

Sören Steger
Miriam Fekkak
Dr. Stefan Bringezu (Projektleitung)

Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH

Materialbestand und Materialflüsse in Infrastrukturen

Meilensteinbericht des Arbeitspakets 2.3 des Projekts
„Materialeffizienz und Ressourcenschonung“ (MaRes)



Kontakt zu den Autor(inn)en:

Sören Steger

Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH
42103 Wuppertal, Döppersberg 19

Tel.: +49 (0) 202 2492 -162, Fax: -138

Mail: soeren.steger@wupperinst.org

**„Materialeffizienz und Ressourcenschonung“
(MaRes) – Projekt im Auftrag des BMU | UBA**

Projektlaufzeit: 07/2007 – 12/2010

Projektleitung:

Dr. Kora Kristof / Prof. Dr. Peter Hennicke

Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH
42103 Wuppertal, Döppersberg 19

Tel.: +49 (0) 202 2492 -183 / -136, Fax: -198 / -145

Mail: kora.kristof@wupperinst.org

peter.hennicke@wupperinst.org

© Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH

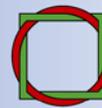
Weitere Informationen zum Projekt

„Materialeffizienz und Ressourcenschonung“ (MaRes)

finden Sie unter **www.ressourcen.wupperinst.org**

Gefördert wird das Vorhaben im Rahmen des UFOPLAN
durch das BMU und das UBA, Förderkennzeichen: 3707 93 300

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung
liegt bei den Autor(inn)en.



Wuppertal Institut
für Klima, Umwelt, Energie
GmbH

Wuppertal Institut
in Kooperation mit

BASF
Borderstep
CSCP
Daimler
demea – VDI / VDE-IT
ECN
EFA NRW
FhG IAO
FhG UMSICHT
FU Berlin
GoYa!
GWS
Hochschule Pforzheim
IFEU
Institut für Verbraucherjournalismus
IÖW
IZT
MediaCompany
Ökopol
RWTH Aachen
SRH Hochschule Calw
Stiftung Warentest
ThyssenKrupp
Trifolium
TU Berlin
TU Darmstadt
TU Dresden
Universität Kassel
Universität Lüneburg
ZEW



Bundesministerium
für Umwelt, Naturschutz
und Reaktorsicherheit

**Umwelt
Bundes
Amt**
Für Mensch und Umwelt

MaRes AP 2.3. Öffentliche Infrastrukturen

Endbericht

Sören Steger

Miriam Fekkak

Dr. Stefan Bringezu (Projektleitung)

(alle WI)

Wuppertal, 1. Juli 2011

Inhaltsverzeichnis

Vorwort und Danksagung	xiv
1 Einleitung	1
2 Methodische Vorgehensweise	2
3 Verkehrsinfrastruktur	6
3.1 Straßeninfrastruktur	6
3.1.1 Straßenaufbau	6
3.1.2 Materialbestand der Straßeninfrastruktur	11
3.1.3 Jährliche Materialflüsse für den Neu- und Ausbau der Straßeninfrastruktur	14
3.1.4 Jährliche Materialflüsse für die Instandhaltung der Straßeninfrastruktur	17
3.2 Materialbestand und jährliche Materialflüsse für Ingenieurbauwerke der Bundesfernstraßen	20
3.2.1 Ingenieurbauwerke: Brücken und Tunnel	20
3.2.2 Materialbestand der Ingenieurbauwerke an Bundesfernstraßen	21
3.2.3 Jährliche Materialflüsse für den Neu- und Ausbau von Ingenieurbauwerken an Bundesfernstraßen	22
3.2.4 Jährliche Materialflüsse für die Instandhaltung von Ingenieurbauwerken an Bundesfernstraßen	23
3.3 Schieneninfrastrukturen	25
3.3.1 Netzlänge und Aufbau der Schieneninfrastruktur in Deutschland	25
3.3.2 Materialbestand der Schieneninfrastrukturen	32
3.3.3 Jährlicher Materialbedarf für Neu- und Ausbau der Schieneninfrastruktur	39
3.3.4 Jährlicher Materialbedarf für die Erneuerung und Instandhaltung der Schieneninfrastruktur	42
3.4 Wasserstraßen	46
3.4.1 Materialbestand der Wasserstraßen-Infrastrukturen	48

3.4.2	Jährlicher Materialbedarf der Wasserstraßen-Infrastrukturen	52
3.5	Kumulierter Materialaufwand	55
3.5.1	Straßeninfrastruktur	56
3.5.2	Ingenieurbauwerke der Bundesfernstraßen	56
3.5.3	Schieneinfrastruktur	58
3.5.4	Wasserstraßen	59
3.6	Zusammenfassung Verkehrsinfrastrukturen	61
4	Trink- und Abwasserinfrastruktur	65
4.1	Materialbestände und –flüsse der Infrastrukturen der Wasserversorgung	67
4.1.1	Talsperren	68
4.1.2	Brunnen	73
4.1.3	Quellwasserfassungen	74
4.1.4	Wasserwerke	75
4.1.5	Versorgungsnetz	78
4.1.6	Trinkwasserspeicher	84
4.1.7	Pumpwerke	88
4.2	Materialbestände und –flüsse der Infrastrukturen der Abwasserentsorgung	90
4.2.1	Kanalisation	91
4.2.2	Schächte	101
4.2.3	Pumpwerke	106
4.2.4	Regenentlastungsanlagen	107
4.2.5	Kläranlagen	110
4.3	Kumulierter Materialaufwand	116
4.4	Zusammenfassung Wasserinfrastruktur	119
5	Energieinfrastruktur	122
5.1	Energieverteilung	123
5.1.1	Elektrizitätsnetz	123
5.1.2	Erdgasnetz	134
5.1.3	Das Fernwärmenetz in Deutschland	142

5.2	Infrastruktureinrichtungen zur Energieerzeugung _____	151
5.2.1	Materialbestand und Materialflüsse der Braunkohle- und Steinkohlekraftwerke _____	152
5.2.2	Materialbestand und Materialflüsse der Erdgaskraftwerke _____	158
5.2.3	Materialbestand und Materialflüsse von Blockheizkraftwerken (BHKW) _____	161
5.2.4	Materialbestand und Materialflüsse der Kernkraftwerke _____	164
5.2.5	Materialbestand und Materialflüsse der Wasserkraftanlagen _____	167
5.2.6	Materialbestand und Materialflüsse der Windenergieanlagen _____	171
5.2.7	Materialbestand und Materialflüsse der Biogasinfrastuktur _____	178
5.3	Kumulierter Materialaufwand der Energieinfrastruktur _____	186
5.4	Zusammenfassung Energieinfrastruktur _____	189
6	Überblick über die jährlichen Materialflüsse unter Einbeziehung der Abbruchmengen und ihrer Behandlung / Verwertung _____	196
6.1	Straßeninfrastruktur _____	198
6.2	Ingenieurbauwerke der Bundesfernstraßen _____	200
6.3	Schieneinfrastruktur _____	201
6.4	Wasserstraßen _____	204
6.5	Wasserinfrastruktur _____	206
6.6	Abwasserinfrastruktur _____	210
6.7	Energieverteilung _____	214
6.8	Energieerzeugung _____	218
7	Zusammenfassung und Handlungsempfehlungen _____	222
8	Literatur _____	237
9	Anhang _____	251

