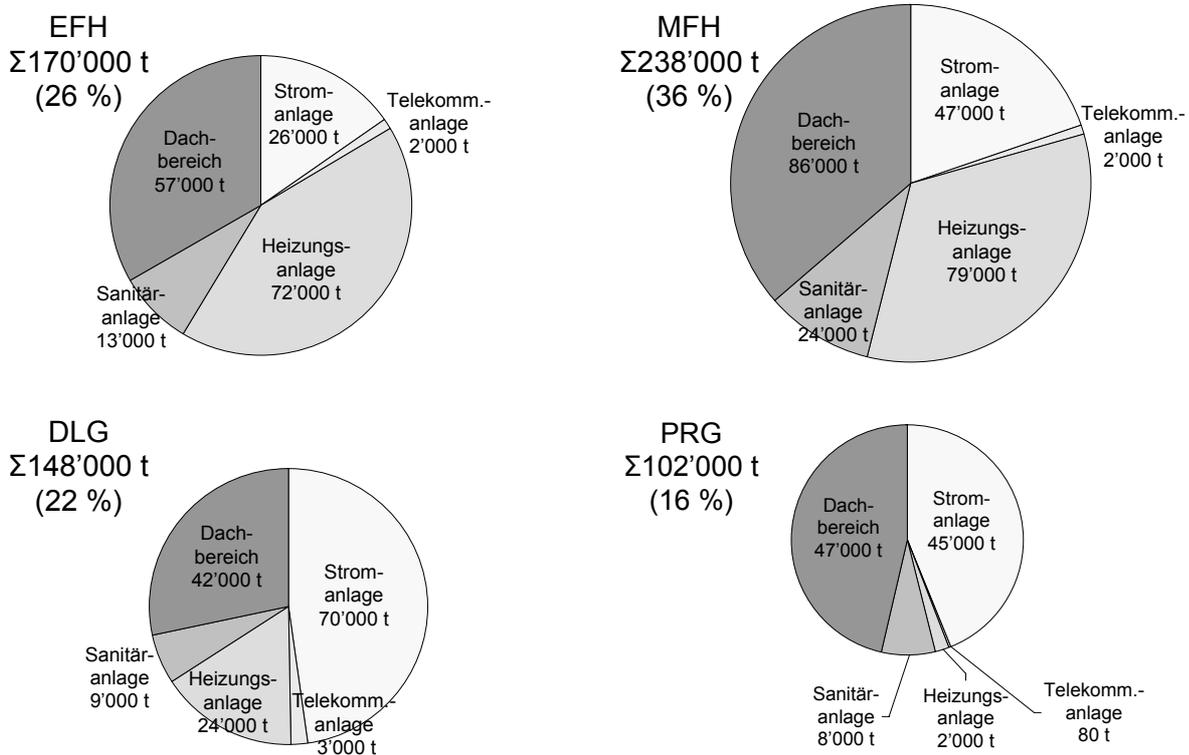


Abb. A-7: Verteilung des Kupferlagers in den 4 Teilbeständen *Einfamilienhaus* (EFH), *Mehrfamilienhaus* (MFH), *Dienstleistungsgebäude* (DLG) und *Produktionsgebäude* (PRG) auf die Funktionsbereiche. Mengenangaben der Funktionsbereiche in Tonnen, daneben die Summe aller Funktionsbereiche pro Teilbestand (Σ); die Prozentangaben beschreiben den Anteil des Kupferlagers im Teilbestand bezogen auf den Gesamtbestand der Gebäude ($\Sigma = 100\%$).

Nach Zusammenfassung der Einzelergebnisse aus diesen Teilbeständen ist ersichtlich, dass der Dachbereich, die Stromanlage und die Heizungsanlage zusammen mehr als 90 % des Gesamtlagers ausmachen, wobei der Dachbereich mit seinen Blechen (40 %) der kupferreichste Funktionsbereich ist (Abb. A-8). Die anderen beiden Funktionsbereiche tragen jeweils zu ca. ¼ zum Gesamtlager bei. Die verbleibenden ca. 10 % werden massgeblich durch die Sanitäranlagen (7 %) aufgebaut, wohingegen die Telekommunikationsanlagen mit < 1 % vernachlässigbar bleiben. Das Kupferlager in den Gebäuden befindet sich demnach zu ca. 40 % im Dach (Aussenbereich) und zu 60 % in der Haustechnik.

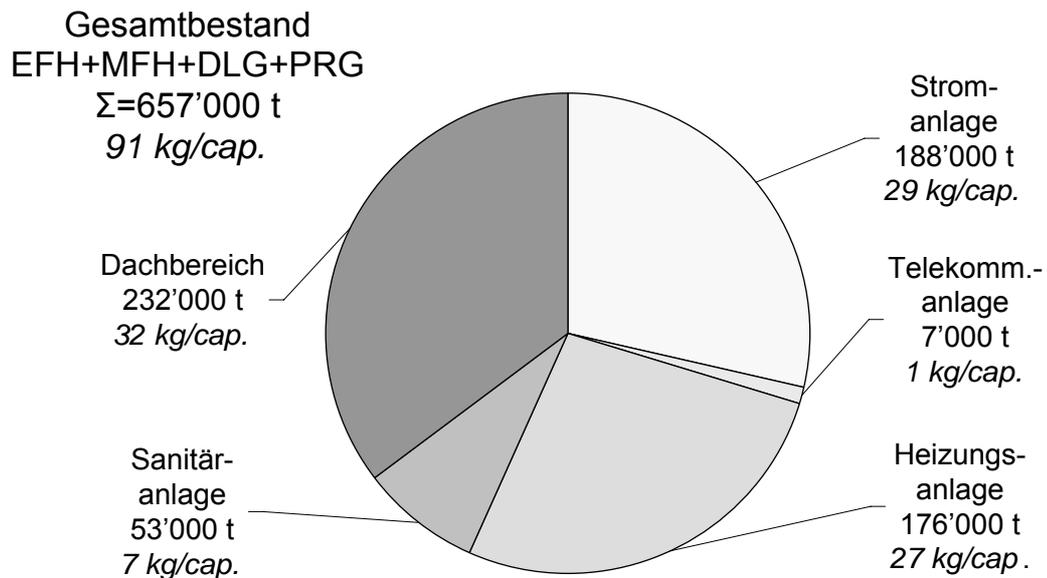


Abb. A-8: Verteilung des Kupferlagers im Gebäudebestand der Schweiz auf die Funktionsbereiche. Mengenangaben in Tonnen (gerundet auf 1'000 t) und pro Kopf [kg/capita](kursiv).

N.B.: Die Berechnung dieser fiktiven Kupferlager beruht – im Gegensatz zu Abb. 3-8 – implizit auf der Annahme, dass der gesamte Gebäudebestand mit dem Installationsgrad des Jahres 2000 ausgerüstet ist bzw. heutige Kupfergehalte hat. Sie dient hier der Verdeutlichung, welche Bedeutung die Berücksichtigung der Renovationszyklen hat. Da die Kupfergehalte der unrenovierten Altbauten dadurch überschätzt werden, handelt es sich um eine „Obergrenze“ des Lagers (vgl. Kap. 2.8.1.2). Die Nachrüstungsverzögerung aufgrund längerer Renovationszyklen in der Haustechnik wird durch die historische Betrachtung gewährt (siehe Kap. 3.5.1).

A.2 Infrastruktur

Die Infrastrukturanlagen einer Region sind gemäss den transportierten Versorgungsgütern in Versorgungsbereiche zu gruppieren (Tab. A-27).

Tab. A-27: Übersicht über die Versorgungsbereiche und Versorgungsgüter der Infrastruktur mit Angabe der Infrastrukturaufwendungen für Produktion, Übertragung und Verteilung sowie Entsorgung der Versorgungsgüter.

Versorgungsbereich	Versorgungsgut	Produktion	Übertragung und Verteilung	Entsorgung
Elektrizität	Strom	Kraftwerk	Stromleitung	–
Gas	Heizgas	Gasgewinnung	Gasleitung	–
Verkehr	Menschen, Waren (Fahrzeuge)	–	Strasse, Schiene	–
Wasser	Wasser	Wasserwerk	Trinkwasserleitung	siehe Abwasser
Abwasser	Wasser	–	Abwasserleitung (Kanalisation)	Kläranlage
Abfallbeseitigung	Materie	–	Abfuhr	Entsorgungsbetrieb, Deponie
Telefonie	Information	Telefonzentrale	Telefonleitung	–
TV-Kabelnetz	Information	Sendezentrale	TV-Kabelleitung	–

A.2.1 Stromnetz

Leitungslängen

Die in der Literatur belegten Erhebungen der Starkstrom-Leitungslängen sind in Tab. A-28 gegeben.

Tab. A-28: Leitungslängen nach Leitungsstatistik der Schweiz, mit Unterteilung nach Spannungsebene und Verlegeform. Quelle: EGGENBERGER (1990)/MUTZNER (1995); MAIBACH *et al.* (1995)/KNOEPFEL (1995).

Spannungsebene	Spannung [kV]	nach EGGENBERGER (1990)		nach MAIBACH <i>et al.</i> (1995)	
		Freileitungen [km]	Kabel [km]	Freileitungen [km]	Kabel [km]
Höchstspannung	400	1'100	0	1'091	0
	220	4'670	31	4'837	33
Hochspannung	150	4'800	600	2'762	317
	50			4'550	600
Mittelspannung	20	19'000	24'600	24'192	17'660
	10			2'521	4'580
Niederspannung	0.4	3'000	87'000	70'000	207'000

Strangquerschnitt

Der *Hauptquerschnitt* beschreibt den technischen Aufbau des Kabels:

- die *Anzahl* der Leiteradern
- ihren *Aderquerschnitt*
- ob eine Schutzader vorhanden ist (Zahl nach dem Schrägstrich gibt Querschnitt an)

Beispielsweise bedeutet die Hauptquerschnitts-Bezeichnung „3x150/95“, dass das Kabel aus 3 Linienleitern à 150 mm² plus einem PEN-Leiter à 95 mm² besteht. Aus dem Leiterquerschnitt und der Beschreibung des Hauptquerschnittes lässt sich die Querschnittsfläche pro Kabel ermitteln. Durch Multiplikation mit der Anzahl Kabel pro System erhält man – über die Kupferdichte – die spezifische Masse der Kabelsysteme. In der Schweiz sind pro Spannungsebene ca. 10 bis 15 Kabeltypen normalisiert (NS: 17; MS: 8; HS: 14)(Tab. A-29).

Tab. A-29: Übersicht über die normalisierten Kabeltypen („Normkabel“) von Starkstromnetzen mit technischer Beschreibung des Kabelaufbaus, geordnet nach Spannungsebene (NS: Nieder-, MS: Mittel- und HS: Hochspannung)¹⁶. Leiterquerschnitt (A_L), Hauptquerschnitt, Querschnittsfläche pro Kabel (A_K)¹⁷, Anzahl der Kabel pro System (N_S) und berechnete *spezifische Masse* pro System (sM). Quelle: BRUGG KABEL (1996)(so genannte „Kabelbibel“).

Spannungs- ebene	A_L [mm ²]	Haupt- querschnitt	A_K [mm ²]	N_S [Stück]	sM [t/km]
NS	6	3x6/6	24	1	0.21
NS	10	3x10/10	40	1	0.36
NS	16	3x16/16	64	1	0.57
NS	25	3x25/25	100	1	0.89
NS	50	3x50/50	200	1	1.79
NS	95	3x95/95	380	1	3.40
NS	150	3x150/95	545	1	4.87
NS	150	3x150/150	600	1	5.36
NS	16	4x16	64	1	0.57
NS	25	4x25	100	1	0.89
NS	50	4x50	200	1	1.79
NS	95	4x95	380	1	3.40
NS	150	4x150	600	1	5.36
NS	95	1x95	95	3	2.55
NS	150	1x150	150	3	4.02
NS	240	1x240	240	3	6.44
NS	150	3x150+95	545	1	4.87
MS	50	50/16	66	3	1.77
MS	95	95/25	120	3	3.22
MS	150	150/35	185	3	4.96
MS	240	240/35	275	3	7.38
MS	50	50	50	3	1.34
MS	95	95	95	3	2.55
MS	150	150	150	3	4.02
MS	240	240	240	3	6.44
HS	120	120	120	3	3.22
HS	150	150	150	3	4.02
HS	185	185	185	3	4.96
HS	240	240	240	3	6.44
HS	300	300	300	3	8.05
HS	400	400	400	3	10.73
HS	500	500	500	3	13.41
HS	630	630	630	3	16.90
HS	95	95	95	3	2.55
HS	800	800	800	3	21.46
HS	1'000	1'000	1'000	3	26.82
HS	1'200	1'200	1'200	3	32.18
HS	1'600	1'600	1'600	3	42.91
HS	2'000	2'000	2'000	3	53.64

¹⁶ Die Höchstspannungskabel werden nur selten ausgeführt und daher existieren keine Hauptquerschnitte. Sie werden individuell auf Bestellung angefertigt.

¹⁷ Zur Veranschaulichung: Die Querschnittsfläche pro Kabel [mm²] stimmt numerisch überein mit der Anzahl Liter im Volumen eines Kilometers Leiterkörper (1 mm² entspricht 1 l/km Kabel).

A.2.2 Verkehrsnetze der Schweiz

Die Streckennetze des öffentlichen Verkehrs in der Schweiz sind im weltweiten Vergleich sehr gut ausgebaut. Die historische Entwicklung des Ausbaus der Streckennetze ist in Tab. A-9 veranschaulicht.

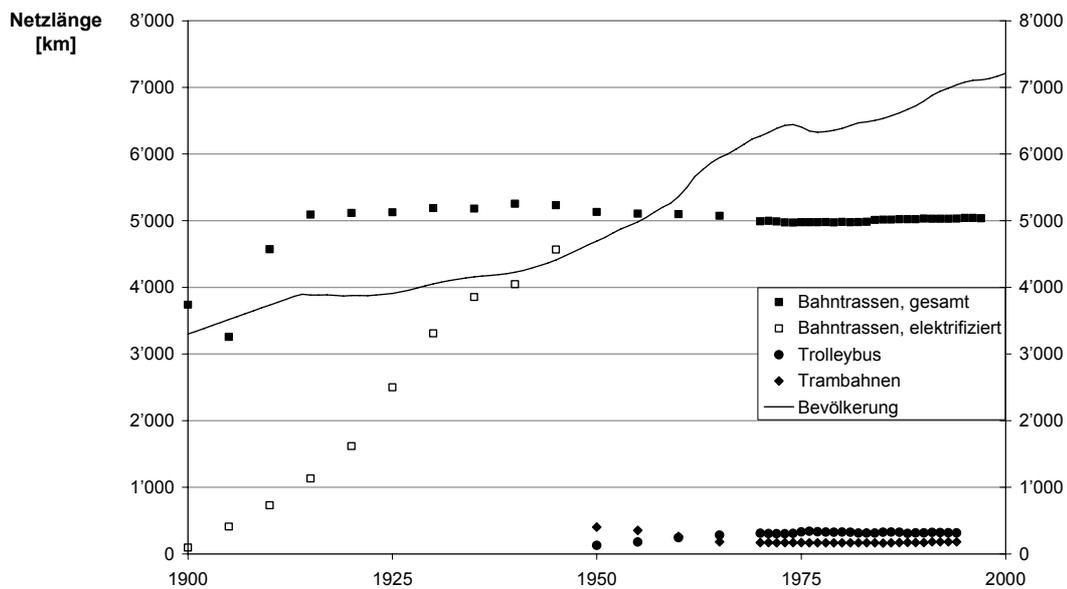


Abb. A-9: Historische Entwicklung der Verkehrsstreckennetze der Schweiz im 20. Jahrhundert. Quelle: Schweizerische Verkehrsstatistik (BFS 1994).

A.3 Übersicht über die Lager

A.3.1 Die urbanen Lagerstätten der Schweiz

In diversen Studien sind urbane Lagerstätten bereits untersucht worden, so dass für die Schweiz ein relativ umfangreiches Datenset existiert (Tab. A-30).

Tab. A-30: Ausgewählte Stofflagermengen in der Nutzungsphase in der Schweiz zu Ende des 20. Jahrhunderts (Pro-Kopf-Mengenangaben). Quelle: diverse Literatur (siehe Spalte).

Stoff/Material	Lagermenge [t/capita]	Quelle
Kies/Sand, Zementwaren, Gips	370	LICHTENSTEIGER (2005)
Ziegelwaren	20	LICHTENSTEIGER (2005)
Stahl	5–10	ZELTNER (1992)
Holz	5	MÜLLER (1998)
Kunststoffe	1	LICHTENSTEIGER (1998)
Aluminium	1	WEBER (1990)
Kupfer	0.3	vorliegende Arbeit
Zink	0.3	BACCINI und BADER (1996) ¹⁸
Cadmium	< 0.001 ¹⁹	nach BACCINI und BRUNNER (1991)

¹⁸ Das Zinklager ist im Projekt „RESUB“ untersucht worden. Das Lager in der Nutzungsphase beträgt ca. 300 kg/capita und in der Landwirtschaft 200 kg/capita.

¹⁹ Pro Jahr werden in der Schweiz ca. 60–70 t Cadmium eingesetzt, also 0.010 kg/capita. Unter der Annahme, dass dieser Fluss ungefähr konstant ist und er das derzeitige Lager näherungsweise über die vergangenen 50 Jahre aufgebaut hat, beträgt die Lagermenge ungefähr 0.5 bis 1.0 kg/capita (BACCINI und BRUNNER 1991).

A.3.2 Unsicherheitsanalyse der Hochrechnungen

Zur Berechnung der Lagerunsicherheiten nach der Methode der Gauss'schen Fehlerfortpflanzung und der Monte-Carlo-Methode wurden die Unsicherheiten der Eingangsdaten abgeschätzt. Die Formeln zur Berechnung der drei Hauptlager (Mittelwerte M_i) und ihrer Unsicherheiten (ΔM_i) gemäss Gl. 26 in Kap. 4.3.1 sind im Folgenden aufgeführt (Gl. 1– Gl. 3).

Gl. 1: *Gebäude*

$$M_{\text{Gebäude}} = \sum_{\text{NT}}^4 N_{\text{NT}} \cdot \sum_{\text{BE}}^2 \left[A_{\text{BE}} \cdot \sum_{\text{PG} \in \text{BE}} (f_{\text{PG}} \cdot f_{\text{M}_{\text{PG}}} \cdot \text{ID}_{\text{PG}} \cdot s_{\text{M}_{\text{PG}}}) \right]$$

mit NT: Nutzungstyp; N_{NT} : Anzahl Gebäude des Teilbestands NT; BE: Bauelement; A_{BE} : Bezugsfläche des Bauelements; PG: Produktgruppe (eines Bauelements); f_{PG} : Häufigkeit der Produktgruppe PG; $f_{\text{M}_{\text{PG}}}$: Häufigkeit des Materials der Produktgruppe PG; ID_{PG} : Installationsdichte der Produktgruppe PG; $s_{\text{M}_{\text{PG}}}$: spezifische Masse der Produktgruppe PG.

Gl. 2: *Infrastruktur*

$$M_{\text{Infrastruktur}} = \rho_{\text{Cu}} \cdot \left(\sum_{i=0}^3 L_i \cdot V_{\text{K},i} \cdot A_{\text{K},i} + \sum_{j=1}^4 L_j \cdot V_{\text{F},j} \cdot A_{\text{F},j} + \sum_{k=1}^3 n_k \cdot m_k + \sum_{l=1}^3 L_l \cdot A_l + \sum_{m=1}^4 L_m \cdot A_m \right)$$

mit ρ_{Cu} : Kupferdichte; i, j : Spannungsebene; L_i, L_j : Stranglänge pro Spannungsebene; $V_{\text{K},i}$: Kabelanteil der Spannungsebene i (Verlegeart); $A_{\text{K},i}$: durchschnittlicher Strangquerschnitt der Kabel der Spannungsebene i ; $V_{\text{F},j}$: Freileitungsanteil der Spannungsebene j (Verlegeart); $A_{\text{F},j}$: durchschnittlicher Strangquerschnitt der Freileitungen der Spannungsebene j ; k : Leistungsklasse der Transformatoren; n_k : Anzahl Transformatoren der Leistungsklasse k ; m_k : durchschnittliche Kupfermasse der Transformatoren der Leistungsklasse k ; l : Kabeltyp der Telekommunikation; L_l : Kabellänge des Kabeltyps l ; A_l : durchschnittlicher Kabelquerschnitt (Kupfer) des Kabeltyps l ; m : Transportmitteltyp; L_m : Streckennetz des Transportmitteltyps m ; A_m : durchschnittlicher Leiterquerschnitt des Transportmitteltyps m .

Gl. 3: *Mobilien*

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

mit i : Gut; $c_{\text{Cu},i}$: durchschnittliche Kupferkonzentration des Guts i ; n_i : Stückzahl des Guts i ; m_i : durchschnittliches Stückgewicht des Guts i .

Die eingesetzten Eingangsdaten *Mittelwert* \pm *Unsicherheit* bzw. *Standardabweichung* sind für die Gebäude in Tab. A-31 bis Tab. A-34, für die Infrastruktur in Tab. A-35 und für die Mobilien in Tab. A-36 tabellarisch zusammengefasst. Die Annahmen zur Unsicherheit bei der Berechnung des Deponielagers ist aufgrund der Einfachheit bereits in Kap. 3.4.2 integriert.

Tab. A-31: Berechnung des Kupferlagers in den Gebäuden: Mittelwert und absolute Unsicherheit der Eingangsparameter zur Berechnung der Unsicherheit des Lagers im Teilbestand vom Nutzungstyp (NT) *Einfamilienhaus*. Parameterbezeichnung durch Angabe des Bauelements (BE), der Produktgruppe und der Messgrösse. – Einheiten: Bezugsfläche (A): [10^6 m^2]; Häufigkeit der Produktgruppe (fP), Häufigkeit des Materials (fM): relative Häufigkeit; Installationsdichte (ID): [kg/m^2 ‚Bezugsfläche‘]; spezifische Masse (sM): [$\text{kg}/\text{Produktmenge}$].