Abbildungen

Abb. 1: Querschnitt einer Asphaltstraße	7
Abb. 2: Schema zur Abschätzung des Straßenbestandes (nach Ulbricht 2006)	10
Abb. 3: Übersicht über die Binnenwasserstraßen des Bundes (klassifiziert)	47
Abb. 4: System der Wasserver- und Abwasserentsorgung	66
Abb. 5: Anlagen der Wasserversorgung	68
Abb. 6: Anlagen der Wasserentsorgung	90
Abb. 7: Misch- und Trennkanalisation	92
Abb. 8: Schematischer Aufbau eines Einstiegsschachtes	102
Abb. 9: Übersicht über Netzformen der Fernwärmeversorgung	144
Abb. 10: Windenergieanlagen in Deutschland	172
Abb. 11: Zuwachs und Bestand an Biogasanlagen	183
Abb. 12: Flussdiagramm mineralische Rohstoffe Straßeninfrastruktur	199
Abb. 13: Flussdiagramm für Stahl und Beton in Ingenieurbauwerken der Bundesfernstraßen	200
Abb. 14: Flussdiagramm der mineralischen Rohstoffe der Schieneninfrastruktur (ohne Metalle)	202
Abb. 15: Flussdiagramm der metallischen Rohstoffe der Schieneninfrastruktur	203
Abb. 16: Flussdiagramm Kunststoffe und sonstige Materialien der Schieneninfrastruktur	204
Abb. 17: Flussdiagramm der mineralischen Baustoffe in Wasserstraßen – Infrastrukturen	205
Abb. 18: Flussdiagramm der metallischen Rohstoffe in Wasserstraßen	206
Abb. 19: Flussdiagramm der jährlichen Materialflüsse in Wasserinfrastrukturen	208
Abb. 20: Flussdiagramm der metallischen Rohstoffe in Wasserinfrastrukturen	209
Abb. 21: Flussdiagramm der Kunststoffe und sonstigen Materialien in Wasserinfrastrukturen	210
Abb. 22: Flussdiagramm der mineralischen Rohstoffe in Abwasserinfrastrukturen	212
Abb. 23: Flussdiagramm der metallischen Rohstoffe in Abwasserinfrastrukturen	213
Abb. 24: Flussdiagramm der Kunststoffe und sonstigen Materialien in Abwasserinfrastrukturen	214

Abb. 25: Materialflussdiagramm mineralische Rohstoffe der Energieverteilung	216
Abb. 26: Materialflussdiagramm metallische Rohstoffe der Energieverteilung	217
Abb. 27: Materialflussdiagramm Kunststoffe und sonstige Rohstoffe der Energieverteilung	218
Abb. 28: Materialflussdiagramm mineralische Rohstoffe der Energieerzeugung	219
Abb. 29: Materialflussdiagramm metallische Rohstoffe der Energieerzeugung	220
Abb. 30: Materialflussdiagramm Kunststoffe und sonstige Materialien der Energieerzeugung	221

Tabellen

Tab. 1: Bauklassen unterschiedlicher Straßentypen _____	7
Tab. 2: Längen- und Flächenverteilung Gesamtstraßennetz in Deutschland (2007) _____	11
Tab. 3: Spezifische Materialkoeffizienten im Straßenbereich _____	12
Tab. 4: Materialbestand Straßennetz in Deutschland _____	12
Tab. 5: Materialbestand der Straßeninfrastruktur bei einer Straßenbreite von 4 m für Gemeindestraßen _____	13
Tab. 6: Materialbestand der Straßeninfrastruktur bei einer Straßenbreite von 7 m für Gemeindestraßen _____	14
Tab. 7: Durchschnittliche jährliche Veränderung der Straßenlängen 2001 bis 2008 in km _____	16
Tab. 8: Jährlicher Anstieg der Straßenfläche aus Neubau und Erweiterung _____	16
Tab. 9: Jährlicher Materialbedarf für Neubau und Erweiterung der Straßeninfrastruktur _____	17
Tab. 10: Jährlicher Materialbedarf für Wartung und Instandhaltung der Straßeninfrastruktur _____	18
Tab. 11: Verwendete Lebensdauer nach Straßentyp und Straßenschicht _____	18
Tab. 12: Brückenformen _____	21
Tab. 13: Errechnete mittlere Dimensionierung einer Brücke nach Brückentyp _____	21
Tab. 14: Materialbestand Straßentunnel _____	22
Tab. 15: Aufteilung der jährlich neu erbauten Brücken und Tunnel an Bundesfernstraßen _____	23
Tab. 16: Jährlicher Materialbedarf für den Neubau von Brücken und Tunneln der Bundesfernstraßen _____	23
Tab. 17: Gleislänge des deutschen Schienennetzes im Jahr 2007 (km) _____	25
Tab. 18: Aufteilung der Gleis-Kilometer nach Bauart _____	32
Tab. 19: Spezifische Materialkoeffizienten Bahnschwellen _____	33
Tab. 20: Spezifische Materialkoeffizienten Befestigung Schienen _____	34
Tab. 21: Spezifischer Materialkoeffizient Bahnschotter _____	34
Tab. 22: Spezifischer Materialkoeffizient Feste Fahrbahn _____	34
Tab. 23: Spezifischer Materialkoeffizient Bahnschienen _____	35

Tab. 24: Spezifischer Materialkoeffizient Oberleitungsmasten _____	36
Tab. 25: Spezifischer Materialkoeffizient Oberleitungsdraht _____	36
Tab. 26: Materialbedarf Unterwerke _____	37
Tab. 27: Spezifische Materialkoeffizienten Signaltechnik _____	37
Tab. 28: Spezifischer Materialbedarf Personenbahnhöfe _____	38
Tab. 29: Spezifischer Materialbedarf Güterbahnhöfe und Instandhaltungswerke ____	38
Tab. 30: Spezifischer Materialbedarf Eisenbahnbrücken _____	38
Tab. 31: Spezifischer Materialbedarf von Eisenbahntunneln _____	39
Tab. 32: Materialbestand Schieneninfrastruktur _____	39
Tab. 33: Entwicklung des Schienennetzes (km) _____	40
Tab. 34: Jährlicher Materialbedarf für Neu- und Ausbau der Schieneninfrastruktur _____	42
Tab. 35: Jährlicher Materialaufwand für Instandhaltung über technische Lebensdauer abgeleitet _____	43
Tab. 36: Jährlicher Materialaufwand für Instandhaltung abgeschätzt über jährlichen Ersatzbedarf _____	44
Tab. 37: Länge deutscher Binnenwasserstraßen 2005 _____	48
Tab. 38: Materialbestand Kanalabdichtungen _____	49
Tab. 39: Materialbestand Uferbefestigungen an Wasserstraßen _____	49
Tab. 40: Materialbestand Schleusen _____	50
Tab. 41: Materialbestand Binnenhäfen _____	51
Tab. 42: Materialbestand Seehäfen _____	51
Tab. 43: Materialbestand Wasserstraßen in Deutschland _____	52
Tab. 44: Geplanter Neubau und Erweiterung von Schleusen _____	53
Tab. 45: Jährliche Materialflüsse Wasserstraßen durch Neubau und Erweiterung ____	54
Tab. 46: Nutzungsdauern der Anlageinfrastruktur Wasserstraßen _____	54
Tab. 47: Kumulierter Materialaufwand der Straßeninfrastruktur _____	56
Tab. 48: Kumulierter Materialaufwand der Brücken der Bundesfernstraßen _____	57
Tab. 49: Kumulierter Materialaufwand der Tunnel der Bundesfernstraßen _____	57
Tab. 50: Kumulierter Materialaufwand der Schieneninfrastruktur _____	58
Tab. 51: Kumulierter Materialaufwand der Wasserstraßeninfrastruktur _____	60
Tab. 52: Übersicht über den Materialbestand im Verkehr _____	62

Tab. 53: Übersicht über die jährlichen Flüsse für Neubau und Erweiterung der Verkehrsinfrastrukturen _____	63
Tab. 54: Übersicht über die jährlichen Flüsse für Instandhaltung der Verkehrsinfrastrukturen _____	64
Tab. 55: Talsperren nach Bauwerkstyp und Bauwerksvolumen _____	69
Tab. 56: Materialbestand Talsperren in Deutschland _____	70
Tab. 57: Neubauprojekte im Talsperren- / Speicherbau _____	72
Tab. 58: Jährliche durchschnittliche Zunahme Talsperren / Dämme durch Neubau _____	72
Tab. 59: Beispieldaten zur Materialintensität von Brunnen _____	74
Tab. 60: Verfahren der Grundwasseraufbereitung und erforderliche Anlagen _____	75
Tab. 61: Materialbestand Wasserwerke in Deutschland _____	77
Tab. 62: Größenverteilung Leitungsnetz in Deutschland (geschätzt) _____	78
Tab. 63: Materialverteilung Leitungsnetz 1999 (größenunabhängig) _____	79
Tab. 64: Materialbestand Armaturen im Leitungsnetz _____	80
Tab. 65: Materialbestand Sandbettung im Leitungsnetz _____	81
Tab. 66: Materialbestand Leitungsnetz in Deutschland _____	81
Tab. 67: Jährlicher Materialbedarf im Leitungsnetz durch Neubau _____	82
Tab. 68: Jährlicher Materialinput Leitungsnetz durch Netzerneuerung _____	83
Tab. 69: Jährlicher Materialoutput Leitungsnetz durch Netzerneuerung _____	84
Tab. 70: Größenverteilung Wasserspeicher in Deutschland (geschätzt) _____	86
Tab. 71: Materialbestand Wasserspeicher in Deutschland _____	86
Tab. 72: Jährlicher Materialbedarf Trinkwasserspeicher durch Neubau _____	87
Tab. 73: Jährliche Materialzunahme Trinkwasserspeicher durch Sanierung _____	88
Tab. 74: Größenverteilung und Querschnittsformen Kanalnetz (geschätzt) _____	95
Tab. 75: Materialverteilung Kanalnetz nach Größe geschätzt _____	96
Tab. 76: Materialbestand Kanalnetz in Deutschland 2007 _____	96
Tab. 77: Jährlicher Materialbedarf im Kanalnetz durch Neubau in Deutschland _____	97
Tab. 78: Anteile der unterschiedlichen Sanierungsverfahren im deutschen Kanalnetz _____	98
Tab. 79: Jährlicher Materialbedarf im Kanalnetz durch Sanierung (Renovierung und Erneuerung) _____	100
Tab. 80: Jährlicher Abbruch Kanalnetz in Deutschland durch offene Erneuerung _____	101

Tab. 81: Werkstoffverteilung der Schachtsysteme in % des gesamten Abwasserschachtbestandes _____	104
Tab. 82: Materialbestand Schächte in Deutschland 2007 _____	104
Tab. 83: Jährliche Zu- und Abgänge Kanalschächte durch Neubau und Sanierung _____	106
Tab. 84: Materialbestand Regenentlastungsanlagen nach Speichervolumen (geschätzt) _____	108
Tab. 85: Materialbestand Regenentlastungsanlagen in Deutschland 2007 _____	109
Tab. 86: Jährlicher Materialbedarf für Regenüberlaufbecken (RÜB) und Regenklärbecken (RKB) durch Neubau _____	110
Tab. 87: Kläranlagenbauwerke nach ihrem Zweck _____	111
Tab. 88: Kläranlagen in Deutschland nach Größenklassen und Kapazität 2007 _____	111
Tab. 89: Materialeinsatz für die Errichtung ausgewählter Kläranlagen in Deutschland und der Schweiz _____	112
Tab. 90: Materialeinsatz-Faktoren Beton und Stahl für Kläranlagen _____	112
Tab. 91: Materialeinsatz Kläranlage nach Reckerzügl 1997 _____	113
Tab. 92: Materialbestand Kläranlagen in Deutschland _____	113
Tab. 93: Materialbestand pro Kläranlage 2007 nach Größenklasse _____	114
Tab. 94: Jährliche Materialflüsse durch Neu- und Rückbau von Kläranlagen _____	115
Tab. 95: Kumulierter Materialaufwand der Wasserinfrastruktur _____	116
Tab. 96: Kumulierter Materialaufwand der Abwasserinfrastruktur _____	117
Tab. 97: Übersicht Materialbestand der Wasser- und Abwasserinfrastrukturen _____	120
Tab. 98: Jährliche Flüsse der Wasser- und Abwasserinfrastrukturen _____	121
Tab. 99: Stromnetz in Deutschland im Jahr 2008 _____	123
Tab. 100: Spezifischer Materialbedarf Erdkabel in t/km _____	125
Tab. 101: Spezifischer Materialbedarf Freileitungsdraht _____	126
Tab. 102: Dimensionierung und Anzahl an Freileitungsmasten _____	127
Tab. 103: Gewicht pro Freileitungsmast _____	127
Tab. 104: Materialbedarf für den Bestand an Freileitungsmasten _____	128
Tab. 105: Spezifischer Materialbedarf Transformatoren _____	128
Tab. 106: Materialbestand Stromnetz _____	129
Tab. 107: Investitionen der Netzbetreiber in das Stromnetz 2007 und 2008 _____	130
Tab. 108: Jährlicher Neubau und Erneuerung des Stromnetzes in km _____	131

Tab. 109: Jährlicher Materialbedarfe für den Aus- und Neubau des Stromnetzes abgeleitet aus den Daten von 1998-2008 _____	132
Tab. 110: Jährlicher Materialbedarf für die Erneuerung des Stromnetzes, abgeleitet aus den Daten von 1998-2008 _____	133
Tab. 111: Jährliche Menge an Abbruchmaterial aus Frei- und Kabelleitungen im Stromnetz, abgeleitet aus den Daten von 1998-2008 _____	134
Tab. 112: Spezifischer Materialbedarf des Gasfernleitungsnetzes _____	137
Tab. 113: Materialbestand des Fernleitungsgasnetzes _____	138
Tab. 114: Materialbestand des regionalen und örtlichen Erdgasnetzes _____	139
Tab. 115: Ausbau und Erneuerung des Gasnetzes _____	140
Tab. 116: Jährlicher Materialbedarf für Neu- und Ausbau im Ferngasnetz abgeleitet aus den Daten von 1998-2008 _____	141
Tab. 117: Jährlicher Materialbedarf für Neu- und Ausbau im Verteilungsnetz abgeleitet aus den Daten von 1998-2008 _____	141
Tab. 118: Materialverbrauch für die jährliche Erneuerung des Ferngasnetz in t abgeleitet aus den Daten von 1998-2008 _____	141
Tab. 119: Materialverbrauch für die jährliche Erneuerung des VNB abgeleitet aus den Daten von 1998-2008 _____	142
Tab. 120: Struktur des Fernwärmenetzes 1988 _____	146
Tab. 121: Verwendete Nenndurchmesser im Fernwärmenetz 1988 _____	147
Tab. 122: Struktur des Fernwärmenetzes in 2006 _____	147
Tab. 123: Materialbestand Fernwärmenetz in t _____	149
Tab. 124: Spezifischer Materialbedarf und Materialbestand von Nahwärmenetzen _	150
Tab. 125: Bestand an Kraftwerken in Deutschland _____	151
Tab. 126: Kraftwerkstypen _____	152
Tab. 127: Materialbestand der Steinkohlekraftwerke _____	154
Tab. 128: Materialbestand der Braunkohlekraftwerke _____	155
Tab. 129: Materialbedarf für den aktuellen Neubau von Kohlekraftwerken (3 BKW, 9 SKW) pro Jahr _____	157
Tab. 130: Jährlicher Materialbedarf für Instandhaltung, abgeleitet über die technische Lebensdauer von 40 Jahren _____	158
Tab. 131: Materialbestand der Gaskraftwerke in Deutschland _____	160
Tab. 132: Jährlicher Materialbedarf für Neubau und Instandhaltung von Erdgaskraftwerken _____	161

Tab. 133: Spezifischer Materialbedarf pro BHKW nach verschiedenen Leistungsklassen _____	163
Tab. 134: Materialbestand und jährlicher Materialbedarf für BHKW _____	164
Tab. 135: Materialbestand der deutschen Kernkraftwerke _____	165
Tab. 136: Jährlicher Materialbedarf für Instandhaltung, abgeleitet aus der technischen Lebensdauer _____	166
Tab. 137: Materialbestand Laufwasserkraftwerke Deutschland _____	169
Tab. 138: Jährlicher Materialbedarf für die Instandhaltung des Bestandes an LWK _____	171
Tab. 139: Materialbestand Windenergieanlagen in Deutschland _____	174
Tab. 140: Jährlicher Materialbedarf für den Zubau von Windenergieanlagen _____	176
Tab. 141: Jährlicher Materialbedarf für Repowering von Windenergieanlagen _____	177
Tab. 142: Jährliche Rückbaumengen an Windenergieanlagen im Rahmen von Repowering _____	178
Tab. 143: Materialbestand der Biogasanlagen (ohne BHKW) _____	181
Tab. 144: Jährlicher Materialbedarf für den Zubau von Biogasanlagen (ohne BHKW) _____	184
Tab. 145: Jährlicher Materialbedarf für Instandhaltung von Biogasanlagen (ohne BHKW) _____	185
Tab. 152: Kumulierter Materialaufwand der Energieerzeugungsinfrastruktur _____	187
Tab. 153: Kumulierter Materialaufwand der Energieverteilungsinfrastruktur _____	188
Tab. 146: Übersicht über den Materialbestand der Energieerzeugung (in Tonnen) _____	190
Tab. 147: Übersicht über den Materialbestand der Energieverteilung (in Tonnen) _____	191
Tab. 148: Jährlicher Materialbedarf für den Neubau von Einrichtungen der Energieerzeugung _____	192
Tab. 149: Jährlicher Materialbedarf für den Neubau und Erweiterung der Energieverteilungsinfrastruktur _____	193
Tab. 150: Jährlicher Materialbedarf für die Instandhaltung der Energieerzeugungsinfrastruktur _____	194
Tab. 151: Jährlicher Materialbedarf für Instandhaltung Energienetze _____	195
Tab. 154: Übersicht über die erfolgten Berechnungen _____	197
Tab. 155: Jährliche Materialflüsse Wasserinfrastrukturen _____	207
Tab. 156: Jährliche Materialflüsse Abwasserinfrastrukturen _____	211