Par.Nr.	NT	BE	Produktgruppe	Messgrösse		Mittelwert	Unsicherheit
p1	EFH		KEINE	Anzahl (Geb)	N(NT)	874'078	87'407.8
p2	EFH	HT	KEINE	Bezugsfläche (HT)	A(HT)	216	32.4
p3	EFH	HT	Stromkabel	Häufigkeit Produkt	fP	1.000	0.01
p4	EFH	HT	Stromkabel	Häufigkeit Material	fM	1.000	0.01
p5	EFH	HT	Stromkabel	Installationsdichte	ID	2.400	0.40
p6	EFH	HT	Stromkabel	spezifische Masse	sM	0.057	0.01
p7	EFH	HT	Telekommunikationskabel	Häufigkeit Produkt	fP	1.000	0.01
p8	EFH	HT	Telekommunikationskabel	Häufigkeit Material	fM	0.950	0.02
p9	EFH	HT	Telekommunikationskabel	Installationsdichte	ID	0.800	0.20
p10	EFH	HT	Telekommunikationskabel	spezifische Masse	sM	0.013	0.02
p11	EFH	HT	Heizungsrohre(Fläche)	Häufigkeit Produkt	fP	0.600	0.15
p12	EFH	HT	Heizungsrohre(Fläche)	Häufigkeit Material	fM	0.400	0.10
p13	EFH	HT	Heizungsrohre(Fläche)	Installationsdichte	ID	3.167	0.30
p14	EFH	HT	Heizungsrohre(Fläche)	spezifische Masse	sM	0.380	0.04
p15	EFH	HT	Heizungsrohre(Verteilung)	Häufigkeit Produkt	fP	1.000	0.02
p16	EFH	HT	Heizungsrohre(Verteilung)	Häufigkeit Material	fM	0.100	0.05
p17	EFH	HT	Heizungsrohre(Verteilung)	Installationsdichte	ID	0.900	0.30
p18	EFH	HT	Heizungsrohre(Verteilung)	spezifische Masse	sM	0.757	0.05
p19	EFH	HT	Fittinge(Heizung)	Häufigkeit Produkt	fP	1.000	0.02
p20	EFH	HT	Fittinge(Heizung)	Häufigkeit Material	fM	0.100	0.05
p21	EFH	HT	Fittinge(Heizung)	Installationsdichte	ID	0.050	0.015
p22	EFH	HT	Fittinge(Heizung)	spezifische Masse	sM	0.100	0.01
p23	EFH	HT	Roharmaturen(Heizung)	Häufigkeit Produkt	fP	1.000	0.02
p24	EFH	HT	Roharmaturen(Heizung)	Häufigkeit Material	fM	0.650	0.02
p25	EFH	HT	Roharmaturen(Heizung)	Installationsdichte	ID	0.070	0.035
p26	EFH	HT	Roharmaturen(Heizung)	spezifische Masse	sM	0.500	0.20
p27	EFH	HT	Wasserröhre	Häufigkeit Produkt	fP	1.000	0.02
p28	EFH	HT	Wasserröhre	Häufigkeit Material	fM	0.100	0.04
p29	EFH	HT	Wasserröhre	Installationsdichte	ID	0.500	0.20
p30	EFH	HT	Wasserröhre	spezifische Masse	sM	0.582	0.05
p31	EFH	HT	Fittinge(Sanitär)	Häufigkeit Produkt	fP	1.000	0.02
p32	EFH	HT	Fittinge(Sanitär)	Häufigkeit Material	fM	0.100	0.04
p33	EFH	HT	Fittinge(Sanitär)	Installationsdichte	ID	0.100	0.04
p34	EFH	HT	Fittinge(Sanitär)	spezifische Masse	sM	0.080	0.008
p35	EFH	HT	Roharmaturen(Sanitär)	Häufigkeit Produkt	fP	1.000	0.02
p36	EFH	HT	Roharmaturen(Sanitär)	Häufigkeit Material	fM	0.910	0.02
p37	EFH	HT	Roharmaturen(Sanitär)	Installationsdichte	ID	0.030	0.02
p38	EFH	HT	Roharmaturen(Sanitär)	spezifische Masse	sM	1.500	0.60
p39	EFH	DA	KEINE	Bezugsfläche (DA)	A(DA)	107	16.05
p40	EFH	DA	Bedachung/Abdeckung	Häufigkeit Produkt	fP	1.000	0
p41	EFH	DA	Bedachung/Abdeckung	Häufigkeit Material	fM	0.010	0.005
p42	EFH	DA	Bedachung/Abdeckung	Installationsdichte	ID	1.170	0.06
p43	EFH	DA	Bedachung/Abdeckung	spezifische Masse	sM	5.581	0.40
p44	EFH	DA	Dachrinnen	Häufigkeit Produkt	fP	1.000	0.02
p45	EFH	DA	Dachrinnen	Häufigkeit Material	fM	0.700	0.08
p46	EFH	DA	Dachrinnen	Installationsdichte	ID	0.200	0.02
p47	EFH	DA	Dachrinnen	spezifische Masse	sM	1.784	0.21410568
p48	EFH	DA	Regenfallrohre	Häufigkeit Produkt	fP	0.800	0.05
p49	EFH	DA	Regenfallrohre	Häufigkeit Material	fM	0.700	0.08
p50	EFH	DA	Regenfallrohre	Installationsdichte	ID	0.060	0.01
p51	EFH	DA	Regenfallrohre	spezifische Masse	sM	1.682	0.20188944
p52	EFH	DA	Dachgaupen	Häufigkeit Produkt	fP	0.350	0.10
p53	EFH	DA	Dachgaupen	Häufigkeit Material	fM	0.800	0.08
p54	EFH	DA	Dachgaupen	Installationsdichte	ID	0.130	0.02
p55	EFH	DA	Dachgaupen	spezifische Masse	sM	5.358	0.40
p56	EFH	DA	Blitzableiter	Häufigkeit Produkt	fP	0.300	0.10
p57	EFH	DA	Blitzableiter	Häufigkeit Material	fM	1.000	0.20
p58	EFH	DA	Blitzableiter	Installationsdichte	ID	0.380	0.06
p59	EFH	DA	Blitzableiter	spezifische Masse	sM	0.351	0.07

Tab. A-32: Berechnung des Kupferlagers in den Gebäuden: Mittelwert und absolute Unsicherheit der Eingangsparameter zur Berechnung der Unsicherheit des Lagers im Teilbestand vom Nutzungstyp (NT) *Mehrfamilienhaus*. Parameterbezeichnung durch Angabe des Bauelements (BE), der Produktgruppe und der Messgrösse. – Einheiten: Bezugsfläche (A): [10^6 m^2]; Häufigkeit der Produktgruppe (fP), Häufigkeit des Materials (fM): relative Häufigkeit; Installationsdichte (ID): [$\text{Produktmenge}/\text{m}^2$, Bezugsfläche]; spezifische Masse (sM): [$\text{kg}/\text{Produktmenge}$].

Par.Nr.	NT	BE	Produktgruppe	Messgrösse		Mittelwert	Unsicherheit
p60	MFH		KEINE	Anzahl (Geb)	N(NT)	586'390	87'958.5
p61	MFH	HT	KEINE	Bezugsfläche (HT)	A(HT)	705	70.5
p62	MFH	HT	Stromkabel	Häufigkeit Produkt	fP	1.000	0.01
p63	MFH	HT	Stromkabel	Häufigkeit Material	fM	1.000	0.01
p64	MFH	HT	Stromkabel	Installationsdichte	ID	2.000	0.40
p65	MFH	HT	Stromkabel	spezifische Masse	sM	0.057	0.01
p66	MFH	HT	Telekommunikationskabel	Häufigkeit Produkt	fP	1.000	0.01
p67	MFH	HT	Telekommunikationskabel	Häufigkeit Material	fM	0.950	0.03
p68	MFH	HT	Telekommunikationskabel	Installationsdichte	ID	0.400	0.20
p69	MFH	HT	Telekommunikationskabel	spezifische Masse	sM	0.013	0.02
p70	MFH	HT	Heizungsrohre(Fläche)	Häufigkeit Produkt	fP	0.300	0.10
p71	MFH	HT	Heizungsrohre(Fläche)	Häufigkeit Material	fM	0.400	0.10
p72	MFH	HT	Heizungsrohre(Fläche)	Installationsdichte	ID	2.929	0.30
p73	MFH	HT	Heizungsrohre(Fläche)	spezifische Masse	sM	0.380	0.04
p74	MFH	HT	Heizungsrohre(Verteilung)	Häufigkeit Produkt	fP	1.000	0.02
p75	MFH	HT	Heizungsrohre(Verteilung)	Häufigkeit Material	fM	0.050	0.03
p76	MFH	HT	Heizungsrohre(Verteilung)	Installationsdichte	ID	0.900	0.30
p77	MFH	HT	Heizungsrohre(Verteilung)	spezifische Masse	sM	0.757	0.07
p78	MFH	HT	Fittinge(Heizung)	Häufigkeit Produkt	fP	1.000	0.02
p79	MFH	HT	Fittinge(Heizung)	Häufigkeit Material	fM	0.050	0.03
p80	MFH	HT	Fittinge(Heizung)	Installationsdichte	ID	0.050	0.015
p81	MFH	HT	Fittinge(Heizung)	spezifische Masse	sM	0.100	0.01
p82	MFH	HT	Roharmaturen(Heizung)	Häufigkeit Produkt	fP	1.000	0.02
p83	MFH	HT	Roharmaturen(Heizung)	Häufigkeit Material	fM	0.650	0.02
p84	MFH	HT	Roharmaturen(Heizung)	Installationsdichte	ID	0.070	0.035
p85	MFH	HT	Roharmaturen(Heizung)	spezifische Masse	sM	0.500	0.30
p86	MFH	HT	Wasserröhre	Häufigkeit Produkt	fP	1.000	0.02
p87	MFH	HT	Wasserröhre	Häufigkeit Material	fM	0.100	0.04
p88	MFH	HT	Wasserröhre	Installationsdichte	ID	0.500	0.20
p89	MFH	HT	Wasserröhre	spezifische Masse	sM	0.582	0.07
p90	MFH	HT	Fittinge(Sanitär)	Häufigkeit Produkt	fP	1.000	0.02
p91	MFH	HT	Fittinge(Sanitär)	Häufigkeit Material	fM	0.100	0.04
p92	MFH	HT	Fittinge(Sanitär)	Installationsdichte	ID	0.100	0.04
p93	MFH	HT	Fittinge(Sanitär)	spezifische Masse	sM	0.080	0.008
p94	MFH	HT	Roharmaturen(Sanitär)	Häufigkeit Produkt	fP	1.000	0.02
p95	MFH	HT	Roharmaturen(Sanitär)	Häufigkeit Material	fM	0.910	0.02
p96	MFH	HT	Roharmaturen(Sanitär)	Installationsdichte	ID	0.020	0.01
p97	MFH	HT	Roharmaturen(Sanitär)	spezifische Masse	sM	1.500	0.60
p98	MFH	DA	KEINE	Bezugsfläche (DA)	A(DA)	229	22.9
p99	MFH	DA	Bedachung/Abdeckung	Häufigkeit Produkt	fP	1.000	0.00
p100	MFH	DA	Bedachung/Abdeckung	Häufigkeit Material	fM	0.010	0.005
p101	MFH	DA	Bedachung/Abdeckung	Installationsdichte	ID	1.170	0.06
p102	MFH	DA	Bedachung/Abdeckung	spezifische Masse	sM	5.581	0.40
p103	MFH	DA	Dachrinnen	Häufigkeit Produkt	fP	1.000	0.02
p104	MFH	DA	Dachrinnen	Häufigkeit Material	fM	0.700	0.08
p105	MFH	DA	Dachrinnen	Installationsdichte	ID	0.140	0.02
p106	MFH	DA	Dachrinnen	spezifische Masse	sM	2.500	0.300048
p107	MFH	DA	Regenfallrohre	Häufigkeit Produkt	fP	0.500	0.10
p108	MFH	DA	Regenfallrohre	Häufigkeit Material	fM	0.700	0.08
p109	MFH	DA	Regenfallrohre	Installationsdichte	ID	0.100	0.01
p110	MFH	DA	Regenfallrohre	spezifische Masse	sM	2.357	0.28279524
p111	MFH	DA	Dachgaupen	Häufigkeit Produkt	fP	0.400	0.10
p112	MFH	DA	Dachgaupen	Häufigkeit Material	fM	0.800	0.08
p113	MFH	DA	Dachgaupen	Installationsdichte	ID	0.130	0.02
p114	MFH	DA	Dachgaupen	spezifische Masse	sM	5.358	0.40
p115	MFH	DA	Blitzableiter	Häufigkeit Produkt	fP	0.200	0.08
p116	MFH	DA	Blitzableiter	Häufigkeit Material	fM	1.000	0.20
p117	MFH	DA	Blitzableiter	Installationsdichte	ID	0.380	0.07
p118	MFH	DA	Blitzableiter	spezifische Masse	sM	0.351	0.07

Tab. A-33: Berechnung des Kupferlagers in den Gebäuden: Mittelwert und absolute Unsicherheit der Eingangsparameter zur Berechnung der Unsicherheit des Lagers im Teilbestand vom Nutzungstyp (NT) *Dienstleistungsgebäude*. Parameterbezeichnung durch Angabe des Bauelements (BE), der Produktgruppe und der Messgrösse. – Einheiten: Bezugsfläche (A): [10^6 m^2]; Häufigkeit der Produktgruppe (fP), Häufigkeit des Materials (fM): relative Häufigkeit; Installationsdichte (ID): [kg/m^2 „Bezugsfläche“]; spezifische Masse (sM): [$\text{kg}/\text{Produktmenge}$].

Par.Nr.	NT	BE	Produktgruppe	Messgrösse		Mittelwert	Unsicherheit
p120	DLG	HT	KEINE	Bezugsfläche (HT)	A(HT)	1'271	190.65
p121	DLG	HT	Stromkabel	Häufigkeit Produkt	fP	1.000	0.005
p122	DLG	HT	Stromkabel	Häufigkeit Material	fM	1.000	0.01
p123	DLG	HT	Stromkabel	Installationsdichte	ID	6.000	3.00
p124	DLG	HT	Stromkabel	spezifische Masse	sM	0.057	0.015
p125	DLG	HT	Telekommunikationskabel	Häufigkeit Produkt	fP	1.000	0.01
p126	DLG	HT	Telekommunikationskabel	Häufigkeit Material	fM	0.850	0.10
p127	DLG	HT	Telekommunikationskabel	Installationsdichte	ID	1.200	0.30
p128	DLG	HT	Telekommunikationskabel	spezifische Masse	sM	0.013	0.03
p129	DLG	HT	Heizungsrohre(Fläche)	Häufigkeit Produkt	fP	0.100	0.08
p130	DLG	HT	Heizungsrohre(Fläche)	Häufigkeit Material	fM	0.400	0.10
p131	DLG	HT	Heizungsrohre(Fläche)	Installationsdichte	ID	3.800	0.30
p132	DLG	HT	Heizungsrohre(Fläche)	spezifische Masse	sM	0.380	0.04
p133	DLG	HT	Heizungsrohre(Verteilung)	Häufigkeit Produkt	fP	1.000	0.01
p134	DLG	HT	Heizungsrohre(Verteilung)	Häufigkeit Material	fM	0.050	0.03
p135	DLG	HT	Heizungsrohre(Verteilung)	Installationsdichte	ID	0.900	0.30
p136	DLG	HT	Heizungsrohre(Verteilung)	spezifische Masse	sM	0.757	0.08
p137	DLG	HT	Fittinge(Heizung)	Häufigkeit Produkt	fP	1.000	0.01
p138	DLG	HT	Fittinge(Heizung)	Häufigkeit Material	fM	0.050	0.03
p139	DLG	HT	Fittinge(Heizung)	Installationsdichte	ID	0.050	0.015
p140	DLG	HT	Fittinge(Heizung)	spezifische Masse	sM	0.100	0.015
p141	DLG	HT	Roharmaturen(Heizung)	Häufigkeit Produkt	fP	1.000	0.01
p142	DLG	HT	Roharmaturen(Heizung)	Häufigkeit Material	fM	0.650	0.02
p143	DLG	HT	Roharmaturen(Heizung)	Installationsdichte	ID	0.070	0.035
p144	DLG	HT	Roharmaturen(Heizung)	spezifische Masse	sM	0.500	0.30
p145	DLG	HT	Wasserröhre	Häufigkeit Produkt	fP	1.000	0.02
p146	DLG	HT	Wasserröhre	Häufigkeit Material	fM	0.100	0.04
p147	DLG	HT	Wasserröhre	Installationsdichte	ID	0.250	0.10
p148	DLG	HT	Wasserröhre	spezifische Masse	sM	0.582	0.08
p149	DLG	HT	Fittinge(Sanitär)	Häufigkeit Produkt	fP	1.000	0.02
p150	DLG	HT	Fittinge(Sanitär)	Häufigkeit Material	fM	0.100	0.04
p151	DLG	HT	Fittinge(Sanitär)	Installationsdichte	ID	0.050	0.02
p152	DLG	HT	Fittinge(Sanitär)	spezifische Masse	sM	0.080	0.012
p153	DLG	HT	Roharmaturen(Sanitär)	Häufigkeit Produkt	fP	1.000	0.02
p154	DLG	HT	Roharmaturen(Sanitär)	Häufigkeit Material	fM	0.910	0.02
p155	DLG	HT	Roharmaturen(Sanitär)	Installationsdichte	ID	0.020	0.01
p156	DLG	HT	Roharmaturen(Sanitär)	spezifische Masse	sM	1.500	0.60
p157	DLG	DA	KEINE	Bezugsfläche (DA)	A(DA)	358	71.6
p158	DLG	DA	Bedachung/Abdeckung	Häufigkeit Produkt	fP	1.000	0
p159	DLG	DA	Bedachung/Abdeckung	Häufigkeit Material	fM	0.020	0.01
p160	DLG	DA	Bedachung/Abdeckung	Installationsdichte	ID	1.170	0.06
p161	DLG	DA	Bedachung/Abdeckung	spezifische Masse	sM	5.581	0.40
p162	DLG	DA	Dachrinnen	Häufigkeit Produkt	fP	1.000	0.05
p163	DLG	DA	Dachrinnen	Häufigkeit Material	fM	0.700	0.08
p164	DLG	DA	Dachrinnen	Installationsdichte	ID	0.140	0.03
p165	DLG	DA	Dachrinnen	spezifische Masse	sM	3.126	0.37506
p166	DLG	DA	Regenfallrohre	Häufigkeit Produkt	fP	0.500	0.10
p167	DLG	DA	Regenfallrohre	Häufigkeit Material	fM	0.700	0.08
p168	DLG	DA	Regenfallrohre	Installationsdichte	ID	0.100	0.01
p169	DLG	DA	Regenfallrohre	spezifische Masse	sM	2.944	0.35330652
p170	DLG	DA	Dachgaupen	Häufigkeit Produkt	fP	0.200	0.10
p171	DLG	DA	Dachgaupen	Häufigkeit Material	fM	0.800	0.08
p172	DLG	DA	Dachgaupen	Installationsdichte	ID	0.130	0.05
p173	DLG	DA	Dachgaupen	spezifische Masse	sM	5.358	0.40
p174	DLG	DA	Blitzableiter	Häufigkeit Produkt	fP	0.500	0.10
p175	DLG	DA	Blitzableiter	Häufigkeit Material	fM	1.000	0.20
p176	DLG	DA	Blitzableiter	Installationsdichte	ID	0.380	0.07
p177	DLG	DA	Blitzableiter	spezifische Masse	sM	0.351	0.07

Tab. A-34: Berechnung des Kupferlagers in den Gebäuden: Mittelwert und absolute Unsicherheit der Eingangsparameter zur Berechnung der Unsicherheit des Lagers im Teilbestand vom Nutzungstyp (NT) Produktionsgebäude. Parameterbezeichnung durch Angabe des Bauelements (BE), der Produktgruppe und der Messgrösse. – Einheiten: Bezugsfläche (A): [10^6 m^2]; Häufigkeit der Produktgruppe (fP), Häufigkeit des Materials (fM): relative Häufigkeit; Installationsdichte (ID): [$\text{Produktmenge}/\text{m}^2$, Bezugsfläche]; spezifische Masse (sM): [$\text{kg}/\text{Produktmenge}$].

Par.Nr.	NT	BE	Produktgruppe	Messgrösse		Mittelwert	Unsicherheit
p179	PRG	HT	KEINE	Bezugsfläche (HT)	A(HT)	401	80.2
p180	PRG	HT	Stromkabel	Häufigkeit Produkt	fP	1.000	0.08
p181	PRG	HT	Stromkabel	Häufigkeit Material	fM	1.000	0.01
p182	PRG	HT	Stromkabel	Installationsdichte	ID	3.000	1.50
p183	PRG	HT	Stromkabel	spezifische Masse	sM	0.057	0.02
p184	PRG	HT	Telekommunikationskabel	Häufigkeit Produkt	fP	0.650	0.15
p185	PRG	HT	Telekommunikationskabel	Häufigkeit Material	fM	0.850	0.10
p186	PRG	HT	Telekommunikationskabel	Installationsdichte	ID	0.040	0.03
p187	PRG	HT	Telekommunikationskabel	spezifische Masse	sM	0.013	0.03
p188	PRG	HT	Heizungsrohre(Fläche)	Häufigkeit Produkt	fP	0.020	0.02
p189	PRG	HT	Heizungsrohre(Fläche)	Häufigkeit Material	fM	0.400	0.10
p190	PRG	HT	Heizungsrohre(Fläche)	Installationsdichte	ID	2.000	0.50
p191	PRG	HT	Heizungsrohre(Fläche)	spezifische Masse	sM	0.380	0.06
p192	PRG	HT	Heizungsrohre(Verteilung)	Häufigkeit Produkt	fP	0.100	0.05
p193	PRG	HT	Heizungsrohre(Verteilung)	Häufigkeit Material	fM	0.050	0.03
p194	PRG	HT	Heizungsrohre(Verteilung)	Installationsdichte	ID	0.257	0.10
p195	PRG	HT	Heizungsrohre(Verteilung)	spezifische Masse	sM	0.757	0.12
p196	PRG	HT	Fittinge(Heizung)	Häufigkeit Produkt	fP	0.100	0.05
p197	PRG	HT	Fittinge(Heizung)	Häufigkeit Material	fM	0.050	0.03
p198	PRG	HT	Fittinge(Heizung)	Installationsdichte	ID	0.014	0.05
p199	PRG	HT	Fittinge(Heizung)	spezifische Masse	sM	0.100	0.015
p200	PRG	HT	Roharmaturen(Heizung)	Häufigkeit Produkt	fP	0.100	0.05
p201	PRG	HT	Roharmaturen(Heizung)	Häufigkeit Material	fM	0.650	0.02
p202	PRG	HT	Roharmaturen(Heizung)	Installationsdichte	ID	0.020	0.01
p203	PRG	HT	Roharmaturen(Heizung)	spezifische Masse	sM	0.500	0.30
p204	PRG	HT	Wasserröhre	Häufigkeit Produkt	fP	0.950	0.10
p205	PRG	HT	Wasserröhre	Häufigkeit Material	fM	0.100	0.04
p206	PRG	HT	Wasserröhre	Installationsdichte	ID	0.050	0.03
p207	PRG	HT	Wasserröhre	spezifische Masse	sM	0.582	0.12
p208	PRG	HT	Fittinge(Sanitär)	Häufigkeit Produkt	fP	0.950	0.10
p209	PRG	HT	Fittinge(Sanitär)	Häufigkeit Material	fM	0.100	0.04
p210	PRG	HT	Fittinge(Sanitär)	Installationsdichte	ID	0.010	0.005
p211	PRG	HT	Fittinge(Sanitär)	spezifische Masse	sM	0.080	0.016
p212	PRG	HT	Roharmaturen(Sanitär)	Häufigkeit Produkt	fP	0.950	0.10
p213	PRG	HT	Roharmaturen(Sanitär)	Häufigkeit Material	fM	0.910	0.02
p214	PRG	HT	Roharmaturen(Sanitär)	Installationsdichte	ID	0.020	0.01
p215	PRG	HT	Roharmaturen(Sanitär)	spezifische Masse	sM	1.500	0.60
p216	PRG	DA	KEINE	Bezugsfläche (DA)	A(DA)	182	36.4
p217	PRG	DA	Bedachung/Abdeckung	Häufigkeit Produkt	fP	1.000	0
p218	PRG	DA	Bedachung/Abdeckung	Häufigkeit Material	fM	0.000	0.002
p219	PRG	DA	Bedachung/Abdeckung	Installationsdichte	ID	1.170	0.06
p220	PRG	DA	Bedachung/Abdeckung	spezifische Masse	sM	5.581	0.40
p221	PRG	DA	Dachrinnen	Häufigkeit Produkt	fP	1.000	0.03
p222	PRG	DA	Dachrinnen	Häufigkeit Material	fM	0.500	0.12
p223	PRG	DA	Dachrinnen	Installationsdichte	ID	0.140	0.04
p224	PRG	DA	Dachrinnen	spezifische Masse	sM	3.126	0.37506
p225	PRG	DA	Regenfallrohre	Häufigkeit Produkt	fP	0.500	0.10
p226	PRG	DA	Regenfallrohre	Häufigkeit Material	fM	0.500	0.12
p227	PRG	DA	Regenfallrohre	Installationsdichte	ID	0.100	0.02
p228	PRG	DA	Regenfallrohre	spezifische Masse	sM	2.944	0.35330652
p229	PRG	DA	Dachgaupen	Häufigkeit Produkt	fP	0.000	0.01
p230	PRG	DA	Dachgaupen	Häufigkeit Material	fM	0.600	0.15
p231	PRG	DA	Dachgaupen	Installationsdichte	ID	0.130	0.08
p232	PRG	DA	Dachgaupen	spezifische Masse	sM	5.358	0.40
p233	PRG	DA	Blitzableiter	Häufigkeit Produkt	fP	0.800	0.10
p234	PRG	DA	Blitzableiter	Häufigkeit Material	fM	1.000	0.20
p235	PRG	DA	Blitzableiter	Installationsdichte	ID	0.380	0.09
p236	PRG	DA	Blitzableiter	spezifische Masse	sM	0.351	0.07

Tab. A-35: Berechnung des Kupferlagers in der Infrastruktur: Mittelwert und absolute Unsicherheit der Eingangsparameter zur Berechnung der Unsicherheit des Infrastrukturlagers. Parameterbezeichnung durch Angabe des Infrastrukturnetzes (Infrastr.Netz) und der Messgrösse, ggf. mit Erläuterung. Zusätzlich ist die Einheit der Messgrössen angegeben. – Abkürzungen: Telekommunik.: Telekommunikationsnetz; HöS: Höchstspannung; HS: Hochspannung; MS: Mittelspannung; NS: Niederspannung; MVA: Megavoltampère; sM: spezifische Masse; Anschluss: Anschlussnetz; F+R: Fern- und Regionalnetz; FMK: Fernmeldekabel; Koax: Koaxialkabel; SBB: Schweizerische Bundesbahnen.