Tab. 157: Übersicht über den Materialbestand an mineralischen Rohstoffen_____	226
Tab. 158: Übersicht über den Materialbestand an metallischen Rohstoffen_____	227
Tab. 159: Übersicht über den Materialbestand an Kunststoffen und sonstigen Materialien_____	228
Tab. 160: Übersicht über den jährlichen Materialbedarf an mineralischen Rohstoffen für den Neu- und Ausbau _____	229
Tab. 161: Übersicht über den jährlichen Materialbedarf an metallischen Rohstoffen für Neu- und Ausbau _____	230
Tab. 162: Übersicht über den jährlichen Materialbedarf an Kunststoffen und sonstigen Rohstoffen für den Neu- und Ausbau_____	231
Tab. 163: Übersicht über den jährlichen Materialbedarf an mineralischen Rohstoffen für die Instandhaltung_____	232
Tab. 164: Übersicht über den jährlichen Materialbedarf an metallischen Rohstoffen für die Instandhaltung_____	233
Tab. 165: Übersicht über den jährlichen Materialbedarf an Kunststoffen und sonstigen Rohstoffen für die Instandhaltung _____	234
Tab. 166: Anteil des jährlichen Materialbedarfs der drei Infrastruktursysteme am Gesamtverbrauch bzw –produktion an ausgewählten Rohstoffen _____	235

Vorwort und Danksagung

Die Inhalte des vorliegenden Endberichtes sind in einer intensiven Zusammenarbeit einer Vielzahl von unterschiedlichen Personen entstanden:

Unser Dank geht an alle Experten verschiedenster wissenschaftlichen Einrichtungen für ihre inhaltlichen Hinweise und Ratschläge, sowie an die Mitarbeiter in unterschiedlichen Unternehmen der Wasser- und Abwasserwirtschaft, verschiedener Stadtwerke und Energieversorgern für die Bereitstellung von konkreten Netzdaten ihrer Unternehmen. Weiterhin möchten wir uns ganz herzlich beim BDEW für die zur Verfügung gestellte Zeit und internen Daten, sowie für die inhaltliche Diskussion bedanken.

Unser besonderer Dank gilt den Teilnehmenden des Experten-Workshops, die die umfangreichen Zwischenberichte im Vorfeld der Workshops innerhalb eines kurzen Zeitraums lesen mussten und im Workshop intensiv mit uns diskutiert haben. Sie gaben wichtige Anregungen und Impulse, die in die Projektergebnisse insgesamt und diese Veröffentlichung eingeflossen sind.

Weiterhin möchten wir uns bei Dr. Michael Scharp (IZT) für die nette Zusammenarbeit innerhalb des AS 2.3 „Infrastrukturen“ bedanken. Die Zusammenarbeit verlief in einer sehr angenehmen Atmosphäre.

Zudem bedanken wir uns für die umfangreiche Unterstützung durch Sabina Lischka und Martin Erren bei der Erstellung des ersten Zwischenberichtes. Louisa Lösing gebührt Dank für die Unterstützung während des Expertenworkshops.

Nicht zuletzt möchten wir uns ganz herzlich für die wertvollen und hilfreichen Kommentare und Anregungen von Dr. Stefan Bringezu (Projektleitung AP2, Wuppertal Institut) sowie von Frau Penn-Bressel und Frau Dickow-Hahn (Fachbegleitung Umweltbundesamt) bedanken.

Sören Steger und Miriam Fekkak

1 Einleitung

Die Errichtung und Erhaltung von Infrastruktursystemen benötigen jedes Jahr große Mengen unterschiedlicher Ressourcen. Infrastruktursysteme verfügen in der Regel über eine sehr lange Lebensdauer und haben damit neben ihren verschiedenen Funktionen auch den Charakter eines Rohstofflagers. Mit dem Wachstum dieses Materiallagers nimmt der Aufwand für die Unterhaltung der Systeme zu, auch wachsen die Menge der künftigen Abfallstoffe und damit zum einen der Aufwand für das Abfallmanagement und zum anderen das potenzielle Angebot von Sekundärrohstoffen.

Aufgabe von AS2.3 des MaRes-Projektes war es, relevante Infrastrukturen in Deutschland hinsichtlich ihres jährlichen Materialbedarfs für Instandhaltung und Neubau, sowie ihrer gespeicherten Materialien (Stoffdepots) zu analysieren. Aufbauend auf den gewonnenen Kenntnissen sollen erste Handlungsansätze zur Ressourcenschonung abgeleitet werden. Ziel ist ein nachhaltiges Ressourcenmanagement, das den Verbrauch an Primärrohstoffen absolut verringert und den Anteil an Sekundärrohstoffen erhöht. Dazu ist die Schaffung einer konsistenten Datengrundlage von elementarer Bedeutung.

Ver- und Entsorgungssysteme sind neben Verkehrssystemen Bestandteil der technisch-materiellen Infrastruktur¹ und damit Teil der stetig wachsenden Technosphäre (Bringezu 2000, 1). Sie sind gekennzeichnet durch eine weitgehende Leitungsgebundenheit der Transporteinrichtungen (Rohrnetz, Freileitung, Kabel) sowie die Standortgebundenheit der Anlagen (Wasserbehälter, Kläranlagen, Kraftwerk, Funkmast).

Die Netzinfrastruktur wächst bislang mit der Siedlungsentwicklung durch Ausbau und Erweiterung. Kennzeichnend sind hohe Investitionen sowohl in die Einrichtung als auch die Instandhaltung, lange Planungszeiträume und Bauzeiten (Tietz 2005). Bedingt durch die hohen Fixkosten und, damit verbunden, eine notwendige hohe Kapazitätsauslastung haben sich in der Vergangenheit zentrale Strukturen der Ver- und Entsorgung herausgebildet, um mögliche ökonomische Größenvorteile zu erzielen. Diese zentralen Strukturen bedeuten allerdings auch ein starkes Beharrungsvermögen und eine gewisse Inflexibilität bei der Anpassung an geänderte Rahmenbedingungen (z.B. demographischer Wandel). Ein weiteres wesentliches Merkmal der Infrastruktursysteme ist ihre hohe Langlebigkeit: Wasserrohre z.B. haben eine Nutzungsdauer von bis zu 100 Jahren.

Anhand des Kriteriums „Netzgebundenheit“ wurden folgende Infrastruktursysteme ausgewählt und innerhalb von MaRes AS2.3 untersucht:

- Verkehrsnetze,
- Trink- / Abwassernetze,

¹ Im Gegensatz zur technischen Infrastruktur werden unter sozialer Infrastruktur soziokulturelle Einrichtungen wie Bildung, Kultur, Gesundheit und Freizeit subsumiert (Tietz 2006: 7), die hier nicht betrachtet werden

- Telekommunikations-Netze (Festnetz, Mobilfunk), externer Endbericht (Scharp 2010),
- Elektrizitäts-, Gas- und Fernwärmenetze (inkl. Energieerzeugungsinfrastruktur).

2 Methodische Vorgehensweise

MaRes AS2.3 gliederte sich in 4 Projektphasen, die aufeinander aufbauend von 2007 bis 2010 bearbeitet wurden. In Projektphase 1 wurden zunächst die relevanten Bestandteile der einzelnen Infrastruktursysteme nach Funktionsweise und Aufbau beschrieben. Ziel der ersten Projektphase war eine Einschätzung, welche Teile der betrachteten Infrastruktursysteme von ihrer Bedeutung für den Gesamtressourcenbedarf im System relevant sind (sowohl im Bestand als auch in ihren jährlichen Stoffflüssen).

Die Auswahl der für die weitere Analyse relevanten Infrastrukturtypen basierte auf einer vergleichenden Einschätzung der Relevanz der verschiedenen Infrastruktursysteme, welche jeweils anhand verschiedener Kriterien abgeleitet wurden. Die zu diesem frühen Projektzeitpunkt vorhandenen Daten ließen allerdings nur eine grobe Abgrenzung in fünf Stufen von ++ (sehr hoch/sehr gut), + (hoch/gut), 0 (durchschnittlich), - (gering/schlecht) bis -- (sehr gering/sehr schlecht) zu. Folgende Kriterien dienten zur Auswahl der Referenzsysteme:

- **Bedeutung als Materiallager:** hier wurde die mögliche Größenordnung der gebundenen Materialien je Infrastrukturbestandteil abgeschätzt. Die Angaben basierten zum Großteil auf ersten Schätzungen im möglichen Bereich von Zehnerpotenzen;
- **Mögliche jährliche Erneuerungsrate:** eine vorläufige Abschätzung der vermuteten Größenordnung möglichst im langjährigen Mittel. Eine Annäherung erfolgte zum einen über die Lebensdauer der Infrastrukturtelbereiche und zum anderen über die vermutete Altersstruktur;
- **Möglicher Sanierungsbedarf:** der geschätzte mögliche Sanierungsbedarf in den nächsten zehn Jahren. Aus unterschiedlichen Gründen kann die Nutzungsdauer weit über die Lebensdauer hinausreichen und einen Sanierungsstau verursachen. Teilweise sind Bauteile auch schon weit vor Ende der angegebenen Lebensdauer sanierungsbedürftig;
- **Möglicher Erweiterungsbedarf:** eine Abschätzung des Wachstums des Bestandes in den nächsten zehn Jahren;
- **Hauptbestandteile:** listete die mengenmäßig bedeutsamsten Materialkomponenten;
- **Möglicher Anteil Recycling:** eine Abschätzung des möglichen Anteils von für ein Recycling potenziell wertvollen Materialien. Da ein künftiges Recycling sehr von

den zukünftig verfügbaren Technologien und einer Reihe weiterer Faktoren abhängt, konnte hier nur eine Schätzung vorgenommen werden.

- **Relevanz:** abgeleitet aus den Ergebnissen zu den oben genannten Kriterien erfolgte hier eine Abschätzung der potenziellen Relevanz für das Gesamtsystem;
- **Datenverfügbarkeit:** eine Klassifizierung der Datensituation nach bisherigem Kenntnisstand;
- **Empfehlung:** Abgeleitet aus der möglichen Relevanz und der Datenverfügbarkeit wurde eine Empfehlung zur vertieften Analyse des Infrastrukturtyps in Phase 2 und 3 ausgesprochen und mit dem Projektgeber Umweltbundesamt (UBA) abgestimmt.

Schon in der ersten Projektphase wurde deutlich, dass die Datensituation für die Infrastruktur der Festnetztelefonie als äußerst schwierig eingeschätzt werden musste. Diese Probleme blieben im Projektverlauf bestehen, so dass in Abstimmung mit dem UBA beschlossen wurde, die Abschätzung des Materiallagers und der jährlichen Materialbedarfe für die IuK-Infrastruktur in diesem Projekt nicht weiter zu verfolgen. Die Arbeiten des IZT in MaRes AS2.3. zum Bereich der Mobilfunk-Infrastruktur wurden allerdings fortgesetzt. Auf Grund der notwendigen unterschiedlichen Methodologie und unzureichenden Datenqualität im Bereich Mobilfunk wurden die Projektergebnisse für die Mobilfunkinfrastruktur in einem separaten Endbericht (Scharp 2010) dokumentiert.

Die zweite Projektphase hatte zum Ziel, die in Phase 1 identifizierten Referenzsysteme hinsichtlich ihres Gesamtbestandes und der in ihnen gebundenen Ressourcen zu analysieren und abzuschätzen. In dieser Projektphase wurde zunächst nur der direkte Materialbedarf erhoben. Das heißt, dass die anfallenden Materialien der Vorketten oder wirtschaftlich ungenutzte Ressourcen, die mit den direkten Materialbedarfen assoziiert sind, erst in der vierten Projektphase mit geschätzt wurden.

Aufbauend auf den Recherchen der ersten Projektphase wurde zunächst die jeweilige Bestandslänge der einzelnen Netze (Länge der Gleisinfrastruktur etc.) bzw. Anzahl der verschiedenen Referenzsysteme (Anzahl an Kläranlagen, unterteilt nach Größenkategorien etc.) ermittelt. Anschließend wurde der Materialbedarf pro km Netzlänge bzw. pro einzelnes Referenzsystem ermittelt. Dabei wurde, wenn möglich, sehr differenziert vorgegangen. So ist z.B. die Länge des Gasnetzes je nach Druckstufe in verschiedene typische Rohrdurchmesser unterteilt. Oder der Bestand an Windenergieanlagen (WEA) wurde entsprechend der vorhandenen Anlagentypen je nach Leistungsklasse sehr genau hochgerechnet. In anderen Infrastrukturbereichen lagen diese Informationen jedoch nicht vor, so dass dort mit Durchschnittswerten der Gesamtbestand abgeschätzt werden musste. So liegen z.B. keine umfassenden Daten über die Größe und Ausstattung der Biogasanlagen in Deutschland vor.

Der Materialbedarf pro km Netzlänge bzw. pro Referenzsystem wurde mit Hilfe umfassender Literaturrecherchen verschiedenster technischer Handbücher, Fachartikel, technischer Normen und Ökobilanzierungen ermittelt. Weiterhin wurden Hersteller direkt kontaktiert und befragt sowie die Daten von Experten hinsichtlich der Plausibilität eingeschätzt.

In der dritten Projektphase wurden, ergänzend zu den Daten der Stofflager im Bestand, die jährlichen Materialflüsse für den Ausbau und die Erweiterung sowie für die Instandhaltung abgeschätzt. Die jährlichen Instandhaltungen können grundsätzlich in Maßnahmen zum Austausch vorhandener Infrastrukturen als auch Maßnahmen der Wartung und Reparatur unterschieden werden. Während bei Ersatzinvestitionen ein vollständiger Austausch der Infrastrukturbestandteile unterstellt werden kann, deren Neubau häufig mit einem hohen Ressourcenaufwand verbunden ist, können Maßnahmen der Wartung und Reparatur deutlich ressourcensparender sein.²

Allerdings liegen für die konkreten Aufwendungen für Instandhaltung häufig keinerlei Daten vor, so dass der Instandhaltungsbedarf, wie in Ökobilanzierungen üblich, über die jährliche Abschreibung der technischen Lebensdauer erfolgt. Damit wird unterstellt, dass ein Referenzsystem (z.B. ein Kraftwerk) nach dem Erreichen der Lebensdauer komplett neu erstellt wird. Über die jährliche Abschreibung fallen damit rechnerisch jedes Jahr identische Instandhaltungsaufwendungen an. Dies ist insofern eine vereinfachende Annahme, als bestimmte Bauteile wie beispielsweise Turbinen zwei bis dreimal innerhalb der Betriebsdauer des Kraftwerks ausgewechselt werden, während an der Bautechnik über den kompletten Zeitraum nur geringe Austausche stattfinden. Mit der pauschalen Berechnung des Einmalaustausches der gesamten Anlage wird der Aufwand im Hinblick auf die Reparaturen tendenziell unterschätzt. Das betrifft insbesondere Maschinenteile und metallische Materialien mit Ausnahme des Bewehrungsstahls. Durch die Annahme des vollständigen Ersatzes kann es aber auch zu einer Überschätzung bzw. Doppelzählungen kommen, wenn bei neuen Anlagen nicht zwischen Ersatzneubauten und erstmaligem Neubau unterschieden werden kann, bzw. die Neubauten materialeffizienter ausgelegt werden.³

Künftige Untersuchungen sollten die Altersstruktur der Infrastrukturen und ihrer Bestandteile daher detaillierter erfassen, um eine Dynamisierung der Bestandsschätzung zu ermöglichen. Dies war in diesem Projekt nicht vorgesehen. Mit der Definition der Stoffflüsse für Instandhaltung als Austausch verbrauchter Infrastrukturbestandteile und der kontinuierlichen Abschreibung über die technische Lebensdauer müssen den Inputflüssen für Instandhaltung entsprechende Abbruchmengen gegenüberstehen. Für einzelne Infrastrukturbereiche, in erster Linie Infrastrukturen der Wasser- und Gasnetze, haben sich allerdings die genutzten Materialien in den letzten Jahren stark in Richtung PE-Kunststoff verändert, während früher genutzte Materialien wie Grauguss nicht mehr zum Einsatz kommen. Für diese Infrastrukturbereiche wurde der Instandhaltungsaufwand nicht über die technische Lebensdauer abgeschätzt, sondern z.B. über Investitionszahlen und Angaben zu Netzerneuerungsraten.