Par.Nr.	Infrastr.Netz	Messgrösse	Erläuterung	Mittelwert	Unsicherheit	Einheit
p1	Starkstrom	Kupferdichte	beides	8.93	0.01	kg/dm ³
p2	Starkstrom	Stranglänge HöS	beides	6'688	15	km
p3	Starkstrom	Stranglänge HS	beides	9'000	3'000	km
p4	Starkstrom	Stranglänge MS	beides	65'000	20'000	km
p5	Starkstrom	Stranglänge NS	beides	120'000	40'000	km
p6	Starkstrom	Verlegeart HöS	Anteil Kabel	0.002272727	0.00015	%
p7	Starkstrom	Verlegeart HS	Anteil Kabel	0.11	0.01	%
p8	Starkstrom	Verlegeart MS	Anteil Kabel	0.51	0.05	%
p9	Starkstrom	Verlegeart NS	Anteil Kabel	0.73	0.07	%
p10	Starkstrom	Querschnitt HöS	Kabel	1'200	450	mm ²
p11	Starkstrom	Querschnitt HS	Kabel	1'200	300	mm ²
p12	Starkstrom	Querschnitt MS	Kabel	570	130	mm ²
p13	Starkstrom	Querschnitt NS	Kabel	456	100	mm ²
p14	Starkstrom	Querschnitt HöS	Freileitung	120	25	mm ²
p15	Starkstrom	Querschnitt HS	Freileitung	120	25	mm ²
p16	Starkstrom	Querschnitt MS	Freileitung	120	25	mm ²
p17	Starkstrom	Querschnitt NS	Freileitung	120	25	mm ²
p18	Starkstrom	Kupferanteil HöS	Freileitung	0.0	0.005	%Anteil Cu
p19	Starkstrom	Kupferanteil HS	Freileitung	0.1	0.050	%Anteil Cu
p20	Starkstrom	Kupferanteil MS	Freileitung	0.9	0.050	%Anteil Cu
p21	Starkstrom	Kupferanteil NS	Freileitung	1.0	0.020	%Anteil Cu
p22	Starkstrom	Trafozahl < 2.5 MVA		45'000	4'500	Anzahl
p23	Starkstrom	Trafozahl 2.5-50 MVA		800	80	Anzahl
p24	Starkstrom	Trafozahl > 50 MVA		200	20	Anzahl
p25	Starkstrom	Trafo sM < 2.5 MVA		600	90	kg/Anlage
p26	Starkstrom	Trafo sM 2.5-50 MVA		6'000	900	kg/Anlage
p27	Starkstrom	Trafo sM > 50 MVA		15'000	2'250	kg/Anlage
p28	Telekommunik.	Fernmeldekabel Anschluss	Längen	125'981	5'000	km
p29	Telekommunik.	Fernmeldekabel F+R	Längen	11'756	1'000	km
p30	Telekommunik.	Koaxialkabel F+R	Längen	2'091	100	km
p31	Telekommunik.	Querschnitt FMK Anschluss		50	30	mm ²
p32	Telekommunik.	Querschnitt FMK F+R		500	150	mm ²
p33	Telekommunik.	Querschnitt Koax F+R		500	250	mm ²
p34	Transport	SBB Oberleitungslängen		7'400	40	km
p35	Transport	Privatbahn Oberleitg.-Längen		4'500	70	km
p36	Transport	Tram Oberleitungslängen		380	15	km
p37	Transport	Trolleybus Oberltg.-Längen		640	15	km
p38	Transport	Querschnitt SBB		107	15	mm ²
p39	Transport	Querschnitt Privatb		107	15	mm ²
p40	Transport	Querschnitt Tram		50	8	mm ²
p41	Transport	Querschnitt Trolleybus		100	16	mm ²

Tab. A-36: Berechnung des Kupferlagers in den Mobilien: Mittelwert und absolute Unsicherheit der Eingangsparameter zur Berechnung der Unsicherheit des Mobilienlagers. Parameterbezeichnung durch Angabe des Gutes (Gütergruppe) und der Messgrösse. Für jede der 23 Gütergruppen sind folgende Messgrössen aufgelistet: Anzahl der Gütereinheiten n_i (Stückzahl) [N] (oberes Drittel); durchschnittliche Masse pro Einheit m_i (Stückgewicht) [t] (mittleres Drittel); durchschnittliche Kupferkonzentration $c_{Cu,i}$ (relativer Anteil am Stückgewicht)(unteres Drittel).

Par.Nr.	Gut	Messgrösse	Mittelwert	Unsicherheit
p1	Lokomotiven	Anzahl Einheiten	2'100	100
p2	Personenwagen (Schiene)	Anzahl Einheiten	5'200	100
p3	Güterwagen (Schiene)	Anzahl Einheiten	26'000	1'000
p4	Pw (Strasse)/PKW	Anzahl Einheiten	3'500'000	100'000
p5	Lastwagen/Lastkraftwagen	Anzahl Einheiten	500'000	100'000
p6	Motorräder	Anzahl Einheiten	730'000	10'000
p7	Tram/Strassenbahn	Anzahl Einheiten	900	100
p8	Velo/Fahrrad	Anzahl Einheiten	4'000'000	1'000'000
p9	Waschmaschinen	Anzahl Einheiten	2'000'000	400'000
p10	Tumbler/Trockner	Anzahl Einheiten	1'000'000	200'000
p11	Kühlgeräte	Anzahl Einheiten	3'300'000	495'000
p12	Kochherd	Anzahl Einheiten	4'000'000	800'000
p13	Geschirrspüler	Anzahl Einheiten	1'287'000	128'700
p14	Diverse (Föhn, Staubsauger etc.)	Anzahl Einheiten	3'300'000	495'000
p15	Geschirr+Besteck	Anzahl Einheiten	3'000'000	450'000
p16	Lampen	Anzahl Einheiten	3'000'000	450'000
p17	Schlüssel	Anzahl Einheiten	7'200'000	1'800'000
p18	Münzgeld	Anzahl Einheiten	7'200'000	1'800'000
p19	Unterhaltungselektronik	Anzahl Einheiten	7'200'000	1'800'000
p20	„Büromatik“	Anzahl Einheiten	3'600'000	900'000
p21	Werkzeug, Nägel, Schrauben, Beschläge	Anzahl Einheiten	7'200'000	1'800'000
p22	Produktionsmaschinen (inkl. Landwirtschaft)	Anzahl Einheiten	7'200'000	1'800'000
p23	Sonstiges (Sport, Kerzenständer, Dekorationen, Kunstwerke, Schreibgeräte,	Anzahl Einheiten	7'200'000	1'800'000
p24	Lokomotiven	Masse pro Einheit [t]	80.000	10.000
p25	Personenwagen (Schiene)	Masse pro Einheit [t]	50.000	8.000
p26	Güterwagen (Schiene)	Masse pro Einheit [t]	20.000	4.000
p27	Pw (Strasse)/PKW	Masse pro Einheit [t]	1.000	0.300
p28	Lastwagen/Lastkraftwagen	Masse pro Einheit [t]	2.400	0.500
p29	Motorräder	Masse pro Einheit [t]	0.100	0.030
p30	Tram/Strassenbahn	Masse pro Einheit [t]	22.000	4.000
p31	Velo/Fahrrad	Masse pro Einheit [t]	0.015	0.040
p32	Waschmaschinen	Masse pro Einheit [t]	0.100	0.030
p33	Tumbler/Trockner	Masse pro Einheit [t]	0.035	0.010
p34	Kühlgeräte	Masse pro Einheit [t]	0.050	0.015
p35	Kochherd	Masse pro Einheit [t]	0.060	0.015
p36	Geschirrspüler	Masse pro Einheit [t]	0.060	0.015
p37	Diverse (Föhn, Staubsauger etc.)	Masse pro Einheit [t]	0.050	0.015
p38	Geschirr+Besteck	Masse pro Einheit [t]	0.050	0.025
p39	Lampen	Masse pro Einheit [t]	0.100	0.025
p40	Schlüssel	Masse pro Einheit [t]	0.0015	0.001
p41	Münzgeld	Masse pro Einheit [t]	0.003	0.001
p42	Unterhaltungselektronik	Masse pro Einheit [t]	0.060	0.015
p43	„Büromatik“	Masse pro Einheit [t]	0.030	0.010
p44	Werkzeug, Nägel, Schrauben, Beschläge	Masse pro Einheit [t]	0.005	0.002
p45	Produktionsmaschinen (inkl. Landwirtschaft)	Masse pro Einheit [t]	1.000	0.500
p46	Sonstiges (Sport, Kerzenständer, Dekorationen, Kunstwerke, Schreibgeräte,	Masse pro Einheit [t]	0.002	0.001
p47	Lokomotiven	Kupferkonzentration (Anteil)	0.080	0.015
p48	Personenwagen (Schiene)	Kupferkonzentration (Anteil)	0.020	0.010
p49	Güterwagen (Schiene)	Kupferkonzentration (Anteil)	0.000	0.000
p50	Pw (Strasse)/PKW	Kupferkonzentration (Anteil)	0.007	0.001
p51	Lastwagen/Lastkraftwagen	Kupferkonzentration (Anteil)	0.020	0.005
p52	Motorräder	Kupferkonzentration (Anteil)	0.010	0.005
p53	Tram/Strassenbahn	Kupferkonzentration (Anteil)	0.070	0.030
p54	Velo/Fahrrad	Kupferkonzentration (Anteil)	0.010	0.005
p55	Waschmaschinen	Kupferkonzentration (Anteil)	0.010	0.003
p56	Tumbler/Trockner	Kupferkonzentration (Anteil)	0.030	0.004
p57	Kühlgeräte	Kupferkonzentration (Anteil)	0.010	0.002
p58	Kochherd	Kupferkonzentration (Anteil)	0.010	0.005
p59	Geschirrspüler	Kupferkonzentration (Anteil)	0.020	0.008
p60	Diverse	Kupferkonzentration (Anteil)	0.040	0.008
p61	Geschirr+Besteck	Kupferkonzentration (Anteil)	0.030	0.020
p62	Lampen	Kupferkonzentration (Anteil)	0.010	0.005
p63	Schlüssel	Kupferkonzentration (Anteil)	0.700	0.100
p64	Münzgeld	Kupferkonzentration (Anteil)	0.750	0.030
p65	Unterhaltungselektronik	Kupferkonzentration (Anteil)	0.040	0.005
p66	„Büromatik“	Kupferkonzentration (Anteil)	0.040	0.005
p67	Werkzeug, Nägel, Schrauben, Beschläge	Kupferkonzentration (Anteil)	0.700	0.300
p68	Produktionsmaschinen (inkl. Landwirtschaft)	Kupferkonzentration (Anteil)	0.010	0.005
p69	Sonstiges (Sport, Kerzenständer, Dekorationen, Kunstwerke, Schreibgeräte,	Kupferkonzentration (Anteil)	0.700	0.250

Die Ergebnisse der Unsicherheitsberechnung nach den beiden Berechnungsmethoden (Gauss'sche Fehlerfortpflanzung, Monte-Carlo-Methode) sind in Tab. A-37 zusammengefasst.

Tab. A-37: Vergleich der Unsicherheitsberechnung nach Gauss'scher Fehlerfortpflanzung und mit der Monte-Carlo-Methode für die drei Hauptlager *Gebäude*, *Infrastruktur* und *Mobilien*. Die Ergebnisse der Berechnung mit der Monte-Carlo-Methode sind graphisch aus den Normalverteilungen bestimmt. – Bei den Gebäuden wurde die relative Standardabweichung für das Lager ohne Berücksichtigung der Renovationszyklen berechnet und auf jenes mit der Berücksichtigung übertragen (siehe Kap. 4.3.1).

	Gebäude	Infrastruktur	Mobilien
<i>nach Gauss'scher Fehlerfortpflanzung</i>			
Mittelwert [t]	568'000	768'000	245'000
Standardabweichung ($\pm \sigma$) [t]	80'500	175'000	59'500
relative Standardabweichung	14.2 % *	22.8 %	24.3 %
<i>mit Monte-Carlo-Methode</i>			
Mittelwert [t]	568'000	768'000	245'500
Standardabweichung ($\pm \sigma$) [t]	82'800	179'000	64'500
relative Standardabweichung	14.6 % *	23.3 %	26.3 %

A.3.3 Wachstumskurven

Entwicklung der Infrastruktur

Die Rekonstruktion des Kupferlagers im Infrastrukturbereich ist das Ergebnis literaturbasierter Plausibilitätsüberlegungen zum Stromnetz, das das Gros des Lagers ausmacht (LINDNER 1985). Deutlich sind zwei Phasen intensivierten Netzwachstums im Betrachtungszeitraum erkennbar (vgl. Abb. A-10):

- eine erste Phase, in der die bestehenden Siedlungen flächendeckend elektrifiziert werden (I. Quartal), und
- eine zweite Phase, die zunehmende Stranglängen infolge beschleunigten Siedlungswachstums (\sim Bevölkerungswachstum, Abb. A-11) und zunehmende Strangquerschnitte infolge beschleunigten Anstiegs beim Stromverbrauch (Wohlstandswachstum, „Elektrifizierung des Alltags“) erfordern (III./IV. Quartal).

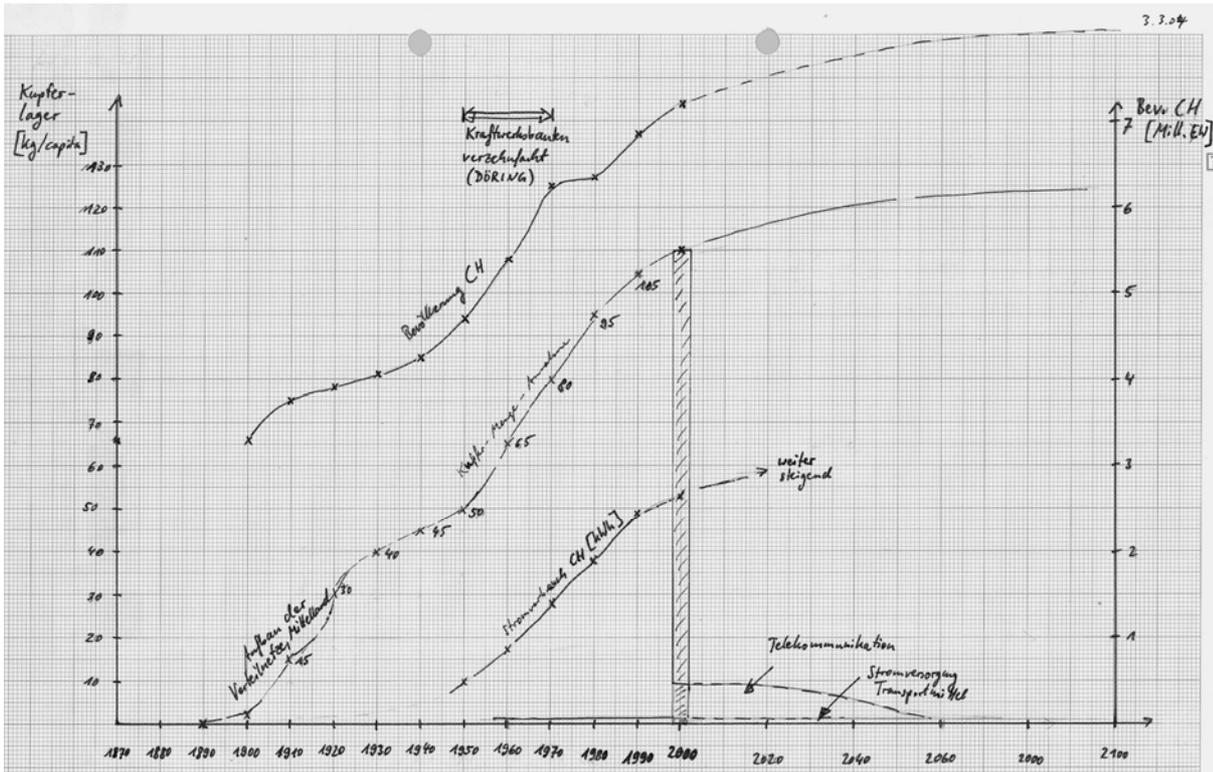


Abb. A-10: Plausibilitätsüberlegungen zum Wachstum der Stromnetze im 20. Jahrhundert.

Exkurs: Bevölkerungsentwicklung der Schweiz

Die Entwicklung der Kupferlager ist eng mit der Bevölkerungsentwicklung verknüpft, welche gut dokumentiert ist. Die Bevölkerung verdoppelte sich ca. während der vergangenen hundert Jahre. Mittelfristige konjunkturelle Schwankungen sind deutlich erkennbar (Kriegszeit, Nachkriegszeit z.B. als Folge der Immigrationspolitik), doch über das gesamte Jahrhundert verläuft das Wachstum näherungsweise linear (Abb. A-11).

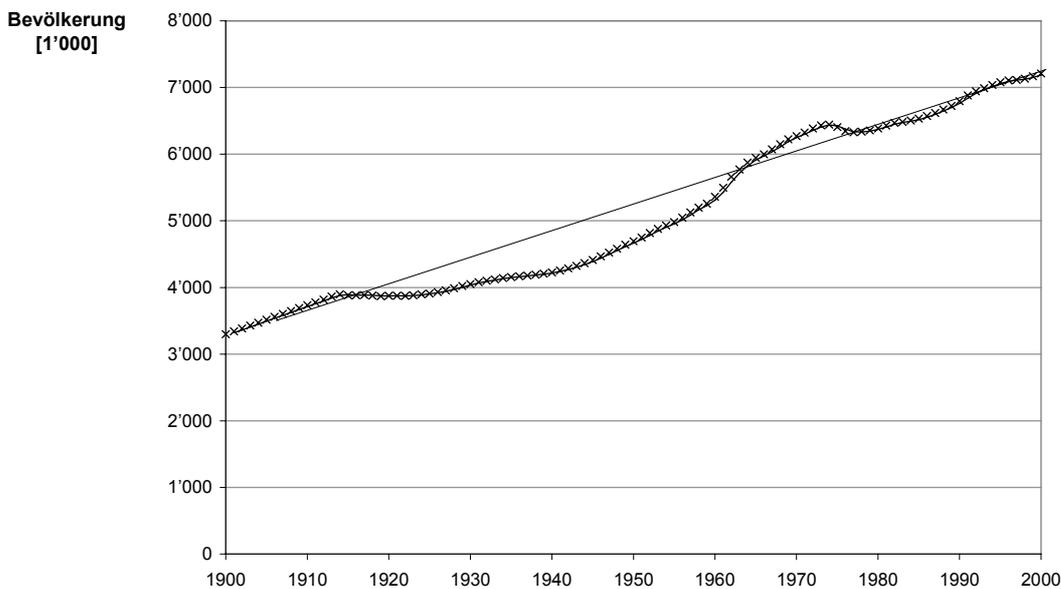


Abb. A-11: Bevölkerungsentwicklung der Schweiz im 20. Jahrhundert. Die eingetragene Verbindungslinie ist der gleitende Durchschnitt der Bevölkerung. Die Gerade entspricht einer jährlichen Bevölkerungszunahme von ca. 42'000 Einwohnern pro Jahr.

A.4 Modell

A.4.1 System

Das dynamische Modell *Cuprum* basiert auf dem Kupferhaushaltssystem in Abb. A-12 (grössere Darstellung in Abb. 5-2).

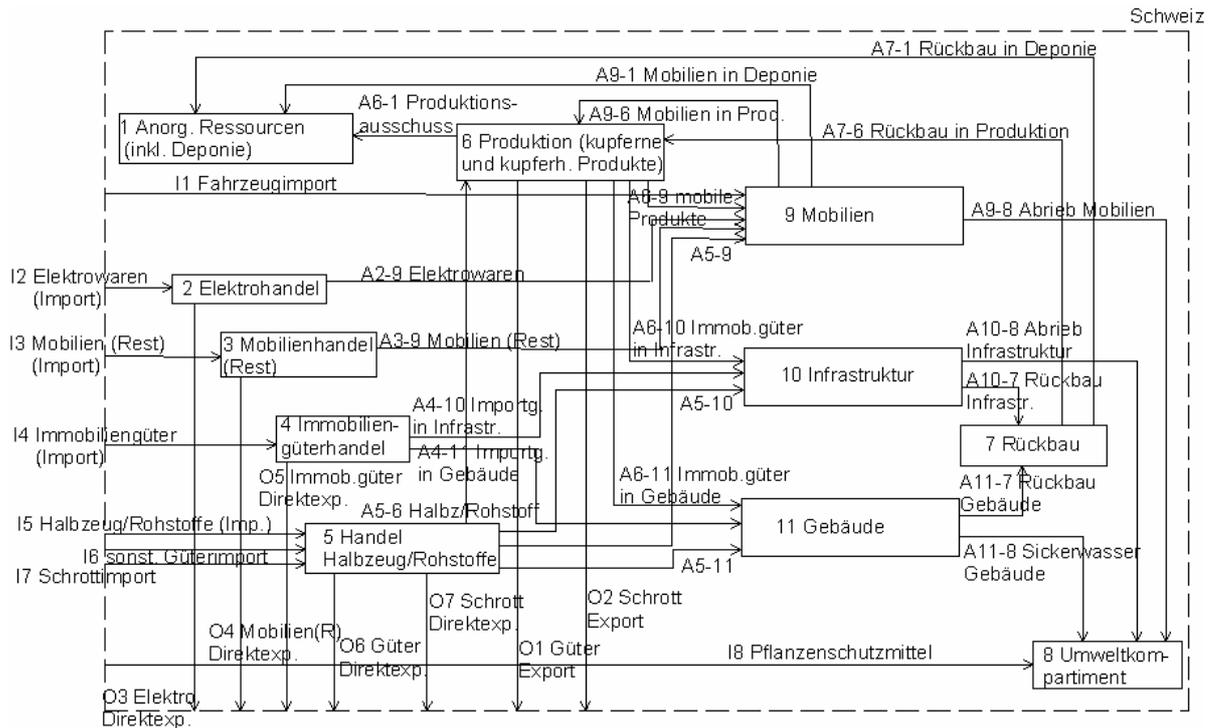


Abb. A-12: Das Kupferhaushaltssystem des dynamischen Modells *Cuprum*, beschrieben mit 11 Prozessen. Die Indizes kennzeichnen die Flüsse als Input-Flüsse (I), Output-Flüsse (O) und systeminterne Flüsse (A). Die systeminternen Flüsse sind durch den Herkunfts- und den Zielprozess zusätzlich mit Zahlen indiziert.

A.4.2 Systemvariablen und Unbekannte

Bezeichnung der Lager und Flüsse:

- Lager werden mit M bezeichnet, Lageränderungen mit \dot{M} , und tragen als Index die Prozessnummer.
- Die Inputflüsse werden mit I bezeichnet (der Index ist im System von oben nach unten durchnummeriert).
- Die Outputflüsse werden mit O bezeichnet.
- Innere Flüsse werden mit A bezeichnet und tragen als Index die Herkunfts- und Zielprozessnummer.

SYSTEMVARIABLEN

Programmierung der Variablen

Der erweiterte Satz von 58 Variablen wird zur Programmierung durchnummeriert.

Typ		Variablenbezeichnung	Variablennummer
Lager	(11)	$M_1(t), \dots, M_{11}(t)$	$X_1(t), \dots, X_{11}(t)$
Lageränderungsraten	(11)	$\dot{M}_1(t), \dots, \dot{M}_{11}(t)$	$X_{12}(t), \dots, X_{22}(t)$
Flüsse	innere Flüsse	(21) $A_{2-9}(t), \dots, A_{11-8}(t)$	$X_{23}(t), \dots, X_{43}(t)$
	Inputflüsse	(8) $I_1(t), \dots, I_8(t)$	$X_{44}(t), \dots, X_{51}(t)$
	Outputflüsse	(7) $O_1(t), \dots, O_7(t)$	$X_{52}(t), \dots, X_{58}(t)$

Die Systemvariablen bestehen aus folgendem Satz an Funktionsvariablen $\{X_1, \dots, X_{58}\}$. Die formalisierte Nummerierung der Variablen (X_i) dient der Umsetzung bei der Programmierung (SIMBOX).

Lager	(11)
$X_1 = M_1 = M_1(t)$	Anorganische Ressourcen (inklusive Deponie)
$X_2 = M_2 = M_2(t)$	Elektrohandel
$X_3 = M_3 = M_3(t)$	Mobilienhandel(Rest)
$X_4 = M_4 = M_4(t)$	Immobilienhandel
$X_5 = M_5 = M_5(t)$	Handel Halbzeug/Rohstoffe
$X_6 = M_6 = M_6(t)$	Produktion (kupferne und kupferhaltige Produkte)
$X_7 = M_7 = M_7(t)$	Rückbau (Immobilien)
$X_8 = M_8 = M_8(t)$	Umweltkompartimente (Boden/Gewässer)
$X_9 = M_9 = M_9(t)$	Mobiliennutzung
$X_{10} = M_{10} = M_{10}(t)$	Infrastruktur: Erstellung und Betrieb
$X_{11} = M_{11} = M_{11}(t)$	Gebäude: Erstellung und Betrieb

Lagerveränderungen ²⁰	(11)
$X_{12} = \dot{M}_1 = \dot{M}_1(t)$	Anorganische Ressourcen (inklusive Deponie)
$X_{13} = \dot{M}_2 = \dot{M}_2(t)$	Elektrohandel
$X_{14} = \dot{M}_3 = \dot{M}_3(t)$	Mobilienhandel(Rest)
$X_{15} = \dot{M}_4 = \dot{M}_4(t)$	Immobilienhandel
$X_{16} = \dot{M}_5 = \dot{M}_5(t)$	Handel Halbzeug/Rohstoffe
$X_{17} = \dot{M}_6 = \dot{M}_6(t)$	Produktion (kupferne und kupferhaltige Produkte)
$X_{18} = \dot{M}_7 = \dot{M}_7(t)$	Rückbau (Immobilien)
$X_{19} = \dot{M}_8 = \dot{M}_8(t)$	Umweltkompartimente (Boden/Gewässer)
$X_{20} = \dot{M}_9 = \dot{M}_9(t)$	Mobiliennutzung
$X_{21} = \dot{M}_{10} = \dot{M}_{10}(t)$	Infrastruktur: Erstellung und Betrieb
$X_{22} = \dot{M}_{11} = \dot{M}_{11}(t)$	Gebäude: Erstellung und Betrieb

²⁰ Die Lagerveränderungen $\dot{M}_i(t)$ folgen mathematisch direkt aus den Lagerfunktionen $M_i(t)$. Sie werden hier trotzdem als Variablen geführt, um ihr Verhalten besser beurteilen zu können. Der Satz Variablen $X = \{X_1, \dots, X_{58}\}$ ist durch diese Erweiterung nicht mehr unabhängig.

Flüsse**(36)**

innere Flüsse:

$X_{23} = A_{6-1} = A_{6-1}(t)$	Ausschuss aus der Produktion
$X_{24} = A_{9-1} = A_{9-1}(t)$	Kupfer aus Mobilien in Deponie
$X_{25} = A_{7-1} = A_{7-1}(t)$	Kupfer aus Rückbau in Deponie
$X_{26} = A_{9-6} = A_{9-6}(t)$	Kupfer aus Mobilien in Produktion
$X_{27} = A_{7-6} = A_{7-6}(t)$	Kupfer aus Rückbau in Produktion
$X_{28} = A_{6-9} = A_{6-9}(t)$	Mobilien aus der Produktion in die Nutzung
$X_{29} = A_{6-10} = A_{6-10}(t)$	Immobilien Güter aus der Produktion in die Infrastruktur
$X_{30} = A_{2-9} = A_{2-9}(t)$	Elektrowaren in die Nutzung
$X_{31} = A_{3-9} = A_{3-9}(t)$	Mobilien(Rest) in die Nutzung
$X_{32} = A_{5-9} = A_{5-9}(t)$	Halbzeug/Rohstoff in Mobilien ²¹
$X_{33} = A_{9-8} = A_{9-8}(t)$	Abrieb aus Mobilien in Umweltkompartimente
$X_{34} = A_{4-10} = A_{4-10}(t)$	importierte Immobilien Güter in Infrastruktur
$X_{35} = A_{5-10} = A_{5-10}(t)$	Halbzeug/Rohstoff in Infrastruktur ²¹
$X_{36} = A_{10-7} = A_{10-7}(t)$	rückgebautes Kupfer aus Infrastruktur
$X_{37} = A_{10-8} = A_{10-8}(t)$	Abrieb und Korrosion aus Infrastruktur
$X_{38} = A_{4-11} = A_{4-11}(t)$	importierte Immobilien Güter in die Gebäude
$X_{39} = A_{5-11} = A_{5-11}(t)$	Halbzeug/Rohstoff in Gebäude ²¹
$X_{40} = A_{11-7} = A_{11-7}(t)$	rückgebautes Kupfer aus Gebäuden
$X_{41} = A_{11-8} = A_{11-8}(t)$	Abrieb und Korrosion aus Gebäuden
$X_{42} = A_{6-11} = A_{6-11}(t)$	Immobilien Güter aus der Produktion in die Gebäude
$X_{43} = A_{5-6} = A_{5-6}(t)$	Halbzeug/Rohstoff in Produktion bzw. Verarbeitung

Inputflüsse:

$X_{44} = I_1 = I_1(t)$	Import Fahrzeuge
$X_{45} = I_2 = I_2(t)$	Import Elektrowaren (ohne Kabel, Drähte)
$X_{46} = I_3 = I_3(t)$	Import Mobilien(Rest) (siehe Tab. 3.26)
$X_{47} = I_4 = I_4(t)$	Import Immobilien Güter (Kabel, Drähte, Rohre)
$X_{48} = I_5 = I_5(t)$	Import Halbzeug/Rohstoff (inkl. Bleche und Bänder)
$X_{49} = I_6 = I_6(t)$	Import sonstiger Güter (Direktexport) ²
$X_{50} = I_7 = I_7(t)$	Import Kupferschrott
$X_{51} = I_8 = I_8(t)$	Import Pflanzenschutzmittel

Outputflüsse:

$X_{52} = O_1 = O_1(t)$	Export Güter
$X_{53} = O_2 = O_2(t)$	Export Kupferschrott (Recyclingkupfer aus Produktion und „Nutzung“)
$X_{54} = O_3 = O_3(t)$	Direktexport Elektrowaren
$X_{55} = O_4 = O_4(t)$	Direktexport Mobilien(Rest)
$X_{56} = O_5 = O_5(t)$	Direktexport Immobilien Güter
$X_{57} = O_6 = O_6(t)$	Direktexport Güter
$X_{58} = O_7 = O_7(t)$	Direktexport Kupferschrott

²¹ Diese Flüsse sind im gewählten Modellansatz gleich null gesetzt.

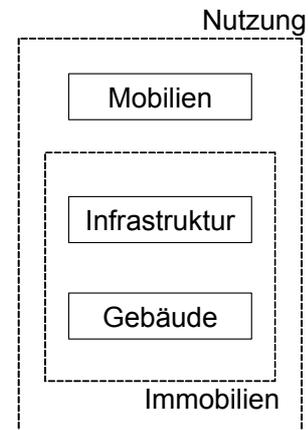
VARIABLEN ZU DEN SUBPROZESSEN²²

$X_{63} = M_F(t)$	Lager der Fahrzeuge
$X_{64} = \dot{M}_F(t)$	Lagerveränderung der Fahrzeuge
$X_{65} = A_{F-6}(t) + A_{F-1}(t) + A_{F-8}(t)$	Output aus Lager Fahrzeuge
$X_{66} = M_{HT}(t)$	Lager der Haustechnik
$X_{67} = \dot{M}_{HT}(t)$	Lagerveränderung der Haustechnik
$X_{68} = A_{HT-7}(t) + A_{HT-8}(t)$	Output aus Lager Haustechnik
$X_{69} = M_{DA}(t)$	Lager des Daches
$X_{70} = \dot{M}_{DA}(t)$	Lagerveränderung des Daches
$X_{71} = A_{DA-7}(t) + A_{DA-8}(t)$	Output aus Lager Dach

HILFSVARIABLEN

Die Hilfsvariablen dienen der Prüfung aggregierter Lagerbetrachtung der Mobilien, der Infrastruktur und der Gebäude bzw. deren Änderungen und In- und Output. Die Aggregationsstufen sind in der nebenstehenden Skizze veranschaulicht.

$X_{59} = \sum_{i=4}^6 A_{i-10}$	Gesamtinput in Infrastruktur
$X_{60} = \sum_{i=4}^6 A_{i-11}$	Gesamtinput in Gebäude
$X_{61} = I_1 + \sum_{i=2}^3 A_{i-9} + \sum_{i=5}^6 A_{i-9}$	Gesamtinput in Mobilien
$X_{62} = A_{9-6} + A_{9-1}$	Output aus Mobilien (ohne Abrieb)
$X_{66} = \sum_{i=7}^8 A_{10-i}$	Gesamtoutput aus Infrastruktur
$X_{67} = \sum_{i=7}^8 A_{11-i}$	Gesamtoutput aus Gebäude
$X_{68} = A_{9-1} + A_{9-6} + A_{9-8}$	Gesamtoutput aus Mobilien
$X_{69} = O_2 + O_7$	Gesamtexport Schrott
$X_{70} = O_1 + O_6$	Gesamtexport Güter (ohne Direktexporte)
$X_{71} = \frac{d}{dt}(M_{10} + M_{11})$	Lagerveränderung „Immobilien“ (Infr.+Geb.)
$X_{72} = M_{10} + M_{11}$	Lager „Immobilien“ (Infr.+Geb.)
$X_{73} = \sum_{i=4}^6 (A_{i-10} + A_{i-11})$	Input „Immobilien“ (Infr.+Geb.)
$X_{74} = \sum_{i=7}^8 (A_{10-i} + A_{11-i})$	Output „Immobilien“ (Infr.+Geb.)
$X_{75} = \frac{d}{dt}(M_9 + M_{10} + M_{11})$	Lagerveränderung „Nutzung“ (Mob.+Infr.+Geb.)
$X_{76} = M_9 + M_{10} + M_{11}$	Lager „Nutzung“ (Mob.+Infr.+Geb.)
$X_{77} = I_1 + \sum_{i=2}^3 A_{i-9} + \sum_{i=5}^6 A_{i-9} + \sum_{i=4}^6 (A_{i-10} + A_{i-11})$	Input „Nutzung“ (Mob.+Infr.+Geb.)
$X_{78} = A_{9-8} + A_{9-6} + A_{9-1} + \sum_{i=7}^8 (A_{10-i} + A_{11-i})$	Output „Nutzung“ (Mob.+Infr.+Geb.)
$X_{79} = O_7 + O_2 = O_7(t) + O_2(t)$	Direktexport und Export Kupferschrott
$X_{80} = O_1 + O_3 + O_4 + O_5 = O_1(t) + O_3(t) + O_4(t) + O_5(t)$	Direktexport und Export Güter
$X_{81} = I_2 + I_3 = I_2(t) + I_3(t)$	Import „Mobilien“ (Elektrowaren und Rest)
$X_{82} = I_4 + I_5 = I_4(t) + I_5(t)$	Import Immobiliengüter und Halbzeug/Rohstoff



²² Subprozesse dienen der Erweiterung des Ausgangssystems und werden durch Unterteilung der Prozesse „Gebäude“ und „Mobilien“ erhalten.

$X_{83} = M_{HT} = M_{HT}(t)$	Lager im Bauelement „Haustechnik“
$X_{87} = M_{DA} = M_{DA}(t)$	Lager im Bauelement „Dach“
$X_{91}, X_{92}, X_{94}, X_{95}, X_{96}, X_{98}, X_{99}$	diverse Bewertungskriterien (siehe Kap. A.4.5)

A.4.3 Modellparameter

Im Modell *Cuprum* werden 45 Parameterfunktionen genutzt (Tab. A-38).

Tab. A-38: Liste der Parameterfunktionen des Modells *Cuprum*: Parameterfunktionsnummer (Par.Nr.), Bezeichnung, Kurzbeschreibung und physikalische Einheit. Die Transferfunktionen sind durch die Lebensdauerverteilung und deren Unsicherheit (Pf_{40} – Pf_{51}) eindeutig bestimmt. Bei den mit ° bezeichneten Parameterfunktionen bezieht sich der Transfer lediglich auf einen Teil des Prozessinputs bzw. beschreibt er nur den Anteil an einer Teilmenge.

Par.Nr.	Bezeichnung der Parameterfunktion		Einheit
Pf ₁	Transferfunktion <i>Infrastruktur</i>	$k_I(t,t')$	[%·a ⁻¹]
Pf ₂	Kupfersubstitution/Abbruch <i>Infrastruktur</i>	$O_{I/Substitution}(t)$	[kg·cap. ⁻¹ ·a ⁻¹]
Pf ₃	Abriebkoeffizient (pro a) von gesamtem Lager <i>Infrastruktur</i>	$a_I(t)$	[a ⁻¹]
Pf ₄	vorgegebenes Lager <i>Infrastruktur</i> (doppeltlogistisch)	$M_I(t)$	[kg·E ⁻¹]
Pf ₅	Transferfunktion <i>Gebäude</i>	$k_G(t,t')$	[%·a ⁻¹]
Pf ₆	Kupfersubstitution/Abbruch <i>Gebäude</i>	$O_{G/Substitution}(t)$	[kg·cap. ⁻¹ ·a ⁻¹]
Pf ₇	Abriebkoeffizient (pro Jahr) von gesamtem Lager <i>Gebäude</i>	$a_G(t)$	[a ⁻¹]
Pf ₈	vorgegebenes Lager <i>Gebäude</i> (linearlogistisch)	$M_G(t)$	[kg·cap. ⁻¹]
Pf ₉	Transferfunktion <i>Mobilien</i>	$k_M(t,t')$	[%·a ⁻¹]
Pf ₁₀	Abriebkoeffizient (pro Jahr) von gesamtem Lager <i>Mobilien</i>	$a_M(t)$	[a ⁻¹]
Pf ₁₁	Anteil der Mobilien in Deponie	$o_{9-1}^{\circ}(t)$	[%]
Pf ₁₂	vorgegebenes Lager <i>Mobilien</i> (linearlogistisch)	$M_M(t)$	[kg·cap. ⁻¹]
Pf ₁₃	Kupfereinsatz in Pflanzenschutzmitteln	$I_{Landw.}(t)$	[kg·cap. ⁻¹ ·a ⁻¹]
Pf ₁₄	Transferkoeffizient Rückbau–Produktion	$k_{7-6}(t)$	[%]
Pf ₁₅	Anteil Import-Schrott in Deponie (Schlacke)	$k_{ImpSchrott-Deponie}^{\circ}(t)$	[%]
Pf ₁₆	Transferkoeffizient Materialherstellung–Export-Schrott	$k_{6-0}(t)$	[%]
Pf ₁₇	Anteil Immobilien-Schrott in Schlacke	$k_{ImmSchrott-Deponie}^{\circ}(t)$	[%]
Pf ₁₈	Transferkoeffizient Elektro-Export	$k_{2-0}(t)$	[%]
Pf ₁₉	Transferkoeffizient Mobilien(Rest)-Export	$k_{3-0}(t)$	[%]
Pf ₂₀	Transferkoeffizient Immobilien-Export	$k_{4-0}(t)$	[%]
Pf ₂₁	Anteil des Direktimports am Infrastruktur-Input	$i_{4-10}(t)$	[%]
Pf ₂₂	Anteil aus Halbzeughandel am Mobilien-Input	$i_{5-9}(t)$	[%]
Pf ₂₃	Anteil des Direktimports am Gebäude-Input	$i_{4-11}(t)$	[%]
Pf ₂₄	Anteil aus Halbzeughandel am Gebäude-Input	$i_{5-11}(t)$	[%]
Pf ₂₅	Anteil aus Halbzeughandel am Infrastruktur-Input	$i_{5-10}(t)$	[%]
Pf ₂₆	vorgegebenes Kupferlager in <i>Fahrzeugen</i>	$M_A(t)$	[kg·cap. ⁻¹]
Pf ₂₇	Anteil des Direktimports Mobilien(Rest) am Mobilien-Input	$i_{3-9}(t)$	[%]
Pf ₂₈	Anteil des Direktimports Elektrowaren am Mobilien-Input	$i_{2-9}(t)$	[%]
Pf ₂₉	Direktexport Güter	$O_{Güter(Direkt)}(t)$	[kg·cap. ⁻¹ ·a ⁻¹]

Par.Nr.	Bezeichnung der Parameterfunktion		Einheit
Pf ₃₀	Direktimport Schrotte	$I_{\text{Schrotte}}(t)$	$[\text{kg} \cdot \text{cap.}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}]$
Pf ₃₁	vorgegebener Güterexport (ohne Direktexport)	$O_{\text{Güter(ohne Direkt)}}(t)$	$[\text{kg} \cdot \text{cap.}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}]$
Pf ₃₂	Transferfunktion <i>Fahrzeuge</i>	$k_F(t, t')$	$[\% \cdot \text{a}^{-1}]$
Pf ₃₃	Transferkoeffizient Schrott-Direktexport	$k_{5-0}(t)$	$[\%]$
Pf ₃₄	vorgegebenes Lager <i>Haustechnik</i> (linearlogistisch)	$M_{\text{HT}}(t)$	$[\text{kg} \cdot \text{cap.}^{-1}]$
Pf ₃₅	Transferfunktion <i>Haustechnik</i>	$k_{\text{HT}}(t, t')$	$[\% \cdot \text{a}^{-1}]$
Pf ₃₆	Kupfersubstitution/Abbruch <i>Haustechnik</i>	$O_{\text{HT/ Substitution}}(t)$	$[\text{kg} \cdot \text{cap.}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}]$
Pf ₃₇	vorgegebenes Lager <i>Dach</i> (linearlogistisch)	$M_{\text{DA}}(t)$	$[\text{kg} \cdot \text{cap.}^{-1}]$
Pf ₃₈	Transferfunktion <i>Dach</i>	$k_{\text{DA}}(t, t')$	$[\%/\text{a}]$
Pf ₃₉	Kupfersubstitution/Abbruch <i>Dach</i>	$O_{\text{DA/ Substitution}}(t)$	$[\text{kg} \cdot \text{cap.}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}]$
Pf ₄₀	Lebensdauerverteilung <i>Infrastruktur</i>	$\tau_I(t)$	$[\text{a}]$
Pf ₄₁	Unsicherheit der Lebensdauerverteilung <i>Infrastruktur</i>	$\sigma_I(t)$	$[\text{a}]$
Pf ₄₂	Lebensdauerverteilung <i>Gebäude</i>	$\tau_G(t)$	$[\text{a}]$
Pf ₄₃	Unsicherheit der Lebensdauerverteilung <i>Gebäude</i>	$\sigma_G(t)$	$[\text{a}]$
Pf ₄₄	Lebensdauerverteilung <i>Mobilien</i>	$\tau_M(t)$	$[\text{a}]$
Pf ₄₅	Unsicherheit der Lebensdauerverteilung <i>Mobilien</i>	$\sigma_M(t)$	$[\text{a}]$
Pf ₄₆	Lebensdauerverteilung <i>Fahrzeuge</i>	$\tau_F(t)$	$[\text{a}]$
Pf ₄₇	Unsicherheit der Lebensdauerverteilung <i>Fahrzeuge</i>	$\sigma_F(t)$	$[\text{a}]$
Pf ₄₈	Lebensdauerverteilung <i>Haustechnik</i>	$\tau_{\text{HT}}(t)$	$[\text{a}]$
Pf ₄₉	Unsicherheit der Lebensdauerverteilung <i>Haustechnik</i>	$\sigma_{\text{HT}}(t)$	$[\text{a}]$
Pf ₅₀	Lebensdauerverteilung <i>Dach</i>	$\tau_{\text{DA}}(t)$	$[\text{a}]$
Pf ₅₁	Unsicherheit der Lebensdauerverteilung <i>Dach</i>	$\sigma_{\text{DA}}(t)$	$[\text{a}]$

Parameterfunktionen, die während des Untersuchungszeitraumes konstant sind, werden durch einen Wert und seine Unsicherheit bestimmt. Zum Abbilden des zeitlichen Verlaufs werden die Wachstumsfunktionen der Lager durch jeweils vier bis acht Parameter, die Transferfunktionen durch jeweils zwei Parameter beschrieben („parametrisiert“)(hier: Parameter ist ein zeitunabhängiger Wert im Gegensatz zur Parameterfunktion, die i.Allg. zeitabhängig ist). Insgesamt werden damit 70 zeitunabhängige Parameter eingesetzt (Tab. A-39).

Tab. A-39: Liste der Parameterfunktionen (Parameterfunktionsnummer und Bezeichnung) und der sie bzw. ihren zeitlichen Verlauf beschreibenden Parameter $p_{i,j}$ (Parametrisierung der Parameterfunktionen). Für die zeitabhängigen Werte und die Ungenauigkeiten sind die Werte des Stichjahrs 2000 angegeben (kursiv). Grau hinterlegt sind die Parameter zur Beschreibung des Verlaufs der Wachstumsfunktionen (Lagerfunktionen). Für die Wachstumsfunktionen sind die aus den Messpunkten ermittelten Kurvenparameter exakt angegeben (unterstrichen).

Parameterfunktion		$p_{i,j}$	Parameter [Einheit]	Wert	Ungenauigkeit
Pf ₁	Transferfunktion <i>Infrastruktur</i>	$p_{1,1}$	Verweilzeit τ [a]	40	10
		$p_{1,2}$	Breite σ [a]	20	5
Pf ₂	Kupfersubstitution/Abbruch <i>Infrastruktur</i>	$p_{2,1}$	Kupfersubstitution [kg·cap. ⁻¹ ·a ⁻¹]	0	0
Pf ₃	Abriebkoeffizient (pro a) von gesamtem Lager <i>Infrastruktur</i>	$p_{3,1}$	Anteil Abrieb [a ⁻¹]	5.90E-05	5.90E-05
Pf ₄	vorgegebenes Lager <i>Infrastruktur</i> (doppeltlogistisch)	$p_{4,1}$	Startwert bei $t = -\infty$ [kg·cap. ⁻¹]	<u>-3.39445</u>	0
		$p_{4,2}$	Sättigungswert [kg·cap. ⁻¹]	120	10
		$p_{4,3}$	Startzeit Aufbau [Jahr]	1900	0
		$p_{4,4}$	Startwert Aufbau [kg·cap. ⁻¹]	2	0.2
		$p_{4,5}$	reziproke Aufbauzeit 1	<u>0.177766</u>	0.018
		$p_{4,6}$	Wendepunkt τ_1 [Jahr]	<u>1910.979</u>	3
		$p_{4,7}$	reziproke Aufbauzeit 2	<u>0.065128</u>	0.0065
		$p_{4,8}$	Wendepunkt τ_2 [Jahr]	<u>1969.469</u>	3
Pf ₅	Transferfunktion <i>Gebäude</i>	$p_{5,1}$	Verweilzeit τ [a]	40	10
		$p_{5,2}$	Breite σ [a]	20	5
Pf ₆	Kupfersubstitution/Abbruch <i>Gebäude</i>	$p_{6,1}$	Kupfersubstitution [kg·cap. ⁻¹ ·a ⁻¹]	0	0
Pf ₇	Abriebkoeffizient (pro a) von gesamtem Lager <i>Gebäude</i>	$p_{7,1}$	Anteil Abrieb [a ⁻¹]	2.50E-04	1.25E-04
Pf ₈	vorgegebenes Lager <i>Gebäude</i> (linearlogistisch)	$p_{8,1}$	Sättigungswert [kg·cap. ⁻¹]	111	0
		$p_{8,2}$	reziproke Aufbauzeit	<u>0.057898</u>	0
		$p_{8,3}$	Wendepunkt τ [Jahr]	<u>1989.161</u>	0
		$p_{8,4}$	Startzeit Aufbau [Jahr]	<u>1869.351</u>	0
		$p_{8,5}$	Übergangspunkt T* [Jahr]	<u>1943.631</u>	0
Pf ₉	Transferfunktion <i>Mobilien</i>	$p_{9,1}$	Verweilzeit τ [a]	14	2
		$p_{9,2}$	Breite σ [a]	7	1
Pf ₁₀	Abriebkoeffizient (pro a) von gesamtem Lager <i>Mobilien</i>	$p_{10,1}$	Anteil Abrieb [a ⁻¹]	1.00E-04	0.50E-04
Pf ₁₁	Anteil der Mobilien in Deponie ²³	$p_{11,1}$	k_{9-1}	0.60	0

²³ Bezugsgrösse ist nicht der gesamte Mobilienoutput, sondern nur die Summe aus $A_{9,6}$ und $A_{9,1}$.