² Z.B. können in beschädigte Rohrleitungen sogenannte Inlays aus Kunststoff eingezogen werden, die danach eine neue Innenhülle im Rohr bildet. Somit ist ein Austausch des kompletten Rohres häufig nicht mehr notwendig.

³ Um Überschätzungen und Doppelzählungen zu vermeiden wurden deshalb in den Infrastrukturbereichen die gespeicherten Massen in Gebäuden (Bahnhöfe, Kraftwerke) bzw. Einrichtungen, für die eine kontinuierliche Renovierung nicht plausibel erscheint (z.B. Fermenter von Biogasanlagen), nur mit 10 % in die jährliche Abschreibung über die Lebensdauer einbezogen.

Die jährlichen Materialflüsse für den Ausbau und die Instandhaltungsmaßnahmen wurden nicht für alle Referenzsysteme durchgeführt. So wurden z.B. für die Wärmenetze aufgrund mangelnder Daten oder vernachlässigbarer Mengen keine jährlichen Materialflüsse ermittelt. Weiterhin waren keine Daten für die Erweiterung der Wasserkraftwerke vorhanden, so dass dort nur der Instandhaltungsaufwand über die technische Lebensdauer abgeschätzt wurde. Aus verschiedenen Literaturangaben konnte für Windenergieanlagen (WEA) ein geringer Wartungsaufwand abgeleitet werden. Zusammen mit dem geringen Alter des Großteils der WEA wurde keine Abschätzung der Materialströme für die reguläre Instandhaltung vorgenommen. Allerdings wurden die anfallenden Materialflüsse im Rahmen von Repowering-Maßnahmen von WEA ermittelt.

Die Ergebnisse der Projektphasen 1 bis 3 wurden zu Beginn des Jahres 2010 auf einem Expertenworkshop vorgestellt und umfassend diskutiert. Abweichende Einschätzungen von Experten wurden im Anschluss überprüft und in der Überarbeitung der Projektergebnisse berücksichtigt. Neben dieser Überarbeitung der Bestandsmengen und der jährlichen Materialflüsse für Neubau und Instandhaltung wurden in der vierten Projektphase zum einen der kumulierte Materialaufwand für die einzelnen Infrastruktursysteme abgeschätzt und zum anderen die Projektergebnisse in Form von Materialflussdiagrammen visualisiert. In den Materialflussdiagrammen ist neben dem Bestand und den jährlichen Materialflüssen in das Infrastruktursystem auch die Menge und die Art der Behandlung bzw. Verwendung der Stoffflüsse aus dem Infrastruktursystem mit abgebildet. Über diese Abbruchmassen und ihre Behandlung liegen häufig nur wenige Informationen vor, so dass wir an dieser Stelle häufig mit Annahmen arbeiten müssen. Das systematische Zusammenführen der vorliegenden Ergebnisse und die Benennung der Datenlücken dienen gleichzeitig zur Verdeutlichung des weiteren Forschungsbedarfs. Mit dem vorliegenden Bericht wird erstmals eine umfassende und konsistente Datengrundlage für den Infrastrukturbestand in Deutschland mit seinen Stofflagern und den notwendigen jährlichen Materialaufwendungen zu Ausbau und Instandhaltung der technischen-netzgebundenen Infrastrukturen erstellt.

3 Verkehrsinfrastruktur

3.1 Straßeninfrastruktur

Nach Angaben des Statistischen Bundesamtes betrug im Jahr 2009 die Gesamtlänge des deutschen Straßennetzes 690.999 km, unterschieden nach Straßen des überörtlichen Verkehrs – Bundesautobahnen (12.645 km), Bundes- (40.203 km), Landes- (86.528 km) und Kreisstraßen (91.623 km) – sowie geschätzten⁴ 460.000 km Gemeindestraßen (Destatis 2010, Destatis 2006). Gemeindestraßen bilden somit rund zwei Drittel des Gesamtnetzes. Die Gesamtlänge der überörtlichen Straßen ist in den letzten Jahren leicht rückläufig (von 231.400 km im Jahr 2003 auf 230.999 km in 2009). Dabei war für die Bundesautobahn und Kreisstraßen ein Anstieg der Länge zu verzeichnen, während der Bestand an Bundes- und Landesstraßen zurückging.⁵ Eine weitere Tendenz ist der Ausbau zu breiteren Straßen. So nahm der Anteil der einbahnigen und zweibahnigen Autobahnen mit bis zu vier Fahrstreifen ab und zweibahnige Autobahnen mit mehr als vier Fahrstreifen dominieren das Gesamtbild inzwischen. Diese Tendenz lässt sich auch bei den Bundestrassen erkennen.

Neben dem Neu- und Ausbau von Straßen wird ein erheblicher Aufwand betrieben, die bestehenden Straßen instand zu halten.

3.1.1 Straßenaufbau

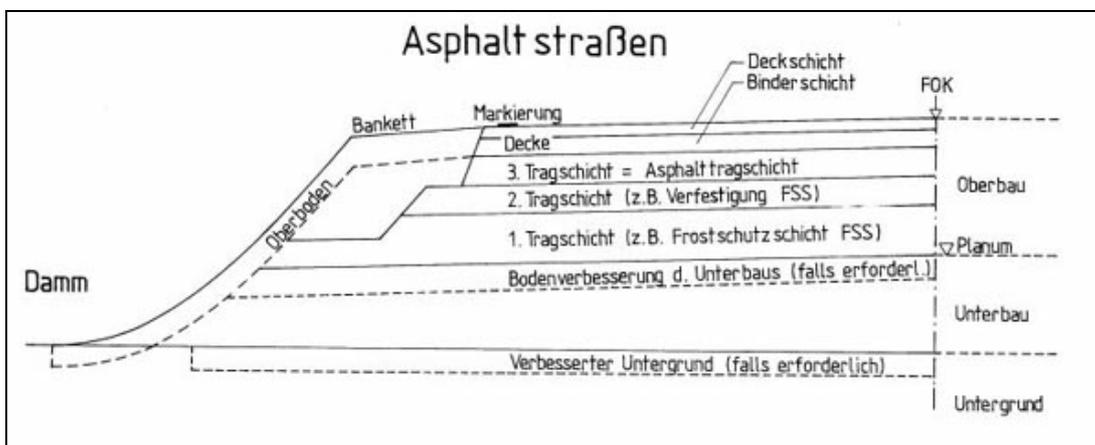
Der Aufbau einer Straße lässt sich in drei Ebenen aufteilen: Dem Untergrund folgen der Unter- und Oberbau.

Der Unterbau wird je nach Untergrund künstlich hergestellt. Dem Unterbau folgen Tragschichten wie z.B. Frostschuttschicht und Asphalttragschicht und die Straßendecke. Zusammen ergeben diese Schichten den Oberbau. Der Oberbau ist in Deutschland genormt und kann daher gut erfasst werden. Der Aufbau einer Asphaltstraße ist exemplarisch in der folgenden Grafik dargestellt.

⁴ Die Gemeindestraßen werden seit Beginn der 90er Jahre statistisch nicht mehr erfasst. Es gibt daher nur Schätzungen zur Länge der Gemeindestraßen.

⁵ Die Veränderungen können sowohl real durch Zu- und Rückbau erfolgen als auch durch eine Neuklassifizierung der Straßen. Dies ist aus den vorhandenen Daten statistisch nicht unterscheidbar.

Abb. 1: Querschnitt einer Asphaltstraße



Quelle: Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe „Asphaltstraßen“ (2001)

Besonders hilfreich für die stoffliche Bewertung der Straßen in Deutschland ist die vorgegebene Einteilung nach Straßenarten und Bauklassen. Nach den „Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaues von Verkehrsflächen“ (RStO) werden in Deutschland folgende Straßentypen den verschiedenen Bauklassen zugeordnet:

Tab. 1: Bauklassen unterschiedlicher Straßentypen

Straßenart	Bauklasse
Schnellverkehrsstraße, Industriesammelstraße	SV/I/II
Hauptverkehrsstraße, Industriestraße, Straße im Gewerbegebiet	II/III
Wohnsammelstraße, Fußgängerzone mit Ladeverkehr	III/IV
Anliegerstraße, befahrbarer Wohnweg, Fußgängerzone (ohne Busverkehr)	V/VI

Quelle: Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaues von Verkehrsflächen (2001)

Neben dieser Einteilung kann weiter nach der Deckschicht der Straße unterschieden werden. Es gibt Asphalt, Beton- und Pflasterstraßen, wobei die Pflasterstraßen überwiegend nur noch als Altbestände in ländlichen Räumen oder als Stilelement in historischen Innenstädten eine Rolle spielen dürften.