Parameterfunktion		$p_{i,j}$	Parameter [Einheit]	Wert	Ungenauigkeit
Pf ₁₂	vorgegebenes Lager <i>Mobilien</i> (linearlogistisch)	$p_{12,1}$	Sättigungswert [kg·cap. ⁻¹]	50	5
		$p_{12,2}$	reziproke Aufbauzeit	<u>0.058361</u>	0.0058
		$p_{12,3}$	Wendepunkt τ [Jahr]	<u>1989.08</u>	3
		$p_{12,4}$	Startzeit Aufbau [Jahr]	<u>1856.262</u>	20
		$p_{12,5}$	Übergangspunkt T^* [Jahr]	<u>1930.155</u>	0
Pf ₁₃	Kupfereinsatz in Pflanzenschutzmitteln	$p_{13,1}$	[kg·cap. ⁻¹ ·a ⁻¹]	0.07	0.02
Pf ₁₄	Transferkoeffizient Rückbau–Produktion	$p_{14,1}$	k_{7-6}	0.90	0.05
Pf ₁₅	Anteil Import-Schrott in Deponie (Schlacke)	$p_{15,1}$		0.005	0.005
Pf ₁₆	Transferkoeffizient Produktion–Export-Schrott	$p_{16,1}$		0.40	0.1
Pf ₁₇	Anteil Immobilien-Schrott in Schlacke	$p_{17,1}$		0.005	0.005
Pf ₁₈	Transferkoeffizient Elektro-Direktexport	$p_{18,1}$	k_{2-0}	0.05	0.1
Pf ₁₉	Transferkoeffizient Mobilien(Rest)-Direktexport	$p_{19,1}$	k_{3-0}	0.05	0.1
Pf ₂₀	Transferkoeffizient Immobilien-Direktexport	$p_{20,1}$	k_{4-0}	0.35	0.02
Pf ₂₁	Anteil des Direktimports am Infrastruktur-Input	$p_{21,1}$		0.30	0
Pf ₂₂	Anteil aus Halbzeughandel am Mobilien-Input	$p_{22,1}$		0	0
Pf ₂₃	Anteil des Direktimports am Gebäude-Input	$p_{23,1}$		0.70	0
Pf ₂₄	Anteil aus Halbzeughandel am Gebäude-Input	$p_{24,1}$		0	0
Pf ₂₅	Anteil aus Halbzeughandel am Infrastruktur-Input	$p_{25,1}$		0	0
Pf ₂₆	vorgegebenes Kupferlager in <i>Fahrzeugen</i>	$p_{26,1}$	Startwert bei $t = -\infty$ [kg·cap. ⁻¹]	<u>-0.006524</u>	0
		$p_{26,2}$	Sättigungswert [kg·cap. ⁻¹]	6.5	0.65
		$p_{26,3}$	reziproke Aufbauzeit	<u>0.088848</u>	0.0089
		$p_{26,4}$	Wendepunkt τ [Jahr]	<u>1977.7</u>	3
Pf ₂₇	Anteil des Direktimports Mobilien(Rest) am Mobilien-Input	$p_{27,1}$		0.30	0
Pf ₂₈	Anteil des Direktimports Elektrowaren am Mobilien-Input	$p_{28,1}$		0.55	0
Pf ₂₉	Direktexport Güter	$p_{29,1}$	[kg·cap. ⁻¹ ·a ⁻¹]	0	0
Pf ₃₀	Direktimport Schrotte	$p_{30,1}$	[kg·cap. ⁻¹ ·a ⁻¹]	1.82	0
Pf ₃₁	vorgegebener Güterexport (ohne Direktexporte)	$p_{31,1}$	[kg·cap. ⁻¹ ·a ⁻¹]	7.60	0
Pf ₃₂	Transferfunktion <i>Fahrzeuge</i>	$p_{32,1}$	Verweilzeit τ [a]	10	0
		$p_{32,2}$	Breite σ [a]	5	0
Pf ₃₃	Transferkoeff. Schrott-Direktexport	$p_{33,1}$		0.70	0

Parameterfunktion		$p_{i,j}$	Parameter [Einheit]	Wert	Ungenauigkeit
Pf ₃₄	vorgegebenes Lager <i>Haustechnik</i> (linearlogistisch)	$p_{34,1}$	Sättigungswert [kg·cap. ⁻¹]	59	6
		$p_{34,2}$	reziproke Aufbauzeit	<u>0.069073</u>	0.0069
		$p_{34,3}$	Wendepunkt τ [Jahr]	<u>1981.673</u>	3
		$p_{34,4}$	Startzeit Aufbau [Jahr]	<u>1840.554</u>	20
		$p_{34,5}$	Übergangspunkt T* [Jahr]	<u>1912.176</u>	0
Pf ₃₅	Transferfunktion <i>Haustechnik</i>	$p_{35,1}$	Verweilzeit τ [a]	40	10
			Breite σ [a]	20	5
Pf ₃₆	Kupfersubstitution/Abbruch <i>Haustechnik</i>	$p_{36,1}$	Kupfersubstitution [kg·cap. ⁻¹ ·a ⁻¹]	0	0
Pf ₃₇	vorgegebenes Lager <i>Dach</i> (linearlogistisch)	$p_{37,1}$	Sättigungswert [kg·cap. ⁻¹]	52	5
		$p_{37,2}$	reziproke Aufbauzeit	<u>0.057425</u>	0.0057
		$p_{37,3}$	Wendepunkt τ [Jahr]	<u>2008.417</u>	3
		$p_{37,4}$	Startzeit Aufbau [Jahr]	<u>1857.59</u>	20
		$p_{37,5}$	Übergangspunkt T* [Jahr]	1975	0
Pf ₃₈	Transferfunktion <i>Dach</i>	$p_{38,1}$	Verweilzeit τ [a]	40	10
			Breite σ [a]	20	5
Pf ₃₉	Kupfersubstitution/Abbruch <i>Dach</i>	$p_{39,1}$	Kupfersubstitution [kg·cap. ⁻¹ ·a ⁻¹]	0	0
Pf ₄₀	Lebensdauervertlg. <i>Infrastruktur</i>	$p_{40,1}$	Verweilzeit τ [a]	40	10
Pf ₄₁	Unsicherheit der Lebensdauervertlg. <i>Infrastruktur</i>	$p_{41,1}$	Breite σ [a]	20	5
Pf ₄₂	Lebensdauervertlg. <i>Gebäude</i>	$p_{42,1}$	Verweilzeit τ [a]	40	10
Pf ₄₃	Unsicherheit der Lebensdauervertlg. <i>Gebäude</i>	$p_{43,1}$	Breite σ [a]	20	5
Pf ₄₄	Lebensdauervertlg. <i>Mobilien</i>	$p_{44,1}$	Verweilzeit τ [a]	14	2
Pf ₄₅	Unsicherheit der Lebensdauervertlg. <i>Mobilien</i>	$p_{45,1}$	Breite σ [a]	7	1
Pf ₄₆	Lebensdauervertlg. <i>Fahrzeuge</i>	$p_{46,1}$	Verweilzeit τ [a]	10	0
Pf ₄₇	Unsicherheit der Lebensdauervertlg. <i>Fahrzeuge</i>	$p_{47,1}$	Breite σ [a]	5	0
Pf ₄₈	Lebensdauervertlg. <i>Haustechnik</i>	$p_{48,1}$	Verweilzeit τ [a]	40	10
Pf ₄₉	Unsicherheit der Lebensdauervertlg. <i>Haustechnik</i>	$p_{49,1}$	Breite σ [a]	20	5
Pf ₅₀	Lebensdauervertlg. <i>Dach</i>	$p_{50,1}$	Verweilzeit τ [a]	40	10
Pf ₅₁	Unsicherheit der Lebensdauervertlg. <i>Dach</i>	$p_{51,1}$	Breite σ [a]	20	5

Der Verlauf der Parameterfunktionen wird durch Stützpunkte bestimmt. Der Abstand der Stützpunkte beträgt im Zeitraum 1900–2000 zehn Jahre; für die anschliessende Prognose beträgt der Abstand 25 Jahre (Tab. A-40).

Tab. A-40: Stützpunkte der zeitlich variablen Parameterfunktionen des Modells *Cuprum* (ausschliesslich der Wachstumsfunktionen). Die Parameterfunktionen, die Flüsse beschreiben, sind grau markiert.

Zeit	Pf ₁₁	Pf ₁₃	Pf ₁₄	Pf ₁₆	Pf ₂₀	Pf ₂₁	Pf ₂₃	Pf ₂₇	Pf ₂₈	Pf ₃₀	Pf ₃₁	Pf ₃₃
1839	0.50		0.95	0.05	0.05	0.15	0.02	0.70	0.00		0.20	0.05
1900	0.50		0.95	0.05	0.05	0.15	0.02	0.70	0.02		0.47	0.05
1910	0.50		0.93	0.05	0.05	0.15	0.02	0.70	0.02	0.17	0.78	0.05
1920	0.50		0.91	0.05	0.05	0.15	0.10	0.70	0.04	0.34	2.11	0.05
1930	0.54		0.90	0.05	0.05	0.15	0.25	0.70	0.06	0.12	2.77	0.05
1940	0.62		0.90	0.05	0.05	0.15	0.40	0.60	0.08	0.04	1.89	0.05
1950	0.70		0.90	0.05	0.05	0.15	0.55	0.50	0.10	0.01	2.54	0.05
1960	0.70	0.03	0.90	0.05	0.05	0.20	0.60	0.40	0.30	0.23	2.62	0.05
1970	0.70	0.03	0.90	0.15	0.05	0.20	0.75	0.30	0.50	0.05	2.30	0.05
1980	0.68	0.17	0.90	0.15	0.15	0.25	0.80	0.30	0.50	0.41	5.44	0.20
1990	0.64	0.10	0.90	0.15	0.25	0.25	0.75	0.30	0.50	0.94	6.69	0.45
2000	0.60	0.07	0.90	0.40	0.35	0.30	0.70	0.30	0.55	1.82	7.60	0.70
2025	0.50	0.07	0.90	0.40	0.35	0.30	0.65	0.30	0.60	2.00	6.00	0.70
2050	0.40	0.07	0.90	0.40	0.35	0.30	0.65	0.30	0.60	2.00	6.00	0.70
2075	0.40	0.07	0.90	0.40	0.35	0.30	0.60	0.30	0.60	2.00	6.00	0.70
2101	0.40	0.07	0.90	0.40	0.35	0.30	0.60	0.30	0.60	2.00	6.00	0.70

Zur numerischen Modellierung werden diese Parameterfunktionen durch lineare Interpolation der Stützpunkte gebildet (Abb. A-13). Aufgrund der Ordinatenskala werden die Parameter, die Flüsse beschreiben, getrennt dargestellt (Abb. A-14).

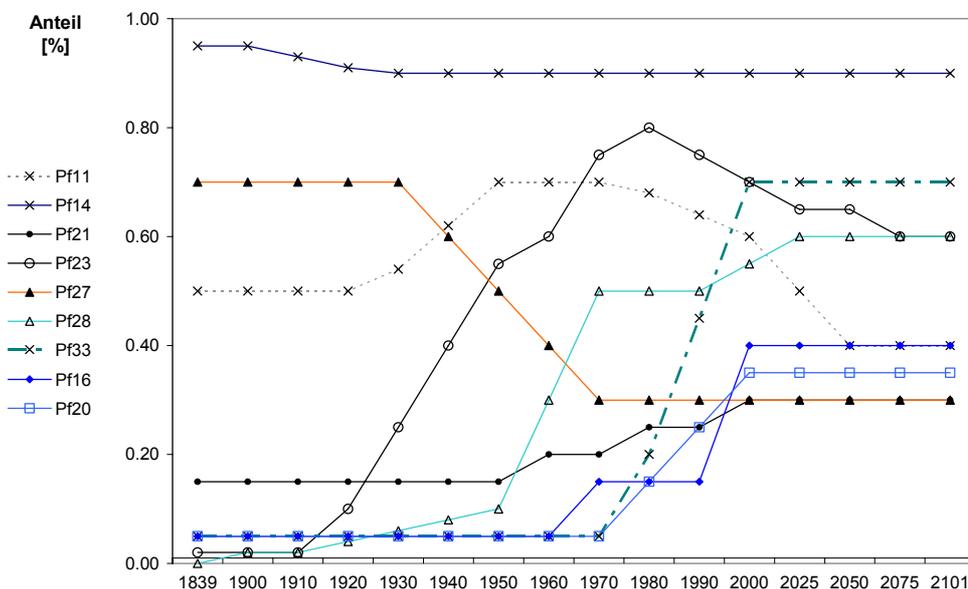


Abb. A-13: Verlauf der zeitabhängigen Parameterfunktionen im Modellzeitraum 1900 bis 2100 (ohne Wachstumsfunktionen und Flüsse). Die Symbole zeigen den Parametertyp an: „x“ bedeutet Transferkoeffizient; die anderen Symbole bedeuten „Anteil eines Flusses“.

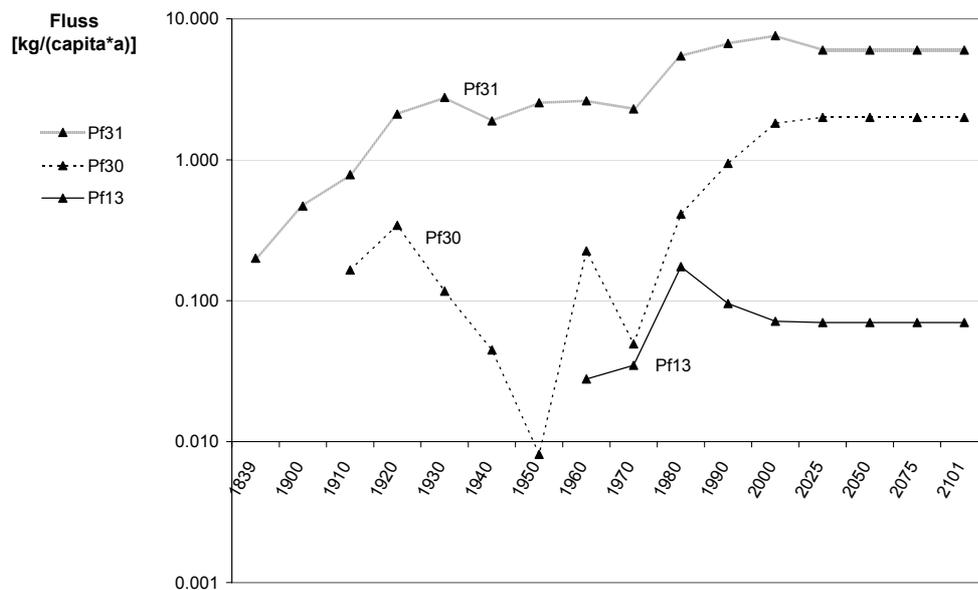


Abb. A-14: Verlauf zeitabhängiger Parameterfunktionen im Modellzeitraum 1900–2100: vorgegebene Flüsse (pro Kopf und Jahr). Darstellung auf logarithmischer Ordinaten-Skala; fehlende Parameterwerte zu Beginn des Zeitraums sind Flüsse mit Wert 0 (hier nicht darstellbar).

Ab 2000 werden die meisten Parameterfunktionen für das „Standardszenario“ konstant gehalten. Ausgenommen sind folgende fünf Parameterfunktionen:

- Technische und logistische Verbesserungen bei der Mobilienbehandlung wie die Aufbereitung von EE-Schrotten bewirken eine Verringerung des Transferkoeffizienten der Mobilien in die Deponie (Pf_{11}).
- Da der Sättigungseffekt des Kupferlagers im Dach zeitlich nach der Sättigung des Lagers in der Haustechnik eintritt, nimmt der Anteil der Bleche am Gebäude-Input zu. Dementsprechend wird eine Abnahme des Anteils des Direktimports (Pf_{23}) von 70 % auf 60 % (2075) angesetzt, bevor sich der Anteil stabilisiert.
- Der Mobilien-Input besteht aktuell ungefähr zu 55 % aus Direktimport von Elektrowaren, zu 30 % aus Direktimport von Mobilien(Rest)-Gütern und zu 15 % aus schweizerischer Produktion. Im Bereich der Elektrowaren wird infolge der weltweit zunehmenden *Outsourcing*-Praxis eine Abnahme regionseigener Produktion angesetzt, so dass der Anteil des Direktimports von Elektrowaren am Mobilien-Input (Pf_{28}) von 55 % auf 60 % (2025) ansteigt.
- Der Direktimport von Schrotten nahm seit 1980 stark zu (Pf_{30})(vgl. Tab. A-40). Aufgrund zu erwartender Sättigungseffekte im Aussenhandel erscheint ein Anstieg von 1.82 kg/(capita · a) um 10 % auf 2 kg/(capita · a) (2025) angepasst.
- Der Export von Kupfer in Gütern aus regionseigener Produktion nahm seit 1950 von 3 kg/(capita · a) auf 8 kg/(capita · a) zu (Pf_{31})(vgl. Tab. A-40). Wegen der zunehmenden globalen Konkurrenz werden ausländische Produktionsbetriebe im Vergleich zu inländischen an Bedeutung gewinnen. Die Abnahme des Güterexports wird von 8 kg/(capita · a) auf 6 kg/(capita · a) vorgegeben.

A.4.4 Systemgleichungen

Die Systemgleichungen sind mit F_i gekennzeichnet. Die Transferfunktionen der Lager sind in Kap. 5.2.3.1 erläutert.

INTRINSISCHE BEZIEHUNGEN

$$F_1: \quad M_1(t) - M_1(t_0) - \int_{t_0}^t \dot{M}_1(t') dt' = X_1(t) - X_1(t_0) - \int_{t_0}^t X_{12}(t') dt' = 0$$

$$\vdots$$

$$F_{11}: \quad M_{11}(t) - M_{11}(t_0) - \int_{t_0}^t \dot{M}_{11}(t') dt' = X_{11}(t) - X_{11}(t_0) - \int_{t_0}^t X_{22}(t') dt' = 0$$

BILANZGLEICHUNGEN

$$F_{12}: \quad \dot{M}_1(t) - A_{6-1}(t) - A_{9-1}(t) - A_{7-1}(t) = X_{12}(t) - X_{23}(t) - X_{24}(t) - X_{25}(t) = 0$$

$$F_{13}: \quad \dot{M}_2(t) - I_2(t) + A_{2-9}(t) + O_3(t) = X_{13}(t) - X_{45}(t) + X_{30}(t) + X_{54}(t) = 0$$

$$F_{14}: \quad \dot{M}_3(t) - I_3(t) + A_{3-9}(t) + O_4(t) = X_{14}(t) - X_{46}(t) + X_{31}(t) + X_{55}(t) = 0$$

$$F_{15}: \quad \dot{M}_4(t) - I_4(t) + A_{4-10}(t) + A_{4-11}(t) + O_5(t) = X_{15}(t) - X_{47}(t) + X_{34}(t) + X_{38}(t) + X_{56}(t) = 0$$

$$F_{16}: \quad \dot{M}_5(t) - I_5(t) - I_6(t) - I_7(t) + A_{5-9}(t) + A_{5-10}(t) + A_{5-11}(t) + A_{5-6}(t) + O_6(t) + O_7(t) = X_{16}(t) - X_{48}(t) - X_{49}(t) - X_{50}(t) + X_{32}(t) + X_{35}(t) + X_{39}(t) + X_{43}(t) + X_{57}(t) + X_{58}(t) = 0$$

$$F_{17}: \quad \dot{M}_6(t) - A_{9-6}(t) - A_{7-6}(t) - A_{5-6}(t) + A_{6-1}(t) + A_{6-9}(t) + A_{6-10}(t) + A_{6-11}(t) + O_1(t) + O_2(t) = X_{17}(t) - X_{26}(t) - X_{27}(t) - X_{43}(t) + X_{23}(t) + X_{28}(t) + X_{29}(t) + X_{42}(t) + X_{52}(t) + X_{53}(t) = 0$$

$$F_{18}: \quad \dot{M}_7(t) - A_{10-7}(t) - A_{11-7}(t) + A_{7-1}(t) + A_{7-6}(t) = X_{18}(t) - X_{36}(t) - X_{40}(t) + X_{25}(t) + X_{27}(t) = 0$$

$$F_{19}: \quad \dot{M}_8(t) - A_{9-8}(t) - A_{10-8}(t) - A_{11-8}(t) - I_8(t) = X_{19}(t) - X_{33}(t) - X_{37}(t) - X_{41}(t) - X_{51}(t) = 0$$

$$F_{20}: \quad \dot{M}_9(t) - A_{6-9}(t) - A_{2-9}(t) - A_{3-9}(t) - A_{5-9}(t) - I_1(t) + A_{9-1}(t) + A_{9-6}(t) + A_{9-8}(t) = X_{20}(t) - X_{28}(t) - X_{30}(t) - X_{31}(t) - X_{32}(t) - X_{44}(t) + X_{24}(t) + X_{26}(t) + X_{33}(t) = 0$$

$$F_{21}: \quad \dot{M}_{10}(t) - A_{6-10}(t) - A_{4-10}(t) - A_{5-10}(t) + A_{10-7}(t) + A_{10-8}(t) = X_{21}(t) - X_{29}(t) - X_{34}(t) - X_{35}(t) + X_{36}(t) + X_{37}(t) = 0$$

$$F_{22}: \quad \dot{M}_{11}(t) - A_{4-11}(t) - A_{5-11}(t) - A_{6-11}(t) + A_{11-7}(t) + A_{11-8}(t) = X_{22}(t) - X_{38}(t) - X_{39}(t) - X_{42}(t) + X_{40}(t) + X_{41}(t) = 0$$

MODELLSPEZIFISCHE GLEICHUNGEN

Die Parameterfunktionen $Pf_i(t)$ werden hier der Einfachheit halber mit $p_i(t)$ notiert.

Regulierung des Infrastrukturlager-Outputs

p_1, p_2

$$F_{23}: \quad A_{10-7}(t) + A_{10-8}(t) - O_{10/Renov.}(t) - O_{10/Subst.}(t) = X_{36}(t) + X_{37}(t) - O_{10/Renov.}(t) - O_{10/Subst.}(t) = 0$$

$$O_{10/Renov.}(t) = \int_{t_{10,R}(t)} k_{10}(t, t') (A_{4-10}(t') + A_{5-10}(t') + A_{6-10}(t')) dt'$$

mit $O_{10/Subst.}(t) = p_2(t)$ Kupfersubstitution/Abbruch zur Zeit t
 $k_{10}(t, t') = p_1(t)$ Transferfunktion des Infrastruktur-Inputs
 $t_{10,R}(t)$ Zeitpunkt, bis zu dem der ursprüngliche Input „aufgebraucht“ wurde
 (durch Substitution/Abbruch und Abrieb)

Abrieb aus der Infrastruktur**p₃**

$$F_{24}: A_{10-8}(t) - f_{10}(t, M_{10}(t), \dots) = X_{37}(t) - f_{10}(t, M_{10}(t), \dots) = 0$$

$$f_{10}(t, M_{10}(t), \dots) = p_3(t) \cdot M_{10}(t) \text{ bzw. } = p_3(t) \cdot F_{10}(t)$$

mit $p_3(t)$ Abriebkoeffizient pro Zeiteinheit, multipliziert mit dem Anteil des Lagers, das dem Abrieb ausgesetzt ist

$F_{10}(t)$ exponierte Fläche

Annahme alle Flüsse ≥ 0

Sicherung $A_{10-8}(t) + A_{10-7}(t) = O_{10,tot.} \geq 0$; d.h. $A_{10-8}(t) = O_{10,tot.} - A_{10-7}(t) \leq O_{10,tot.}$

Lagerveränderung der Infrastruktur**p₄**

$$F_{25}: \dot{M}_{10}(t) - \dot{p}_4(t) = X_{21}(t) - \dot{p}_4(t) = 0 \Leftrightarrow M_{10}(t) - p_4(t) = 0$$

mit $p_4(t)$ vorgegebenes Infrastrukturlager

Regulierung des Gebäudelager-Outputs**p₅, p₆**

$$F_{26}: A_{11-7}(t) + A_{11-8}(t) - O_{11/Renov.}(t) - O_{11/Subst.}(t) = X_{40}(t) + X_{41}(t) - O_{11/Renov.}(t) - O_{11/Subst.}(t) = 0$$

$$O_{11/Renov.}(t) = \int_{t_{11,R}(t)} k_{11}(t, t') (A_{4-11}(t') + A_{5-11}(t') + A_{6-11}(t')) dt'$$

mit $O_{11/Subst.}(t) = p_6(t)$ Kupfersubstitution/Abbruch zur Zeit t

mit $k_{11}(t, t') = p_5(t)$ Transferfunktion des Gebäude-Inputs

$t_{11,R}(t)$ Zeitpunkt, bis zu dem der ursprüngliche Input „aufgebraucht“ wurde (durch Substitution/Abbruch und Abrieb)

Abrieb aus den Gebäuden**p₇**

$$F_{27}: A_{11-8}(t) - f_{11}(t, M_{11}(t), \dots) = X_{41}(t) - f_{11}(t, M_{11}(t), \dots) = 0$$

$$f_{11}(t, M_{11}(t), \dots) = p_7(t) \cdot M_{11}(t) \text{ bzw. } = p_7(t) \cdot F_{11}(t)$$

mit $p_7(t)$ Abriebkoeffizient pro Zeiteinheit, multipliziert mit dem Anteil des Lagers, das dem Abrieb ausgesetzt ist

$F_{11}(t)$ exponierte Fläche

Annahme alle Flüsse ≥ 0

Sicherung $A_{11-8}(t) + A_{11-7}(t) = O_{11,tot.} \geq 0$; d.h. $A_{11-8}(t) = O_{11,tot.} - A_{11-7}(t) \leq O_{11,tot.}$

Lagerveränderung der Gebäude**p₈**

$$F_{28}: \dot{M}_{11}(t) - \dot{p}_8(t) = X_{22}(t) - \dot{p}_8(t) = 0 \Leftrightarrow M_{11}(t) - p_8(t) = 0$$

mit $p_8(t)$ vorgegebenes Gebäudelager

Regulierung des Mobilienlager-Outputs**p₉**

$$F_{29}: A_{9-8}(t) + A_{9-6}(t) + A_{9-1}(t) - \int_0^t k_9(t, t') \cdot (A_{6-9}(t') + A_{2-9}(t') + A_{3-9}(t') + A_{5-9}(t') + I_1(t')) dt'$$

$$= X_{33}(t) + X_{26}(t) + X_{24}(t) - \int_0^t k_9(t, t') \cdot (X_{28}(t') + X_{30}(t') + X_{31}(t') + X_{32}(t') + X_{44}(t')) dt' = 0$$

mit $k_9(t, t') = p_9(t)$ Transferfunktion des Mobilien-Inputs

Abrieb aus den Mobilien**p₁₀**

$$F_{30}: A_{9,8}(t) - f_9(t, M_9(t), \dots) = X_{33}(t) - f_9(t, M_9(t), \dots) = 0$$

$$f_9(t, M_9(t), \dots) = p_{10}(t) \cdot M_9(t) \text{ bzw. } = p_{10}(t) \cdot F_9(t)$$

mit $p_{10}(t)$ Abriebkoeffizient pro Zeiteinheit, multipliziert mit dem Anteil des Lagers, das dem Abrieb ausgesetzt ist

$F_9(t)$ exponierte Fläche

Annahme alle Flüsse ≥ 0

Sicherung $A_{9,8}(t) + A_{9,6}(t) + A_{9,1}(t) = O_{9,tot} \geq 0$; d.h. $A_{9,8}(t) = O_{9,tot} - A_{9,6}(t) - A_{9,1}(t) \leq O_{9,tot}$.

Entsorgungspraxis der Mobilien**p₁₁**

$$F_{31}: A_{9,1}(t) - p_{11}(t) \cdot (A_{9,1}(t) + A_{9,6}(t)) = X_{24}(t) - p_{11}(t) \cdot (X_{24}(t) + X_{26}(t)) = 0$$

mit $p_{11}(t)$ Anteil des aus den Mobilien entsorgten Kupfers in die Deponie

Lagerveränderung der Mobilien**p₁₂**

$$F_{32}: \dot{M}_9(t) - \dot{p}_{12}(t) \cdot X_{20}(t) - \dot{p}_{12}(t) = 0 \Leftrightarrow \dot{M}_9(t) - p_{12}(t) = 0$$

mit $p_{12}(t)$ vorgegebenes Mobilienlager

Eintrag durch Pflanzenschutzmittel in Landwirtschaft**p₁₃**

$$F_{33}: I_8(t) - p_{13}(t) = X_{51}(t) - p_{13}(t) = 0$$

mit $p_{13}(t)$ vorgegebener Kupferfluss in Pflanzenschutzmitteln (Landwirtschaft)

Lager im Rückbau vernachlässigbar

$$F_{34}: \dot{M}_7(t) - 0 = X_{18} - 0 = 0 \Leftrightarrow \dot{M}_7(t) = 0$$

„Rezyklierungsrate“ des aus den Immobilien rückgebauten Kupfers**p₁₄**

$$F_{35}: A_{7,6}(t) - p_{14}(t) \cdot (A_{7,6}(t) + A_{7,1}(t)) = X_{27}(t) - p_{14}(t) \cdot (X_{27}(t) + X_{25}(t)) = 0$$

mit $p_{14}(t)$ Transferkoeffizient des rückgebauten Kupfers in Produktion (inklusive in exportierte Schrotte)

Zwischenhandel von Gütern (Direktexport)

$$F_{36}: O_6(t) - I_6(t) = X_{57}(t) - X_{49}(t) = 0$$

Schlackenrückstände der regionseigenen Schrottaufbereitung**p₁₅, p₁₇**

$$F_{37}: A_{6,1}(t) - p_{15}(t) \cdot (I_7(t) - O_7(t)) - p_{17}(t) \cdot A_{7,6}(t) = X_{23}(t) - p_{15}(t) \cdot (X_{50}(t) - X_{58}(t)) - p_{17}(t) \cdot X_{27}(t) = 0$$

mit $p_{15}(t)$ Schlackenrückstand der Aufbereitung importierten Schrotts

$p_{17}(t)$ Schlackenrückstand der Aufbereitung des rückgebauten Schrotts (Immobilien)²⁴

Zwischenhandel von Schrotten (Direktexport)**p₃₃**

$$F_{38}: O_7(t) - p_{33}(t) \cdot I_7(t) = X_{58}(t) - p_{33}(t) \cdot X_{50}(t) = 0$$

²⁴ Der Anteil der EE-Geräte/Schrotte, der als Mobilien-Kupfer in die Cu-Material-Herstellung gelangt, ist trotz modernster Aufbereitung durch Begleitmetalle verunreinigt, so dass eine Aufbereitung i.d.R. auf niedrigerer Qualitätsstufe im Ausland erfolgt, z.B. als Zugabe zu Schwarzkupfer. Die weiteren Kupfermobilien („Rest“) sind heterogen zusammengesetzt; auch für sie wird eine Aufbereitung aufgrund der Schrottqualitäten im Ausland angenommen, d.b. ein möglicher Transfer von Bearbeitungsrückständen/Schmelzschlacken in die Deponien wird vernachlässigt.

Mobilien direkt aus Handel Halbzeug/Rohstoffe**p22**

$$F_{39}: A_{5-9}(t) \cdot p_{22}(t) \cdot (A_{5-9}(t) + A_{2-9}(t) + A_{3-9}(t) + A_{6-9}(t)) = X_{32}(t) \cdot p_{22}(t) \cdot (X_{32}(t) + X_{30}(t) + X_{31}(t) + X_{28}(t)) = 0$$

mit $p_{22}(t)$ Anteil des Mobilieneinputs aus dem Prozess Handel
Halbzeug/Rohstoffe (ohne Berücksichtigung des Fahrzeuginputs)

Produkte direkt aus Handel Halbzeug/Rohstoffe in die Gebäude**p24**

$$F_{40}: A_{5-11}(t) \cdot p_{24}(t) \cdot (A_{5-11}(t) + A_{4-11}(t) + A_{6-11}(t)) = X_{39}(t) \cdot p_{24}(t) \cdot (X_{39}(t) + X_{38}(t) + X_{42}(t)) = 0$$

mit $p_{24}(t)$ Anteil des Gebäudeinputs aus dem Prozess Handel
Halbzeug/Rohstoffe

Produkte direkt aus Handel Halbzeug/Rohstoffe in die Infrastruktur**p25**

$$F_{41}: A_{5-10}(t) \cdot p_{25}(t) \cdot (A_{5-10}(t) + A_{4-10}(t) + A_{6-10}(t)) = X_{35}(t) \cdot p_{25}(t) \cdot (X_{35}(t) + X_{34}(t) + X_{29}(t)) = 0$$

mit $p_{25}(t)$ Anteil des Infrastruktur-Inputs aus dem Prozess Handel
Halbzeug/Rohstoffe

Lager im Handel Halbzeug/Rohstoff vernachlässigbar

$$F_{42}: \dot{M}_5(t) - 0 = X_{16}(t) - 0 = 0 \Leftrightarrow M_5(t) = 0$$

Zwischenhandel von Immobiliengütern (Direktexport)**p20**

$$F_{43}: O_5(t) \cdot p_{20}(t) \cdot I_4(t) = X_{56}(t) \cdot p_{20}(t) \cdot X_{47}(t) = 0$$

mit $p_{20}(t)$ Transferkoeffizient des Direktexports der Immobiliengüter

Produkte aus dem Immobiliengüterhandel in die Gebäude**p23**

$$F_{44}: A_{4-11}(t) \cdot p_{23}(t) \cdot (A_{5-11}(t) + A_{4-11}(t) + A_{6-11}(t)) = X_{38}(t) \cdot p_{23}(t) \cdot (X_{39}(t) + X_{38}(t) + X_{42}(t)) = 0$$

mit $p_{23}(t)$ Anteil des Gebäudeinputs aus dem Handel Immobiliengüter

Lager im Immobiliengüterhandel vernachlässigbar

$$F_{45}: \dot{M}_4(t) - 0 = X_{15}(t) - 0 = 0 \Leftrightarrow M_4(t) = 0$$

Zwischenhandel von Elektrowaren (Direktexport)**p18**

$$F_{46}: O_3(t) \cdot p_{18}(t) \cdot I_2(t) = X_{54}(t) \cdot p_{18}(t) \cdot X_{45}(t) = 0$$

mit $p_{18}(t)$ Transferkoeffizient des Direktexports der Elektrowaren

Lager im Elektrohandel vernachlässigbar

$$F_{47}: \dot{M}_2(t) - 0 = X_{13}(t) - 0 = 0 \Leftrightarrow M_2(t) = 0$$

Zwischenhandel von Mobilen(Rest) (Direktexport)**p19**

$$F_{48}: O_4(t) \cdot p_{19}(t) \cdot I_3(t) = X_{55}(t) \cdot p_{19}(t) \cdot X_{46}(t) = 0$$

mit $p_{19}(t)$ Transferkoeffizient des Direktexports der Mobilen(Rest)

Lager im Mobilienehandel(Rest) vernachlässigbar

$$F_{49}: \dot{M}_3(t) - 0 = X_{14}(t) - 0 = 0 \Leftrightarrow M_3(t) = 0$$

Schrottexporte aus der regionseigenen Produktion und Schrottaufbereitung **p₁₆(p₁₅,p₁₇)**

$$F_{50}: \quad O_2(t) - p_{16}(t) \cdot [A_{9-6}(t) + (1 - p_{17}(t)) \cdot A_{7-6}(t) + (I_7(t) - O_7(t)) \cdot (1 - p_{15}(t)) + I_5(t)] \\ = X_{53}(t) - p_{16}(t) \cdot [X_{26}(t) + (1 - p_{17}(t)) \cdot X_{27}(t) + (X_{50}(t) - X_{58}(t)) \cdot (1 - p_{15}(t)) + X_{48}(t)] = 0$$

- mit $p_{16}(t)$ Anteil des exportierten Schrottes (Alt- und Neuschrott) am gesamten umgesetzten Kupfer der Produktion/Herstellung, abzüglich des Deponieanteils
- $p_{17}(t)$ Schlackenrückstand der Aufbereitung des rückgebauten Schrotts (Immobilien)
- $p_{15}(t)$ Schlackenrückstand der Aufbereitung importierten Schrotts

Lager in Herstellung und Produktion vernachlässigbar

$$F_{51}: \quad \dot{M}_6(t) - 0 = X_{17}(t) - 0 = 0 \Leftrightarrow M_6(t) = 0$$

Immobilien Güter in Infrastruktur (Direktimport)**p₂₁**

$$F_{52}: \quad A_{4-10}(t) - p_{21}(t) \cdot (A_{4-10}(t) + A_{5-10}(t) + A_{6-10}(t)) = X_{34}(t) - p_{21}(t) \cdot (X_{34}(t) + X_{35}(t) + X_{29}(t)) = 0$$

- mit $p_{21}(t)$ Anteil des Imports an den Immobiliengütern in Infrastruktur-Nutzung

Mobilien(Rest) in Mobilien (Direktimport)**p₂₇**

$$F_{53}: \quad A_{3-9}(t) - p_{27}(t) \cdot (A_{5-9}(t) + A_{2-9}(t) + A_{3-9}(t) + A_{6-9}(t)) = X_{31}(t) - p_{27}(t) \cdot (X_{32}(t) + X_{30}(t) + X_{31}(t) + X_{28}(t)) = 0$$

- mit $p_{27}(t)$ Anteil des Mobilien(Rest)-Imports in Mobilien-Nutzung (ohne Berücksichtigung des Fahrzeuginputs)

Elektrowaren in Mobilien (Direktimport)**p₂₈**

$$F_{54}: \quad A_{2-9}(t) - p_{28}(t) \cdot (A_{5-9}(t) + A_{2-9}(t) + A_{3-9}(t) + A_{6-9}(t)) = X_{30}(t) - p_{28}(t) \cdot (X_{32}(t) + X_{30}(t) + X_{31}(t) + X_{28}(t)) = 0$$

- mit $p_{28}(t)$ Anteil des Elektrowaren-Imports in Mobilien-Nutzung (ohne Berücksichtigung des Fahrzeuginputs)

Export von Gütern**p₃₁**

$$F_{55}: \quad O_1(t) - p_{31}(t) = X_{52}(t) - p_{31}(t) = 0$$

- mit $p_{31}(t)$ vorgegebener Kupferfluss in Güterexport

Lagerveränderung der Automobile**p₂₆**

$$F_{56}: \quad \dot{M}_F(t) - \dot{p}_{26}(t) = X_{64}(t) - \dot{p}_{26}(t) = 0 \Leftrightarrow M_F(t) - p_{26}(t) = 0$$

- mit $p_{26}(t)$ Kupferlager in Fahrzeugen
- $X_{64} = I_1 - X_{65}$ Lagerveränderung der Fahrzeuge
- $X_{63} = \int_{t_0}^t (I_1 - X_{65}) dt$ Lager der Fahrzeuge

Direktexport Güter**p₂₉**

$$F_{57}: \quad I_6(t) - p_{29}(t) = X_{49}(t) - p_{29}(t) = 0$$

- mit $p_{29}(t)$ Direktexport unbearbeiteter importierter Güter

Schrottimport**p₃₀**

$$F_{58}: \quad I_7(t) - p_{30}(t) = X_{50}(t) - p_{30}(t) = 0$$

- mit $p_{30}(t)$ Schrottimport

Regulierung des Fahrzeuglager-Outputs

P32

$$F_{59}: A_{F-6}(t)+A_{F-1}(t)+A_{F-8}(t)-O_F(t)=X_{65}(t)-O_F(t)=0$$

$$\text{mit } O_F(t)=\int_{t_{F,R}(t)}^t k_F(t,t') \cdot (l_1(t')) dt' \equiv X_{65}$$

und $k_F(t,t')=p_{32}(t)$ Transferfunktion des Fahrzeug-Inputs
 $t_{F,R}(t)$ Zeitpunkt, bis zu dem der ursprüngliche Input „aufgebraucht“ wurde
 (durch Substitution und Abrieb)

Lagerveränderung der Haustechnik

P34

$$F_{60}: \dot{M}_{HT}(t)-\dot{p}_{34}(t)=X_{67}(t)-\dot{p}_{34}(t)=0 \Leftrightarrow M_{HT}(t)-p_{34}(t)=0$$

mit $p_{34}(t)$ Kupferlager in der Haustechnik

Regulierung des Haustechniklager-Outputs

P35,P36

$$F_{61}: A_{HT-7}(t)+A_{HT-8}(t)-O_{HT/Renov.}(t)-O_{HT/Subst.}(t)=X_{68}(t)-O_{HT/Renov.}(t)-O_{HT/Subst.}(t)=0$$

$$\text{mit } O_{HT/Renov.}(t)=\int_{t_{HT,R}(t)}^t k_{HT}(t,t') \cdot (A_{4-HT}(t')+A_{5-HT}(t')+A_{6-HT}(t')) dt'$$

und $k_{HT}(t,t')=p_{35}(t)$ Transferfunktion des Haustechnik-Inputs
 $t_{HT,R}(t)$ Zeitpunkt, bis zu dem der ursprüngliche Input „aufgebraucht“ wurde
 (durch Substitution/Abbruch und Abrieb)

mit $O_{HT/Subst.}(t)=p_{36}(t)$ Kupfersubstitution/Abbruch zur Zeit t

Lagerveränderung des Aussenbereichs

P37

$$F_{62}: \dot{M}_{HT}(t)-\dot{p}_{37}(t)=X_{67}(t)-\dot{p}_{37}(t)=0 \Leftrightarrow M_{HT}(t)-p_{37}(t)=0$$

mit $p_{37}(t)$ Kupferlager im Aussenbereich

Regulierung des Aussenbereichlager-Outputs

P38,P39

$$F_{63}: A_{DA-7}(t)+A_{DA-8}(t)-O_{DA/Renov.}(t)-O_{DA/Subst.}(t)=X_{71}(t)-O_{DA/Renov.}(t)-O_{DA/Subst.}(t)=0$$

$$\text{mit } O_{DA/Renov.}(t)=\int_{t_{DA,R}(t)}^t k_{DA}(t,t') \cdot (A_{4-DA}(t')+A_{5-DA}(t')+A_{6-DA}(t')) dt'$$

und $k_{DA}(t,t')=p_{38}(t)$ Transferfunktion des Aussenbereich-Inputs
 $t_{DA,R}(t)$ Zeitpunkt, bis zu dem der ursprüngliche Input „aufgebraucht“ wurde
 (durch Substitution/Abbruch und Abrieb)

mit $O_{DA/Subst.}(t)=p_{39}(t)$ Kupfersubstitution/Abbruch zur Zeit t

Transferfunktion Infrastruktur

P40,P41

$$F_{64}: k_I(t,t')=\frac{1}{N_I(t')} \cdot e^{-\frac{(t-t'-\tau_I)^2}{2\sigma_I^2}} = \frac{1}{N_I(t')} \cdot e^{-\frac{(t-t'-p_{40}(t'))^2}{2\cdot p_{41}(t')^2}}$$

$$\text{mit } N_I(t')=\int_0^\infty e^{-\frac{(t-\tau)^2}{2(\sigma_I(t'))^2}} dt = \int_0^\infty e^{-\frac{(t-p_{40}(t'))^2}{2(p_{41}(t'))^2}} dt$$

Transferfunktion Gebäude

P42,P43

$$F_{65}: k_G(t,t')=\frac{1}{N_G(t')} \cdot e^{-\frac{(t-t'-\tau_G)^2}{2\sigma_G^2}} = \frac{1}{N_G(t')} \cdot e^{-\frac{(t-t'-p_{42}(t'))^2}{2\cdot p_{43}(t')^2}}$$

$$\text{mit } N_G(t')=\int_0^\infty e^{-\frac{(t-\tau)^2}{2(\sigma_G(t'))^2}} dt = \int_0^\infty e^{-\frac{(t-p_{42}(t'))^2}{2(p_{43}(t'))^2}} dt$$

Transferfunktion Mobilien**P44, P45**

$$F_{66}: k_M(t, t') = \frac{1}{N_M(t')} \cdot e^{-\frac{(t-t'-\tau_M)^2}{2\sigma_M^2}} = \frac{1}{N_M(t')} \cdot e^{-\frac{(t-t'-p_{44}(t'))^2}{2p_{45}(t')^2}}$$

mit $N_M(t') = \int_0^\infty e^{-\frac{(t-t')^2}{2(\sigma_M(t'))^2}} dt = \int_0^\infty e^{-\frac{(t-p_{44}(t'))^2}{2(p_{45}(t'))^2}} dt$

Transferfunktion Fahrzeuge**P46, P47**

$$F_{67}: k_F(t, t') = \frac{1}{N_F(t')} \cdot e^{-\frac{(t-t'-\tau_F)^2}{2\sigma_F^2}} = \frac{1}{N_F(t')} \cdot e^{-\frac{(t-t'-p_{46}(t'))^2}{2p_{47}(t')^2}}$$

mit $N_F(t') = \int_0^\infty e^{-\frac{(t-t')^2}{2(\sigma_F(t'))^2}} dt = \int_0^\infty e^{-\frac{(t-p_{46}(t'))^2}{2(p_{47}(t'))^2}} dt$

Transferfunktion Haustechnik**P48, P49**

$$F_{68}: k_{HT}(t, t') = \frac{1}{N_{HT}(t')} \cdot e^{-\frac{(t-t'-\tau_{HT})^2}{2\sigma_{HT}^2}} = \frac{1}{N_{HT}(t')} \cdot e^{-\frac{(t-t'-p_{48}(t'))^2}{2p_{49}(t')^2}}$$

mit $N_{HT}(t') = \int_0^\infty e^{-\frac{(t-t')^2}{2(\sigma_{HT}(t'))^2}} dt = \int_0^\infty e^{-\frac{(t-p_{48}(t'))^2}{2(p_{49}(t'))^2}} dt$

Transferfunktion Aussenbereich**P50, P51**

$$F_{69}: k_{DA}(t, t') = \frac{1}{N_{DA}(t')} \cdot e^{-\frac{(t-t'-\tau_{DA})^2}{2\sigma_{DA}^2}} = \frac{1}{N_{DA}(t')} \cdot e^{-\frac{(t-t'-p_{50}(t'))^2}{2p_{51}(t')^2}}$$

mit $N_{DA}(t') = \int_0^\infty e^{-\frac{(t-t')^2}{2(\sigma_{DA}(t'))^2}} dt = \int_0^\infty e^{-\frac{(t-p_{50}(t'))^2}{2(p_{51}(t'))^2}} dt$

ANFANGSBEDINGUNGEN

Die Anfangsbedingungen für die Lager M_i sind mit G_j gekennzeichnet.

$G_1:$	$M_1(t_0) - M_{1,0} = 0$	mit	$M_{1,0} = 0$	kg/capita	Deponieanteil vor 1900 vernachlässigt
$G_2:$	$M_2(t_0) - M_{2,0} = 0$	mit	$M_{2,0} = 0$	kg/capita	
$G_3:$	$M_3(t_0) - M_{3,0} = 0$	mit	$M_{3,0} = 0$	kg/capita	
$G_4:$	$M_4(t_0) - M_{4,0} = 0$	mit	$M_{4,0} = 0$	kg/capita	
$G_5:$	$M_5(t_0) - M_{5,0} = 0$	mit	$M_{5,0} = 0$	kg/capita	
$G_6:$	$M_6(t_0) - M_{6,0} = 0$	mit	$M_{6,0} = 0$	kg/capita	
$G_7:$	$M_7(t_0) - M_{7,0} = 0$	mit	$M_{7,0} = 0$	kg/capita	
$G_8:$	$M_8(t_0) - M_{8,0} = 0$	mit	$M_{8,0} = 0$	kg/capita	Immissionen vor 1900 vernachlässigt
$G_9:$	$M_9(t_0) - M_{9,0} = 0$	mit	$M_{9,0} = 3.5$	kg/capita	Annahme ²⁵ für Mobilien-Lager um 1900
$G_{10}:$	$M_{10}(t_0) - M_{10,0} = 0$	mit	$M_{10,0} = 2$	kg/capita	Annahme ²⁵ für Infrastr.-Lager um 1900
$G_{11}:$	$M_{11}(t_0) - M_{11,0} = 0$	mit	$M_{11,0} = 10$	kg/capita	Annahme ²⁵ für Gebäude-Lager um 1900
$G_{12}:$	$M_F(t_0) - M_{F,0} = 0$	mit	$M_{F,0} = 0$	kg/capita	Annahme ²⁵ für Fahrzeug-Lager um 1900
$G_{13}:$	$M_{HT}(t_0) - M_{HT,0} = 0$	mit	$M_{HT,0} = 2$	kg/capita	Annahme ²⁵ für HT-Lager um 1900
$G_{14}:$	$M_{DA}(t_0) - M_{DA,0} = 0$	mit	$M_{DA,0} = 8$	kg/capita	Annahme ²⁵ für DA-Lager um 1900

Die Flüsse des Systems sind zum Zeitpunkt $t=t_0$ gleich null gesetzt.

Ausserdem gilt: $M_2(t) = M_3(t) = M_4(t) = M_5(t) = M_6(t) = M_7(t) = 0 \quad \forall t \in \text{Betrachtungszeitraum}$

²⁵ Die Annahmen zu den Lagern $M_i(t \leq 1900)$ basieren auf den Untersuchungen zur historischen Entwicklung der Kupferlager (Kap. 2.8 und Kap. 3.5).

PARAMETERUNSICHERHEITEN DER UNSICHERHEITSANALYSE

Die Unsicherheitsanalyse der Lagerentwicklungen in Kap. 5.3.1 basiert auf den folgenden Annahmen zu den Parameterunsicherheiten (Tab. A-41):

Tab. A-41: Unsicherheitsanalyse der Wachstumskurven: Allgemeine Annahme zu den Parametern und ihren Unsicherheiten (grau hinterlegt) sowie deren genauen, tatsächlich zur Berechnung eingesetzten Werte für die diversen untersuchten Lager. – n.v.: nicht vorhanden.

Parameter	Einheit	Allgemeine Annahme	Gebäude Dach	Gebäude Haustechnik	Infrastruktur	Mobilien	Fahrzeuge
Anfangszeitpunkt	[a]	20 a	1858 ± 20	1841 ± 20	1900 ± 0	1856 ± 20	n.v.
Anfangswert (bei Anfangszeitpunkt)	[kg/cap.]	10 %	n.v.	n.v.	2 ± 0.2	n.v.	n.v.
Sättigungswert	[kg/cap.]	ca. 10 %	52 ± 5	59 ± 6	120 ± 10	50 ± 5	6.5 ± 0.65
reziproke Aufbauzeit 1	[a ⁻¹]	10 %	0.0574 ± 0.0057	0.0691 ± 0.0069	0.178 ± 0.018	0.0584 ± 0.0058	0.0888 ± 0.0089
Wendepunkt 1	[a]	3 a	2008 ± 3	1982 ± 3	1911 ± 3	1989 ± 3	1978 ± 3
Übergangspunkt	[a]	0	1975 ± 0	1912 ± 0	n.v.	1930 ± 0	n.v.
reziproke Aufbauzeit	[a ⁻¹]	10 %	n.v.	n.v.	0.0652 ± 0.0065	n.v.	n.v.
Wendepunkt 2	[a]	3 a	n.v.	n.v.	1969 ± 3	n.v.	n.v.