Abhängig von den örtlichen Verhältnissen unterscheiden sich die Tragschichten einer Straße ebenfalls. Einflussfaktoren sind z.B. Witterungsverhältnis, Erneuerungsstrategie des Betreibers, regional vorhandenes Material, Verkehrsaufkommen und die Topographie des Baugeländes. Diese Faktoren lassen nur eine ungefähre und grobe Abschätzung des gebundenen Materials zu.

Eine Zuordnung von Baustoffen für die jeweiligen Straßenschichten ist zum Teil möglich:

- Betondecken bestehen aus Mineralstoffgemischen und Zement sowie weiteren Zusätzen. Die Zusammensetzung variiert je nach Ansprüchen und Auftragnehmer (DIN 1045).
- Asphaltsschichten bestehen aus Mineralstoffen mit feiner Gesteinskörnung (Füller, Natursand, Edelbrechsand und Edelsplitt) und Straßenbaubitumen.
- Pflasterdecken bzw. Pflastersteine bestehen im Allgemeinen aus Beton, Klinker oder Naturstein. Die Ausführungen werden nach der ZTV P-StB gehandhabt.

Frostschutzschichten sollen Frostschäden im Oberbau verhindern und bestehen aus frostunempfindlichen Baustoffgemischen, die aufgrund ihrer Eigenschaften auch im verdichteten Zustand wasserdurchlässig bleiben. Zu nennen sind: Kiese, Kies-Sandgemische, Sande, Sand-Kies-Gemische (DIN 18196), Gemische aus Splitt und Brechsand der Lieferkörnung 0/5 bis 0/32 sowie Gemisch aus Schotter, Splitt und Brechsand der Lieferkörnung 0/45 und 0/56 (ZTV T-StB 95).

Schottertragschichten bestehen aus Schotter-Splitt-Sand-Gemischen (Lieferkörnung 0/45 oder 0/56) oder aus Splitt-Sand-Gemischen (Lieferkörnung 0/32, 0/45, 0/56) (DIN 18315, ZTV T-StB 95).

Kiestragschichten bestehen aus Kies-Sand-Gemischen (Lieferkörnung 0/32, 0/45, 0/56), gegebenenfalls unter Zusatz von gebrochenem Material (DIN 18315, ZTV T-StB 95).

Hydraulisch gebundene Tragschichten (HGT) bestehen aus ungebrochenen und/oder gebrochenen Mineralstoffen sowie hydraulischen Bindemitteln (Baukalk, Zement, sonstige). Die Bindemittelmenge darf jedoch 3,0 Massenprozent, bezogen auf das trockene Mineralstoffgemisch, nicht unterschreiten.

Baustoffe

Anhand der Beschreibung der einzelnen Schichten wird deutlich, dass als Hauptbaustoffe die Mineralstoffe Sand, Kies, Schotter und Splitt für den Straßenbau zum Einsatz kommen. Weiter werden Bindemittel wie Zement, Kalk und Bitumen verwendet. Industrielle Nebenprodukte kommen ebenfalls zum Einsatz.

Die Mineralstoffe oder Gesteinskörnungen können natürlich, künstlich oder recycelt sein. Sie stellen den größten Anteil des Ressourceninputs dar. Genaue Angaben für die verwendeten Mineralstoffe finden sich in den „Technischen Lieferbedingungen für Mineralstoffe im Straßenbau“ (Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, TL Min-StB 2000) oder den „Technischen Lieferbedingungen für Gesteinskörnungen“.

gen im Straßenbau“ (Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, TL Gestein-StB).⁶

Künstliches Gestein entstammt thermischer oder sonstiger industrieller Behandlung. Beispiele sind z.B. Eisenhüttenschlacke, Metallhüttenschlacke, Steinkohleflugasche, Kesselasche. Viele weitere Produkte kommen zum Einsatz.

Die einzelnen Baustoffe werden als Gemische zu verschiedenen Anteilen im Straßenkörper verbaut. Die Zusammensetzung dieser Mineralstoffgemische kann aus den Anforderungen an die Korngrößenverteilung bestimmt werden. Ein Großteil dieser wird über die „Zusätzlichen Technischen Vertragsbedingungen“ (ZTV'en) festgelegt und kann über Tabellen zur Verteilung in Massenprozent ermittelt werden.

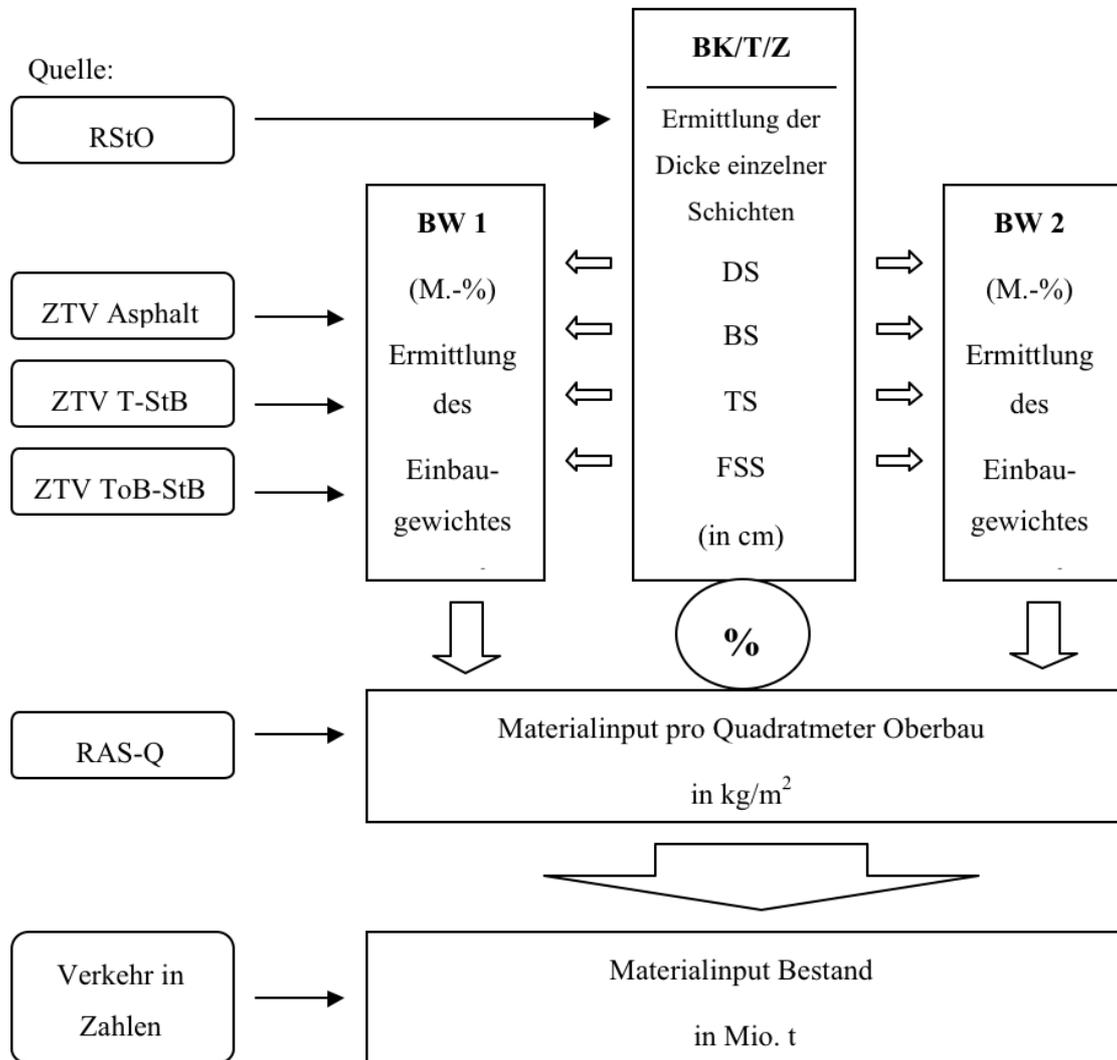
Straßenbestand

Zur weiteren Quantifizierung der in der Straßeninfrastruktur gebundenen Baustoffe, ist eine Einteilung der Straßen nötig. Neben den oben genannten Bauklassen, hilft hierbei die „Richtlinie für die Anlage von Straßenteil: Querschnitte“ (RAS-Q). Es können Regelquerschnitte zugeordnet werden, so dass sich vereinfacht folgendes Bild ergibt:

- Autobahnen (Bauklasse (BK) SV, Regelquerschnitt (RQ) 29,5),
- Bundesstraßen (BK I, RQ 26),
- Landesstraßen (BK II, RQ 10,5),
- Kreisstraßen (BK III, RQ 9,5),
- Gemeindestraßen (BK IV, RQ 7,5).