A.4.5 Bewertungskriterien

Formal handelt es sich bei den Bewertungskriterien um einfach gebildete Hilfsvariablen, die für eine Bewertung des Kupferhaushalts geeignet sind. Angewendet auf das untersuchte Kupferhaushaltssystem lassen sich die Bewertungskriterien aus Kap. 5.2.4 durch die Systemvariablen wie folgt ausdrücken.

Versorgungsgrad der Region (X_{91})²⁶

$$\begin{aligned}
 X_{91}: \quad VG_{Cu}(t) &\equiv \frac{A_{7-6} \cdot (1-p_{17}) + A_{9-6}}{I_1 + A_{2-9} + A_{3-9} + A_{6-9} + A_{4-10} + A_{6-10} + A_{4-11} + A_{6-11} + (A_{5-9} + A_{5-10} + A_{5-11})} \\
 &= \frac{X_{27} \cdot (1-p_{17}) + X_{26}}{X_{44} + X_{30} + X_{31} + X_{28} + X_{34} + X_{29} + X_{38} + X_{42} + (X_{32} + X_{35} + X_{39})} \quad \frac{[kg/(cap. \cdot a)]}{[kg/(cap. \cdot a)]}
 \end{aligned}$$

Nutzungsverlust (absolut, pro Kopf)

$$\begin{aligned}
 X_{92}: \quad m_{NV}(t) &= A_{7-1}(t) + A_{9-1}(t) + A_{6-1}(t) + A_{11-8}(t) + A_{10-8}(t) + A_{9-8}(t) \\
 &= X_{25}(t) + X_{24}(t) + X_{23}(t) + X_{41}(t) + X_{37}(t) + X_{33}(t) \quad [kg/(cap. \cdot a)]
 \end{aligned}$$

Akkumulierter Nutzungsverlust (absolut, pro Kopf)

$$\begin{aligned}
 X_{95}: \quad M_{NV}(t) &= \sum_{t'=1900}^t A_{7-1}(t') + A_{9-1}(t') + A_{6-1}(t') + A_{11-8}(t') + A_{10-8}(t') + A_{9-8}(t') \\
 &= \sum_{t'=1900}^t X_{25}(t') + X_{24}(t') + X_{23}(t') + X_{41}(t') + X_{37}(t') + X_{33}(t') \quad [kg/(cap. \cdot a)]
 \end{aligned}$$

Umwelteintrag aus der Nutzung (Hauptlager)

$$X_{98}: \quad m_U(t) = A_{11-8}(t) + A_{10-8}(t) + A_{9-8}(t) = X_{41}(t) + X_{37}(t) + X_{33}(t) \quad [kg/(cap. \cdot a)]$$

Akkumulierter Umwelteintrag aus der Nutzung (Hauptlager)

$$X_{99}: \quad M_U(t) = \sum_{t'=1900}^t A_{11-8}(t') + A_{10-8}(t') + A_{9-8}(t') = \sum_{t'=1900}^t X_{41}(t') + X_{37}(t') + X_{33}(t') \quad [kg/(cap. \cdot a)]$$

²⁶ Der Übersichtlichkeit halber wurden die Flüsse aus dem Halbzeughandel in die Nutzungslager eingeklammert, da sie beim gewählten Modellansatz gleich null gesetzt sind (vgl. Fussnote ²¹).

A.4.6 Kalibrierung des Modells *Cuprum*

Für die Kalibrierung wurden auf der Grundlage der Aussenhandelsstatistik elf Vergleichsvariablen gebildet²⁷. Aus KAPITEL 74 „Kupfer und Waren daraus“ wurden für die Voruntersuchung 124 Tarifnummern aus 19 Positionen zur Untersuchung ausgewählt. Aus den übrigen KAPITELN wurden 333 Tarifnummern aus 58 Positionen berücksichtigt. Die berücksichtigten Tarifnummern des KAPITELS 74 sind in Tab. A-42 aufgelistet, jene aus anderen KAPITELN in Tab. A-43.

Tab. A-42: Liste der berücksichtigten Tarifnummern aus KAPITEL 74 der Schweizerischen Aussenhandelsstatistik (OZD 2001) gemäss der Warennomenklatur des Harmonisierten Systems zur Bezeichnung und Codierung der Waren (seit 1988): Beschreibung der Position, Positionsnummer, Tarifnummer(n), Bezeichnung der Tarifnummer(n), Erläuterung zur Tarifnummer bzw. Tarifnummerngruppe und Kupfergehalt (Konzentration). Der Kupfergehalt wurde teilweise abgeschätzt.

Beschreibung der Position	Position	Tarif-Nr.	Bezeichnung der Tarif-Nr.	Erläuterungen	Kupfergehalt
Zwischenprodukte der Kupfererzeugung (Kupfermatte, Zementkupfer)	7401	1000	Kupfermatte	Kupferstein c = 20–65 %	43 %
	7401	2000	Zementkupfer	gefälltes Kupfer c = 60–90 %	75 %
nicht raffiniertes Kupfer, inkl. Kupferanoden	7402	0000	Kupfer, nicht raffiniert	Kupferanoden zum elektrolytischen Raffinieren c = 98.5–99.5 %	95 %
raffiniertes Kupfer und Kupferlegierungen in Rohform	7403	1100	Kupfer, raffiniert	in Form von Kathoden oder Kathodenabschnitten	100 %
	7403	1200	Kupfer, raffiniert	in Form von Drahtbarren	100 %
	7403	1300	Kupfer, raffiniert	in Form von Knüppeln	100 %
	7403	1900	Kupfer, raffiniert	in Rohform	100 %
	7403	2100	Kupfer-Zink-Legierungen in Rohform	Messing c = 52.5–95 %	58 %
	7403	2200	Kupfer-Zinn-Legierungen in Rohform	Bronze c = 80–90 %	85 %
	7403	2300	Kupfer-Nickel-Legierungen in Rohform	Kupfernichel, Neusilber c = 45–75 % bzw. c = 35–80 %	66 %
	7403	2900	andere Kupferlegierungen	Sonstige Schätzung: c = 75 %	75 %
Kupferabfälle und Kupferschrott	7404	0010	Bearbeitungsabfälle aus Kupfer	Kupferabfälle (c = 100 %), aber auch Messing und Schlämme	70 %
	7404	0090	Abfälle und Schrott aus Kupfer	Annahme: c = 90 %	90 %

²⁷ Zu Beginn des 20. Jahrhunderts umfasste das Tarifsysteem mehrere Hundert Tarifnummern, doch mit zunehmender Warendiversifikation wuchs die Anzahl im Laufe des 20. Jahrhunderts auf mehrere Tausend an. In diesem Zusammenhang wurde das Nummersystem des Gebrauchstarifs mehrmals gesetzlich verändert bzw. bereinigt; zweimal änderte sich das Tarifsysteem grundlegend (1900–10, 1950–60). Seit den 1950er Jahren wird in der Schweizerischen Aussenhandelsstatistik ein internationales System angewandt, anfangs 6-stellig und seit der Einführung des „Harmonisierten Systems“ 1988 8-stellig.

Beschreibung der Position	Position	Tarif-Nr.	Bezeichnung der Tarif-Nr.	Erläuterungen	Kupfergehalt
Kupfer- vorlegierungen	7405	0000	Kupfer- vorlegierungen	keine Legierungen mit c(P) > 15%; diverse Zusammensetzungen, c(Cu) = 30–90 %	60 %
Pulver aus Kupfer und -Legierungen	7406	1000 2000	Pulver aus Kupfer	ohne/mit Lamellenstruktur	100 %
Halbzeug aus Kupfer und -Legierungen	7407	1011	Stangen, Stäbe, Profile (inkl. Hohlprofile) aus raffiniertem Kupfer	ohne/mit Oberflächen- veredelung, versch. Herstellungsverfahren, versch. Querschnitte	100 %
		1012			
		1091			
		1092			
		1093			
		1094			
	7407	2111	Stangen, Stäbe, Profile (inkl. Hohlprofile) aus raffiniertem Messing	ohne/mit Oberflächen- veredelung, versch. Herstellungsverfahren, versch. Querschnitte	58 %
		2112			
		2191			
		2192			
		2193			
		2194			
7407	2211	Stangen, Stäbe und Profile, aus Kupronickel oder Neusilber (Kupfer- Nickel-Legierungen)	ohne/mit Oberflächen- veredelung, versch. Herstellungsverfahren, versch. Querschnitte	66 %	
	2212				
	2291				
	2292				
	2293				
	2294				
7407	2911	Stangen, Stäbe und Profile, aus anderen Legierungen	ohne/mit Oberflächenveredelung, versch. Herstellungsverfahren, versch. Querschnitte	75 %	
	2912				
	2991				
	2992				
	2993				
	2994				
Draht aus Kupfer und -Legierungen (d ≤ 6mm)	7408	1110	Draht aus raffiniertem Kupfer	ohne/mit Oberflächen- veredelung, versch. Herstellungsverfahren, versch. Querschnitte	100 %
		1191			
		1192			
		1910			
		1991			
		1992			
	7408	2110	Draht aus Kupfer-Zink- Legierungen (Messing)	ohne/mit Oberflächen- veredelung, versch. Herstellungsverfahren, versch. Querschnitte	58 %
		2121			
		2122			
		2131			
	7408	2210	Draht aus Kupronickel oder Neusilber	ohne/mit Oberflächen- veredelung, versch. Herstellungsverfahren, versch. Querschnitte	66 %
		2221			
2222					
2231					
		2232			

Beschreibung der Position	Position	Tarif-Nr.	Bezeichnung der Tarif-Nr.	Erläuterungen	Kupfergehalt
Draht aus Kupfer und -Legierungen (d ≤ 6mm) <i>Fortsetzung</i>	7408	2910	Draht, aus anderen Legierungen	ohne/mit Oberflächenveredelung, versch. Herstellungsverfahren, versch. Querschnitte	75 %
		2921			
		2922			
		2931			
		2932			
Bleche und Bänder aus Kupfer und -Legierungen (d ≥ 0.15mm)	7409	1110	Bleche und Bänder aus raffiniertem Kupfer	nur gewalzt oder weitergehend behandelt, in Rollen oder nicht in Rollen	100 %
		1120			
		1910			
		1920			
	7409	2110	Bleche und Bänder aus Kupfer-Zink-Legierungen (Messing)	nur gewalzt oder weitergehend behandelt, in Rollen oder nicht in Rollen	58 %
		2120			
		2910			
		2920			
	7409	3110	Bleche und Bänder aus Kupfer-Zinn-Legierungen (Bronze)	nur gewalzt oder weitergehend behandelt, in Rollen oder nicht in Rollen	85 %
		3120			
		3910			
		3920			
7409	4010	Bleche und Bänder aus Kupfer-Nickel-(Zink-) Legierungen (Kupronickel bzw. Neusilber)	nur gewalzt oder weitergehend behandelt	66 %	
	4020				
7409	9010	Bleche und Bänder aus anderen Legierungen	nur gewalzt oder weitergehend behandelt	75 %	
	9020				
Blattmetall und dünne Bänder (d ≤ 0.15mm) (für Kunstarbeiten)	7410	1110	Folien und (dünne) Bänder aus raffiniertem Kupfer	ohne Unterlage	100 %
		1190			
	7410	1210	Folien und (dünne) Bänder aus anderen Legierungen	ohne Unterlage	75 %
		1290			
	7410	2100	Folien und (dünne) Bänder aus raffiniertem Kupfer	mit Unterlage	100 %
7410	2200	Folien und (dünne) Bänder aus anderen Legierungen	mit Unterlage	75 %	
Rohre aus Kupfer und -Legierungen	7411	1010	Rohre aus raffiniertem Kupfer	ohne/mit Oberflächenveredelung	100 %
		1020			
	7411	2110	Rohre aus Kupfer-Zink-Legierungen (Messing)	ohne/mit Oberflächenveredelung	58 %
		2120			
	7411	2210	Rohre aus Kupfer-Nickel-(Zink-) Legierungen (Kupronickel bzw. Neusilber)	ohne/mit Oberflächenveredelung	66 %
2220					
7411	2910	Rohre aus anderen Legierungen	ohne/mit Oberflächenveredelung	75 %	
		2920			
Fittings usw. aus Kupfer und -Legierungen	7412	1010	Rohrformstücke, Rohrverschlussstücke und Rohrverbindungsstücke aus raffiniertem Kupfer	ohne/mit Oberflächenveredelung	100 %
		1020			

Beschreibung der Position	Position	Tarif-Nr.	Bezeichnung der Tarif-Nr.	Erläuterungen	Kupfergehalt
Fittings usw. aus Kupfer und -Legierungen <i>Fortsetzung</i>	7412	2010 2020	Rohrformstücke, Rohrverschlussstücke und Rohrverbindungsstücke aus Kupfer-Legierungen	ohne/mit Oberflächenveredelung	75 %
Kupferleiter (Litzen, Seile u.Ä.)	7413	0000	Litzen, Kabel, Seile u.Ä. aus Kupfer	ausgenommen isolierte Erzeugnisse	90 %
Gewebe, Gitter und Geflechte	7414	2000 9000	Gewebe aus Kupferdraht	auch endlos	75 %
Kleinteile (Nägel, Schrauben, Muttern, Unterlegscheiben, Nieten usw.)	7415	1000 2100 2910 2990 3310 3391 3399 3910 3990	Stifte, Nägel, Reissnägel, Krampen, Klammern u.Ä.; Unterlegscheiben; Bolzen, Nieten, Splinte, Keile; (Holz-)Schrauben, Muttern; Schraubhaken, Stöpsel, Spunde aus Kupfer		60 %
Federn	7416	0000	Federn	ausg. Uhrfedern u.Ä.	85 %
nichtelektrische Koch- und Heizgeräte (Benzin-, Petroleum- und Spirituskocher etc.)	7417	0000	Koch- und Heizgeräte, nichtelektrisch	Haushaltsgeräte (ausg. Warmwasserbereiter und -speicher)	75 %
Haushaltsartikel (Kochgeschirr, Schwämme, Putzlappen etc.)	7418	1100 1910 1921 1929 2010 2020	Schwämme, Putzlappen u.Ä.; Haushalts- und Hauswirtschaftsartikel; Sanitärartikel	mit/ohne Oberflächenveredelung	90 %
andere Waren (Nadeln, Schlüsselanhänger, Kettchen, Taschenhandwärmer, Behälter u.Ä.)	7419	1000 9100 9910 9921 9929	Ketten; Gusswaren; Kupferwaren	mit/ohne Oberflächenveredelung	95 %

Tab. A-43: Liste der berücksichtigten Tarifnummern aus den KAPITELN 26, 28, 31, 38, 83, 84, 85, 86, 87, 90, 91, 95 (kupferhaltige Waren ausserhalb KAPITEL 74) der Schweizerischen Aussenhandelsstatistik (OZD 2001) gemäss der Warennomenklatur des Harmonisierten Systems zur Bezeichnung und Codierung der Waren (seit 1988): Beschreibung der Position bzw. Positionsgruppe, Positionsnummer, Tarifnummer(n), Bezeichnung der Tarifnummer(n), Erläuterung zur Tarifnummer bzw. Tarifnummerngruppe und Kupfergehalt (Konzentration). Der Kupfergehalt wurde teilweise abgeschätzt. Zur besseren Übersicht sind die Positionen verschiedener KAPITEL durch Doppelstriche abgegrenzt.

Beschreibung der Position	Position	Tarif-Nr.	Bezeichnung der Tarif-Nr.	Erläuterungen	Kupfergehalt
Erze und Erzkonzentrate	2603	0000	Kupfererze und ihre Konzentrate	Roherz 0.5–2 %, Konzentrat 20–30 %, →c = 1.25–25 %	13 %
Aschen und Rückstände (Schlacken)	2620	3000	Aschen und Rückstände, überwiegend Kupfer enthaltend	wie sie in der Industrie zum Gewinnen von Metall oder zum Herstellen von Metallverbindungen verwendet werden	10 %
Kupferoxide und -hydroxide	2825	5000	Kupferoxide und -hydroxide	c = 50–88.8 % (Brochantit-Cuprit)	69 %
Chloridoxide und -hydroxide des Kupfers	2827	4100	Chloridoxide und -hydroxide des Kupfers	c = 59.5 % (Atacamit)	60 %
Sulfate des Kupfers	2833	2500	Sulfate des Kupfers	c = 25 % (Chalkanthit)	25 %
mineralische Dünger	3103	1000 2000 9000	Superphosphate; Entphosphorations-schlacken; Phosphatdüngemittel	div. Phosphatdünger	0.0035 %
	3104	1000 2000 3000 9000	Carnallit, Sylvinit, Kalisalze; Kaliumchlorid; Kaliumsulfat; Kaliummagnesiumsulfat	div. Kalidünger	0.0004 %
	3105	1000 2000 3000 4000 5100 5900 6000	Düngemittel (< 10 kg), NPK-Dünger, Diammoniumphosphat, Monoammoniumphosphat, Nitrat-P-Dünger, NP-Dünger, PK-Dünger, NK-Dünger	div. N- und gemischte Dünger	0.0011 %
Pflanzenschutzmittel (Insektizide, Fungizide, Herbizide)	3808	1010 2010 3010	Insektizide, Fungizide und Herbizide/Keimhemmungsmittel und Pflanzenwuchsregulatoren auf der Grundlage von Schwefel oder Kupferverbindungen	div. Insektizide	50 %
Schlösser, inkl. Schlüssel	8301	1000 2000 3000 4000 5000 6000 7000	Vorhängeschlösser; Automobilschlösser; Möbelschlösser; weitere Schlösser; Verschlüsse und Verschlussbügel; Teile von Schlössern; Schlüssel	Schlösser: Messing c = 58 % Annahme: ¾ Messing und ¼ Stahl etc. Schlüssel (Neusilber und Bleimessing): hier vernachlässigt	45 %

Beschreibung der Position	Position	Tarif-Nr.	Bezeichnung der Tarif-Nr.	Erläuterungen	Kupfergehalt
Beschläge, Scharniere usw.	8302	1090 2090 3090 4190 4290 4990 5090 6090	Scharniere, Laufrollen, Beschläge, Bau- und Möbelbeschläge, Kleiderhaken; Türschliesser, aus unedlen Metallen	Annahme: ½ Messing und ½ Stahl etc.	30 %
Ordner	8304	0090	Ordner, aus unedlen Metallen	Annahme: 80 % Metall, davon 50 % Messing	25 %
Glocken, Ziergegenstände, Fotorahmen	8306	1000 2100 2900 3000	Glocken, Klingeln, Gongs; Statuetten u.a. Ziergegenstände; Fotorahmen	aus unedlen Metallen Annahme: c = 50 %	50 %
Ventilatoren	8414	5100 5910 5920	div. Ventilatoren	Annahme: c = 4 %	4 %
Kühl- und Gefrierschränke	8418	1000 2100 2200 3000 4000 5000	Kühl- und Gefrierschränke; Kompressions- und Absorptionskühlschränke; Gefrier- und Tiefkühltruhen	Annahme: c = 1 %	1 %
Durchlauferhitzer, Heisswasserspeicher, Wärmetauscher	8419	1190 1990 5091 5092	Gasdurchlauferhitzer und Heisswasserspeicher, Wärmeaustauscher, aus unedlen Metallen (ausser Eisen und Aluminium)	Annahme: c = 4 %	4 %
Wäscheschleudern	8421	1210 1220	Wäscheschleudern, div. Gewichte	Annahme: c = 1 %	1 %
Geschirrspülmaschinen	8422	1100 1900	(Haushalts-)Geschirrspülmaschinen	Annahme: c = 2 %	2 %
Schreibmaschinen u.Ä.	8469	1100 1200 2000	Textverarbeitungs- maschinen; Schreibautomaten; Schreibmaschinen	Annahme: c = 4 %	4 %
Rechenmaschinen u.Ä.	8470	2100 2900 4000 5000	div. Rechenmaschinen; Buchungsmaschinen; Registrierkassen	Annahme: c = 4 %	4 %
Datenverarbeitungs- maschinen	8471	1000 3000 4100 4900 5000 6000 7000	Datenverarbeitungs- maschinen und Zubehör	Annahme: c = 4 %	4 %

Beschreibung der Position	Position	Tarif-Nr.	Bezeichnung der Tarif-Nr.	Erläuterungen	Kupfergehalt
Ventile und andere Armaturen	8481	1090 2090 3090 4090 8090 9090	Druckminderventile; Ventile für ölhydraulische od. pneumatische Energieübertragungen; Rückschlagkappen und -ventile; Überdruck- od. Sicherheitsventile; Regelarmaturen und ähnliche Apparate für Rohr- od. Schlauchleitungen, Dampfkessel, Sammelbehälter, Wannen od. ähnliche Behälter (und Teile davon)	aus unedlen Metallen Annahme: die Hälfte der Waren besteht aus Messing	30 %
Elektromotoren	8501	1010 1020 2010 2020 2030 3110 3120 3130 3200 3300 3410 3420 4010 4020 4030 4040 5110 5120 5130 5200 5310 5320	Elektromotoren; Allstrommotoren; Gleichstrommotoren; Einphasen- Wechselstrommotoren; Mehrphasen- Wechselstrommotoren; Alternatoren	diverse Leistungen Annahme: c = 10 %	10 %
Stromerzeugungsanlagen und Stromumformer	8502	1100 1200 1300 2000 3100 3900 4010 4020 4030 4040	Stromerzeugungsaggregate; Umformer, elektrisch, rotierend	diverse Leistungen Annahme: c = 10 %	10 %

Beschreibung der Position	Position	Tarif-Nr.	Bezeichnung der Tarif-Nr.	Erläuterungen	Kupfergehalt
Transformatoren, Stromrichter und Drosselspulen	8504	2110 2120 2200 2300 3100 3210 3220 3310 3320 3400 4040 4051 4052 4053 5040 5051 5052 5053 9040 9051 9053	div. Transformatoren mit Flüssigkeitsisolation; div. Trockentransformatoren; div. Stromrichter; div. Drosselspulen; und Teile davon	Annahme: c = 4 %	4 %
Elektromagnete, inkl. Hebeköpfe	8505	3010 3020 9010 9020	Hebeköpfe; Elektromagnete	div. Gewichte Annahme für Elektromagnete: 50 % Spulen	50 %
elektrische Werkzeuge	8508	1000 2000 8000 9000	Handbohrmaschinen, Handsägen- und -trennmaschinen, Elektrowerkzeuge (handgeführt), Teile davon	mit Elektromotor	4 %
elektrische Geräte im Haushalt	8509	1000 2000 3000 4000 8000 9000	Staubsauger, Bohnengeräte, Küchenabfall- und Lebensmittelzerkleinerungsgeräte, Haushaltsgeräte	mit Elektromotor	4 %
Haarschneidemaschinen	8510	1000 2000 3000 9000	Rasierapparate, Haarschneide- und Schermaschinen, Enthaarungsapparate, Teile davon	mit eingebautem Elektromotor	4 %
Motorenzubehör (Zündanlage und -verteiler, Anlasser, Lichtmaschine usw.)	8511	2000 3000 4000 5000 8010 8020 9010 9020 9090	Motorenzubehör: Magnetzündler usw., Zündverteiler und -spulen, (Licht-)Anlasser, Lichtmaschinen, Glühkerzen, Lade- od. Rückstromschalter, Zündapparate, Teile davon	div. Zusammensetzung Spulen haben vermutlich höhere Kupfergehalte Anlasser = Elektromotor	10 %
Taschenlampen	8513	1000 9000	Taschenlampen, Teile davon	Annahme: c = 2 %	2 %

Beschreibung der Position	Position	Tarif-Nr.	Bezeichnung der Tarif-Nr.	Erläuterungen	Kupfergehalt
Löt- und Schweissgeräte	8515	1100 1910 1920 2110 2120 2910 2920 3110 3120 3910 3920 8030 8041 8042 9030 9041 9042	LötKolben und -pistolen, Maschinen, Apparate und Geräte zum elektrischen Hart- od. Weichlöten, zum Widerstandsschweissen von Metallen, zum Lichtbogen- od. Plasmastrahlschweissen von Metallen, Mikro-Drahtschweissgeräte und andere Schweissgeräte	elektrisch Annahme: c = 4 %	4 %
elektrische Heizgeräte (Geräte zum Heizen und zur Warmwassererzeugung, Haar- und Händetrockner, Bügeleisen, Herde, Kaffeemaschinen, Toaster usw.)	8516	1011 1012 1013 1020 1030 2100 2910 2920 3100 3200 3300 4000 5000 6000 7100 7200 7900 9000	Boiler, Warmwasserbereiter, Tauchsieder, Speicherheizgeräte, Geräte zum Raum- od. Bodenbeheizen, Haartrockner, Elektrowärmegeräte zur Haarpflege, Händetrockner, Bügeleisen, Mikrowellenöfen, Öfen, Küchenherde, Kochplatten und Bratgeräte, Kaffee- und Teemaschinen, Brotröster, Elektrowärmegeräte für den Haushalt, Teile davon	elektrisch Annahme: c = 8 %	8 %
Kommunikationsgeräte (Telefonapparate, Faxgeräte u.Ä.)	8517	1100 1910 1990 2100 2200 3000 5000 8000 9010 9090	drahtgebundene Telefonapparate, Bildtelefone, Telefonapparate, Fernkopierer und -schreiber, Vermittlungsapparate, Apparate für Trägerfrequenzsysteme, Apparate für die digitale und die drahtgebundene Fernmeldetechnik, Teile davon	ohne Tarif-Nr. 8010: Heizwiderstände	4 %

Beschreibung der Position	Position	Tarif-Nr.	Bezeichnung der Tarif-Nr.	Erläuterungen	Kupfergehalt
Audiogeräte (1): Verstärker, HiFi-Geräte, Lautsprecher, Mikrofone usw.	8518	1010 1090 2100 2200 2910 2990 3010 3090 4000 5000 9010 9090	div. Mikrophone, Lautsprecher, (Telefon-) Hörer, Tonfrequenzverstärker, Tonverstärkereinrichtungen, Teile davon	–	4 %
Audiogeräte (2): Plattenspieler, Kassettengeräte	8519	1000 2100 2900 3100 3900 4000 9200 9300 9900	div. Plattenspieler, Abspiel-Diktiergeräte, (Taschen-)Kassettengeräte, Tonwiedergabegeräte	ohne Aufnahmefunktion	4 %
Audiogeräte (3): Kassettenrecorder, Telefonanrufbeantworter, Diktiergeräte	8520	1000 2000 3200 3300 3900 9000	Diktiergeräte, Telefonanrufbeantworter, Magnetbandgeräte, Kassettengeräte, Tonaufnahmegeräte	mit Aufnahmefunktion	4 %
Videogeräte	8521	1000 9000	Videogeräte, mit/ohne Magnetband	–	4 %
Radio- und TV-Geräte, Videokameras, Funkgeräte	8525	1010 1090 2000 3000 4010 4090	Sendegeräte für den Funksprech- od. -telegraphieverkehr, für den Rundfunk od. das Fernsehen, mit eingebautem Empfangsgerät, Fernsehkameras, Video-Einzelbildkameras	–	4 %
Funkspezialgeräte (Mess-, Navigations- und Fernsteuergeräte)	8526	1000 9100 9200	Funkmessgeräte, Funknavigationsgeräte, Funkfernsteuergeräte	Radargeräte, GPS-Geräte usw.	4 %
Tragbare Audio-, Radio- und Funkgeräte	8527	1200 1300 1900 2100 2900 3100 3200 3900 9010 9090	Taschen-Radio- kassettengeräte, div. Rundfunk- empfangsgeräte, Personenrufempfänger, Funkempfangsgeräte (inkl. Rundfunk)	Walkman, Radios, Pager	4 %

Beschreibung der Position	Position	Tarif-Nr.	Bezeichnung der Tarif-Nr.	Erläuterungen	Kupfergehalt
TV, Monitore und Projektoren	8528	1200 1300 2100 2200 3000	Fernsehgeräte, Video-Monitore, mehrfarbig und monochrom, Video-Projektoren	–	4 %
Kabel (isolierte Wickeldrähte, Koaxial- und Zündkabel)	8544	1110 1120 1130 2010 2020 3000 5110 5190 5910 5920 6010 6091 6092	Wickeldrähte für elektronische Zwecke, aus Kupfer, isoliert, div. Durchmesser; Koaxialkabel und andere koaxiale elektrische Leiter; Zündkabelsätze von der für Beförderungsmittel verwendeten Art; Leiter, elektrisch, isoliert, für Spannungen von > 80 V bis 1000 V und von > 1000 V	div. Kabeltypen, ohne/mit Anschlussstücke(n), ohne/mit Metallumhüllung Annahme: c = 65 %	65 %
Elektroloks	8601	1000 2000	Lokomotiven, elektrisch	mit Stromspeisung aus dem Stromnetz bzw. Akkumulatoren	8 %
Triebwagen und Trams	8603	1000	Triebwagen und Schienenbusse	mit Stromspeisung aus dem Stromnetz	7 %
Personenwagen (Schiene)	8605	0000	Personenwagen, Gepäck- und Postwagen und andere schienengebundene Spezialwagen	–	2 %
Traktoren und Sattelschlepper	8701	1000 2000 3000 9010 9090	Traktoren für die Industrie; Sattel-Strassenzugmaschinen; Raupen-traktoren; Traktoren für die Landwirtschaft; andere Traktoren	–	2 %
Autobusse	8702	1010 1020 9010 9020	Automobile zum Befördern von 10 Personen od. mehr (einschl. Fahrer)	div. Gewichtsklassen, mit Diesel-, Halbdiesel- od. anderem Motor (Omnibusse)	0.7 %

Beschreibung der Position	Position	Tarif-Nr.	Bezeichnung der Tarif-Nr.	Erläuterungen	Kupfergehalt
Personenwagen (Strasse)	8703	2100	Personenautomobile und andere hauptsächlich zur Personenbeförderung gebaute Automobile, einschl. Kombiautomobile und Rennwagen	div. Hubraumklassen, div. Stückgewichtsklassen, mit Hubkolbenmotor mit Funkenzündung, mit Diesel- od. Halbdieselmotor od. mit anderem Motor als Kolbenverbrennungsmotor	0.7 %
		2200			
		2310			
		2320			
		2330			
		2410			
		2420			
		3100			
		3210			
		3220			
		3230			
		3310			
		3320			
		9010			
9020					
9030					
Lastkraftwagen	8704	2110	Lastkraftwagen	div. Klassen zulässigen Gesamtgewichts, div. Stückgewichtsklassen, mit Diesel- od. Halbdieselmotor od. mit Kolbenverbrennungsmotor mit Funkenzündung	2 %
		2120			
		2130			
		2200			
		2300			
		3110			
		3120			
		3130			
		3200			
		9010			
		9020			
9030					
Bremsbeläge, Kühler	8708	3100	Bremsbeläge, montiert, für Traktoren, Omnibusse, Personenautomobile, Lastkraftwagen und Automobile zu besonderen Zwecken; Kühler für Omnibusse, Personenautomobile, Lastkraftwagen und Automobile zu besonderen Zwecken	–	3 %
		9110			
		9190			
Motorräder (einschl. Mopeds und Mofas)	8711	1000	Motorräder, einschl. Mopeds und Fahrräder mit Hilfsmotor, auch mit Seitenwagen	div. Hubraumklassen, mit/ohne Hubkolbenmotor	1 %
		2000			
		3000			
		4000			
		5000			
		9000			
Fahrräder	8712	0000	Zweiräder und andere Fahrräder, einschl. Lastendreitäder, ohne Motor	–	1 %
Diaprojektoren	9008	1000	Diaprojektoren	–	4 %

Beschreibung der Position	Position	Tarif-Nr.	Bezeichnung der Tarif-Nr.	Erläuterungen	Kupfergehalt
Photokopierer	9009	1100 1200 2100 2200 3000	Photokopierapparate	elektrostatisch: direktes/indirektes Verfahren od. mit Kontaktverfahren, mit optischem System	4 %
Plotter	9017	1010	Plotter	–	4 %
Gehäuse für Armband- und Taschenuhren	9111	2000 9010 9090	Gehäuse für Armband- uhren, Taschenuhren und ähnliche Uhren, aus unedlen Metallen	Sammelposition aller unedler Metalle	58 %
Videospiele (Konsolen)	9504	1000	Videospiele von der mit einem Fernsehemp- fangsgerät verwendeten Art	–	4 %

Zuordnung der Positionen zu den Modellvariablen

Die Zuordnung der Positionen erfolgte gemäss Tab. A-44. Positionen, die weniger als 0.3 % am Import, am Export und am Netto-Import beitrugen (jeweils bezogen auf den Kupferanteil), wurden im Weiteren nicht berücksichtigt und sind nicht in der Tabelle dargestellt (gilt analog für Tarifnummern). Dabei wurde sichergestellt, dass Import, Export und Netto-Import jeweils zu über 90 % der Gesamtmenge²⁸ erfasst sind.

Tab. A-44: Zuordnungsvorschrift der Positionen der Aussenhandelsstatistik zu den Kontrollvariablen des Kupferhaushaltssystems *Cuprum*. Die Zuordnung erfolgt positionsweise jeweils für eine bis mehrere Tarifnummern. Die Positionsbezeichnung wurde ggf. auf die in den Variablen berücksichtigten Tarifnummern beschränkt und zur besseren Übersichtlichkeit teilweise vereinfacht.

Posititionsbeschreibung	Position	Variablen-zugehörigkeit
Kupfer, raffiniert, und Kupfer-Legierungen in Rohform	7403	15
Bearbeitungsabfälle aus Kupfer (Neuschrott) Abfälle und Schrott aus Kupfer (Altschrott)	7404	17
Kupfervorlegierungen	7405	15
Pulver aus Kupfer	7406	15
Stangen, Stäbe, Profile (inkl. Hohlprofile) aus raffiniertem Kupfer, Kupferlegierungen oder Legierungen mit Kupfer	7407	15
Draht aus raffiniertem Kupfer, Kupferlegierungen oder Legierungen mit Kupfer	7408	15
Bleche und Bänder aus raffiniertem Kupfer, Kupferlegierungen oder Legierungen mit Kupfer	7409	15
Folien und (dünne) Bänder aus raffiniertem Kupfer	7410	15
Rohre aus raffiniertem Kupfer	7411	14
Litzen, Kabel, Seile u.Ä. aus Kupfer	7413	14
Stifte, Nägel, Reissnägel, Krampen, Klammern u.Ä.; Unterlegscheiben; Bolzen, Nieten, Splinte, Keile; (Holz-)Schrauben, Muttern; Schraubhaken, Stöpsel, Spunde aus Kupfer	7415	13
Federn	7416	13
Schwämme, Putzlappen u.Ä.; Haushalts- und Hauswirtschaftsartikel; Sanitärartikel	7418	13
Ketten; Gusswaren; Kupferwaren	7419	13
Aschen und Rückstände, überwiegend Kupfer enthaltend	2620	15
Insektizide, Fungizide und Herbizide/Keimhemmungsmittel und Pflanzenwuchsregulatoren auf der Grundlage von Schwefel oder Kupferverbindungen	3808	18
Vorhängeschlösser; Automobilschlösser; Möbelschlösser; weitere Schlösser; Verschlüsse und Verschlussbügel; Teile von Schlössern; Schlüssel	8301	13
Scharniere, Laufrollen, Beschläge, Baubeschläge, Möbelbeschläge, Kleiderhaken; Türschliesser, aus unedlen Metallen	8302	13
Glocken, Klingeln, Gongs; Statuetten u.a. Ziergegenstände; Fotorahmen	8306	13
Kühl- und Gefrierschränke; Kompressionskühlschränke; Absorptionskühlschränke; Gefrier- und Tiefkühltruhen	8418	12
(Haushalts-)Geschirrspülmaschinen	8422	12

²⁸ „Gesamtmenge“ bedeutet hier die Kupfermenge sämtlicher in Tab. A-42 und Tab. A-43 aufgelisteter Positionen bzw. Tarifnummern, also auch jener, die < 0.3 % am gesamten Import, Export und Netto-Import ausmachen (jeweils bezogen auf den Kupferanteil).

Positionsbeschreibung	Position	Variablen- zugehörigkeit
Datenverarbeitungsmaschinen und Zubehör	8471	I2
Ventile für ölhydraulische oder pneumatische Energieübertragungen; Rückschlagkappen und -ventile; Überdruck- oder Sicherheitsventile; Regelarmaturen und ähnliche Apparate für Rohr- oder Schlauchleitungen, Dampfkessel, Sammelbehälter, Wannen oder ähnliche Behälter (und Teile davon)	8481	I2
Elektromotoren; Allstrommotoren; Gleichstrommotoren; Einphasen-Wechselstrommotoren; Mehrphasen-Wechselstrommotoren; Alternatoren	8501	I2
Stromerzeugungsaggregate; Umformer, elektrisch, rotierend	8502	I2
div. Transformatoren mit Flüssigkeitsisolation; div. Trockentransformatoren; div. Stromrichter; div. Drosselspulen; und Teile davon	8504	I2
Hebeköpfe; Elektromagnete	8505	I2
Handbohrmaschinen, Handsägen- und -trennmaschinen, Elektrowerkzeuge (handgeführt), Teile davon	8508	I2
Staubsauger, Bohrergeräte, Küchenabfallzerkleinerer, Lebensmittelzerkleinerungsgeräte, Haushaltsgeräte	8509	I2
LötKolben und Lötpistolen, Maschinen, Apparate und Geräte zum elektrischen Hart- oder Weichlöten, zum Widerstandsschweißen von Metallen, zum Lichtbogen- oder Plasmastrahlschweißen von Metallen, Mikro-Drahtschweißgeräte u.a. Schweißgeräte	8515	I2
Boiler, Warmwasserbereiter, Tauchsieder, Speicherheizgeräte, Geräte zum Raum- oder Bodenbeheizen, Haartrockner, Elektrowärmegeräte zur Haarpflege, Händetrockner, Bügeleisen, Mikrowellenöfen, Öfen, Küchenherde, Kochplatten und Bratgeräte, Kaffee- und Teemaschinen, Brotröster, Elektrowärmegeräte für den Haushalt, Teile davon	8516	I2
div. Mikrophone, Lautsprecher, (Telefon-)Hörer, Tonfrequenzverstärker, Tonverstärkereinrichtungen, Teile davon	8518	I2
Videogeräte, mit/ohne Magnetband	8521	I2
Sendegeräte für den Funksprech- oder -telegraphieverkehr, für den Rundfunk oder das Fernsehen, mit eingebautem Empfangsgerät, Fernsehkameras, Video-Einzelbildkameras	8525	I2
Taschen-Radiokassettengeräte, div. Rundfunkempfangsgeräte, Personenrufempfänger, Funkempfangsgeräte (inkl. Rundfunk)	8527	I2
Fernsehgeräte, Video-Monitore, mehrfarbig und monochrom, Video-Projektoren	8528	I2
Wickeldrähte für elektronische Zwecke, aus Kupfer, isoliert, div. Durchmesser; Koaxialkabel und andere koaxiale elektrische Leiter; Zündkabelsätze von der für Beförderungsmittel verwendeten Art; Leiter, elektrisch, isoliert, für Spannungen von > 80 V bis 1000 V und von > 1000 V	8544	I4
Traktoren für die Industrie; Sattel-Strassenzugmaschinen; Raupentraktoren; Traktoren für die Landwirtschaft; andere Traktoren	8701	I1
Personenautomobile und andere hauptsächlich zur Personenbeförderung gebaute Automobile, einschl. Kombiautomobile und Rennwagen	8703	I1
Lastkraftwagen	8704	I1
Photokopierapparate	9009	I2
Gehäuse für Armbanduhren, Taschenuhren und ähnliche Uhren, aus unedlen Metallen	9111	I3

Schwankungen der Daten aus der Aussenhandelsstatistik

Die Importe und die Exporte des Kupfers variieren quasi unabhängig voneinander, daher können die jährlichen Schwankungen der Nettoimporte durch Addition der beiden Grössen entsprechend stark ausfallen. Gemäss der Historischen Statistik der Schweiz variiert der Kupfer-Nettoimport in die Schweiz jährlich um bis zu 100 % (Abb. A-15). Die Daten haben eine hohe zeitliche Auflösung (jährliche Messungen), sind jedoch bezüglich des Erhebungsumfangs hochaggregiert. Daher ist eine genaue Zuordnung nicht möglich; vermutlich beziehen sich die Kupfermengen im Wesentlichen auf das KAPITEL 74 „Kupfer und Waren daraus“ der Aussenhandelsstatistik, vernachlässigen also sämtliches Kupfer in anderen Waren (z.B. Elektro- und Elektronikgeräte).

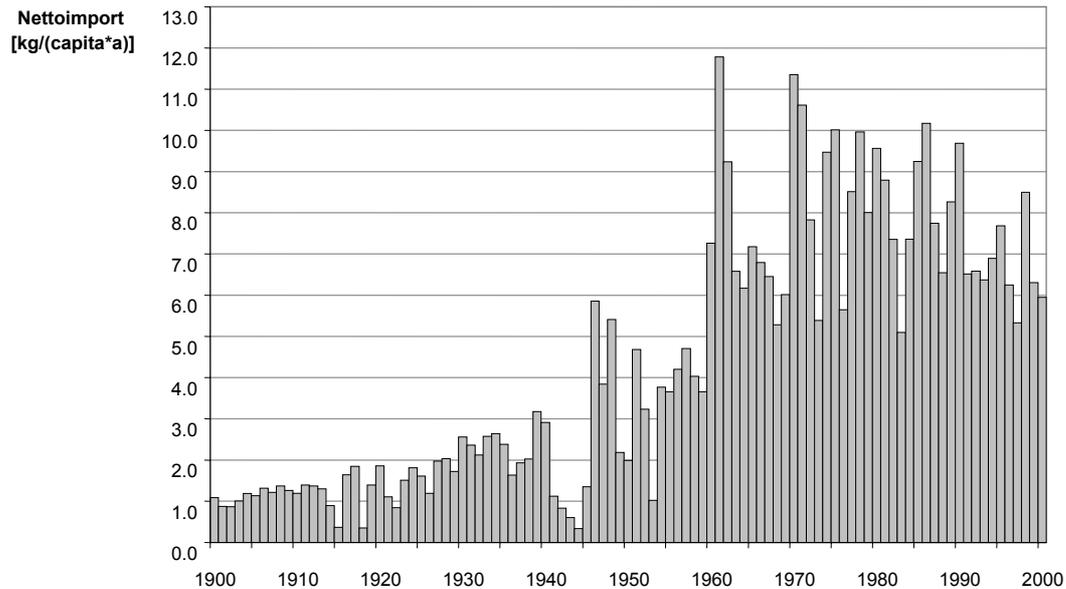


Abb. A-15: Jährlicher Kupfer-Nettoimport in die Schweiz während des 20. Jahrhunderts. Die Nettoimporte sind pro Kopf dargestellt. Für den Erhebungsumfang der Statistik siehe Text. Quelle: RITZMANN-BLICKENSTORFER und SIEGENTHALER (1996).

A.5 Literaturverzeichnis des Anhangs

- 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.
- 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. und BADER, H.-P. (1996). *Regionaler Stoffhaushalt: Erfassung, Bewertung und Steuerung*. Spektrum, Heidelberg, Berlin, Oxford. 420 p.
- BFS (1994). *Schweizerische Verkehrsstatistik*. vol. 11: Schweiz. Bundesamt für Statistik, Neuchâtel.
- BRUGG KABEL (1996). *Energiekabel*. Kabelkatalog (Produktkatalog). Brugg Kabel AG, Brugg.
- EGGENBERGER, H.P. (1990). Wo braucht es Freileitungen - wo sind Kabel möglich? *Strom* 2: 16-18.
- FRIEDRICHS, J. (1973). *Methoden empirischer Sozialforschung*. Rowohlt, Reinbek bei Hamburg. 429 p.
- GÖRG, H. (1997). *Entwicklung eines Prognosemodells für Bauabfälle als Baustein von Stoffstrombetrachtungen zur Kreislaufwirtschaft im Bauwesen*. Diss., Technische Hochschule Darmstadt. Darmstadt. 299 p.
- 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.
- GYSIN, B. (2002). Aufbau einer Haustechnik. Internes Manuskript, Stand 20.11.2002. R. Nussbaum AG, Olten. 4 p.
- HALDIMANN (1991). Rohdaten zum Erstellen des Gebäudesteckbriefs EF II / MB in GÖRG (1997). Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Zürich.
- HENSELER, G., LICHTENSTEIGER, T. und BACCINI, P. (2006). Gebäudepark Schweiz: Die Entwicklung des Gebäudebestandes im 20. Jahrhundert. In: *Bauwerke als Ressourcennutzer und Ressourcenspenden 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.
- HERRMANN, R. (1977). Eingliederung anfallender Baurestmassen in einen ökonomisch orientierten Planungs-, Bau- und Nutzungsprozess. *Bauwirtschaft* 40: 1787-1805.
- HETTENBACH, P. (1992). *Anfall und Wiederverwendbarkeit von abgängigen mineralischen Baustoffen und Erdaushub*. Diss., Universität Karlsruhe (TH). Karlsruhe.
- 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.

- LICHTENSTEIGER, T. (Ed.)(1998). *Ressourcen im Bau: Aspekte einer nachhaltigen Ressourcenbewirtschaftung im Bauwesen*. FORSCHUNGSABTEILUNG STOFFHAUSHALT UND ENTSORGUNGSTECHNIK; EAWAG. PEAK-Kurs. vdf Hochschulverlag an der ETH Zürich, Zürich. 129 p.
- LICHTENSTEIGER, T. (2005). Vorlesungsunterlagen Entsorgungstechnik IV: Sekundärressourcen. Studiengang Umweltingenieurwissenschaften, 9. Semester, ETH Zürich. Zürich.
- 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.
- LINDNER, H. (1985). *Strom. Erzeugung, Verteilung und Anwendung der Elektrizität*. Rowohlt, Reinbek bei Hamburg. 269 p.
- 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.
- MÜLLER, D. (1998). *Modellierung, Simulation und Bewertung des regionalen Holzhaushaltes. Untersuchung zur Wald- und Holzbewirtschaftung in einer nachhaltigen Regionalentwicklung*. Diss. ETH Nr. 12'990, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich. Zürich. 134 p.
- MUTZNER, J. (1995). *Die Stromversorgung der Schweiz: Entwicklung und Struktur*. Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke, Zürich. 40 p.
- OZD (2001). *Schweizerische Aussenhandelsstatistik - Jahresstatistik. Band I, 2000*. OZD SEKTION STATISTIK (Ed.). Eidgenössische Oberzolldirektion, Bern.
- 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. (2003). *Güterflussanalyse der Bauabfallentsorgung des Verwaltungszentrum Werd*. Schlussbericht. Wertstoff-Börse GmbH, Zürich. 28 p.
- SCHMITT, H. und HEENE, A. (1996). *Hochbaukonstruktion. Die Bauteile und das Bauegefüge: Grundlagen des heutigen Bauens*. 13., aktual. Aufl., Vieweg, Braunschweig, Wiesbaden. 756 p.
- SCHULZE, H.-J. und WALTHER, P. (1990). *Gebäudeatlas - Mehrfamilienwohngebäude der Baujahre 1880 bis 1980*. Bauinformation DDR, Berlin.
- STUCKI, J. (2002). Auskunft zum Einbau von Aufzügen in Wohngebäuden: Technisches und Markttrends. Persönliche Mitteilung vom 22.10.02. Schindler Aufzüge AG, Winterthur.
- WEBER, R. (1990). *Aluminium Lexikon. Herstellung, Anwendung, Umweltschutz: Der Werkstoff von A bis Z*. Informationsstelle für Aluminium und Umwelt (INFALUM), Zürich. 279 p.
- ZELTNER, C. (1992). *Eisen in KVA-Schlacken*. Diplomarbeit, Abteilung Werkstoffe, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich. Zürich.

Curriculum vitae

Dominic Wittmer

Geburtsdatum	18.08.1972
Geburtsort	Bad Bergzabern, Deutschland
Nationalität	deutsch

Ausbildung

2001 – 2005	Doktorat und Lehrassistentz an der Professur für <i>Stoffhaushalt und Entsorgungstechnik</i> , ETH Zürich, Departement Bau, Umwelt und Geomatik, und dem gleichnamigen Forschungsbereich an der Eawag, Dübendorf
1995 – 2001	Geologie-Studium und Diplom an der Johannes Gutenberg-Universität Mainz
2000	Strukturgeologische Diplomarbeit im Gesteinsdeformationslabor an der ETH Zürich, Departement Erdwissenschaften Thema: Effects of the orientation on the uniaxial deformation of quartz single crystals
1997	Marin-geologisches Praktikum am Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung (AWI), Bremerhaven
1997	<i>Intensive English Program</i> , Level Advanced an der Northeastern University in Boston, Massachusetts
1993 – 1995	Physik-Studium an der Johannes Gutenberg-Universität Mainz
1992 – 1993	Wehrdienst bei der Bundeswehr
1983 – 1992	Gymnasium, Dahn (D)
1979 – 1983	Grundschule, Silz und Gossersweiler-Stein (D)

Berufstätigkeit

1998 – 2000	Abteilung Organisation und Datenverarbeitung bei der Allgemeinen Kreditversicherung Coface AG, Mainz
1998 – 1999	Arbeitsgruppe Sedimentologie und Arbeitsgruppe Tektonophysik im Fachbereich Geowissenschaften, Universität Mainz
1995 – 1996	Informationssysteme für Verkehr und Technik GmbH, Oppenheim (D)