⁶ Die Regelwerte werden regelmäßig überarbeitet und aktualisiert. Einige der Regelwerke die in dieser Studie verwendet werden (z.B. FGSV 697 oder FGSV 799 sind mittlerweile veraltet. Da aber der Großteil des Straßenbestandes noch nach altem Regelwert erbaut wurde, ist es zulässig, die zum Teil veralteten Regelwerte zur Berechnung des Materialbestandes zu verwenden.

Abb. 2: Schema zur Abschätzung des Straßenbestandes (nach Ulbricht 2006)



Abkürzungen:

BK/T/Z	Bauklasse/Tabelle/Zelle der RStO	TS	Tragschicht
BW	Bauweise	FSS	Frostschutzschicht
DS	Deckschicht	BAB	Bundesautobahnen
BS	Binderschicht	%	prozentuale Verteilung der Deckschichtarten

3.1.2 Materialbestand der Straßeninfrastruktur

Nach den „Richtlinien für die Anlage von Straßen, Teil: Querschnitte“ (RAS-Q) werden verschiedene Möglichkeiten der Bauausführung festgelegt. Der Regelquerschnitt bezieht sich dabei auf die komplette Straße und wurde auf die tatsächlich befahrene Breite reduziert. Damit wird berücksichtigt, dass Rand- und Mittelstreifen nicht zur unterbauten Fläche zählen.

Insgesamt ergibt sich eine unterbaute Straßenfläche in Deutschland von 4.437 km² (Tab. 2).

Tab. 2: Längen- und Flächenverteilung Gesamtstraßennetz in Deutschland (2007)

Straßenkategorie	Länge (km)	Breite (m)	Fläche (km ²)
Bundesautobahnen	12.531		306,03
1-bahnig	151	7,5	1,13
2-bahnig mit bis zu 4 Fahrstreifen	9.021	23	207,48
2-bahnig mit mehr als 4 Fahrstreifen	3.359	29	97,41
Bundesstraßen	40.711		351,18
mit bis zu 2 Fahrstreifen	37.043	7,5	277,82
mit mehr als 2 Fahrstreifen	3.668	20	73,36
Landesstraßen	86.597	7,5	649,48
Kreisstraßen	91.520	6,5	594,88
Straßen des überörtlichen Verkehrs	231.359		1.901,57
Gemeindestraßen	460.000	5,5	2.530,00
Gesamt	691.359		4.431,57

Quellen: Destatis (2008a); Destatis (2006); Destatis (2005a); BMV (2005); Adler (2004); RAS-Q

Als Grundlage für die Quantifizierung der in der bestehenden Straßeninfrastruktur eingebauten Materialien wurden Regelwerke für den Straßenbau herangezogen. Hierbei wurde für das ganze Bundesgebiet eine einheitliche Umsetzung der wichtigsten Normen über die Baustoffe und die Bauausführung angenommen, was abhängig von der Komplexität der örtlichen Verhältnisse nicht immer der Fall ist.

Der Aufbau einer Straße lässt sich in drei Ebenen aufteilen: Dem Untergrund folgen der Unter- und Oberbau. Der Oberbau – bestehend aus Frostschuttschicht, Asphalttragschicht und Straßendecke – ist in Deutschland genormt und kann daher gut erfasst werden. Dabei erfolgt eine weitere Aufteilung der Straßenkategorien nach der Deckschicht der Straße. Es gibt Asphalt-, Beton- und Pflasterstraßen.

Als zentraler Baustein wurde zunächst, anhand der RStO⁷ und den für die Referenzstraßen festgelegten Bauklassen, die vorzusehende Schichtdicke innerhalb der einzelnen Bauweisen ermittelt. Die Auswahl der Bauweise erfolgte dabei, soweit vorhanden,

⁷ Nach den „Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaues von Verkehrsflächen“ (RStO) können die Bauklassen je nach Art der zu erwartenden Beanspruchung unterteilt werden.

mittels statistischer Erhebungen (Rübensam et al. 2005; Buchert et al. 2004). Alternativ wurde zu je gleichen Anteilen (i) Asphalttragschicht auf Frostschutzschicht sowie (ii) Asphalttragschicht mit Kies- oder (iii) Schottertragschicht auf Frostschutzschicht angenommen, womit die wesentlichen Bauweisen erfasst sind.

Für die festgelegten Schichtdicken wurde dann anhand der ZTVen (Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen) ein Einbaugewicht berechnet. Auch die Zusammensetzung der Baustoffgemische und die verwendeten Bindemittel in Massenprozent sind den ZTVen zu entnehmen.⁸ Unter Zusammenführung der Daten kann das für den Quadratmeter Oberbau notwendige Baumaterial bestimmt werden.

Tab. 3: Spezifische Materialkoeffizienten im Straßenbereich

Material (kg/m ²)	BAB	BS	LS	KS	GS
Gesteinsmehl (Füller)	53,3	57,5	38,4	38,4	23,3
Edelbrechsand	73,7	106,8	78,6	78,6	48,9
Edelsplitt	445,0	495,3	405,8	405,8	193,7
bituminöse Bindemittel	19,8	29,8	25,8	25,8	13,5
hydraulische Bindemittel	45,2				2,3
Sand	516,3	497,6	521,2	467,2	530,3
Kies	647,5	605,0	641,3	575,3	511,3
Schotter			68,5	68,5	219,2
Summe Oberbau	1.800,9	1.792,0	1.779,6	1.659,6	1.542,6

Quelle: Eigene Berechnungen auf Grundlage von Ulbricht (2006)

Über die ermittelten Netzlängen wurde schließlich eine Quantifizierung des gesamten Materialbestandes im Straßennetz in Deutschland vorgenommen. Insgesamt ergibt sich ein Materialbestand im gesamtdeutschen Straßennetz wie folgt:

Tab. 4: Materialbestand Straßennetz in Deutschland

Material (1.000 t)	BAB	BS	LS	KS	GS	Summe
Anteil am Gesamtnetz (km)	12.531	40.711	86.597	91.520	460.000	691.359
Gesteinsmehl (Füller)	16.310	20.186	24.923	22.828	59.026	143.272
Edelbrechsand	22.562	37.500	51.045	46.754	123.635	281.497
Edelsplitt	136.189	173.946	263.574	241.417	490.124	1.305.251
bituminöse Bindemittel	6.064	10.466	16.748	15.340	34.030	82.648
hydraulische Bindemittel	13.829	0	0	0	5.907	19.736
Sand	158.010	174.759	338.525	277.944	1.341.720	2.290.957
Kies	198.144	212.465	416.532	342.254	1.293.711	2.463.106
Schotter	0	0	44.489	40.749	554.576	639.814
Summe Oberbau	551.108	629.322	1.155.836	987.286	3.902.729	7.226.281

Quelle: Eigene Berechnungen auf Grundlage von Ulbricht (2006)

⁸ Sind keine Einbaugewichte vorgeschrieben (z.B. Frostschutzschicht), wurden diese über die Baustoffdichte bzw. die Einbaudichte ermittelt.

Als Hauptbaustoffe kommen die Mineralstoffe Sand, Kies, Schotter sowie Splitt zum Einsatz. Weiter werden Bindemittel wie Zement (in der Regel Portlandzement nach DIN EN 197-1) und Kalk (beides hydraulische Bindemittel) oder Bitumen zur Herstellung von Asphalt bzw. Beton verwendet. Zunehmend kommen auch industrielle Nebenprodukte zum Einsatz, welche in großer Vielfalt und damit schwer differenzierbar Verwendung finden (Ulbricht 2006).

Sensitivitätstest

In der Diskussion mit Straßenbau-Experten wurde deutlich, dass die angenommene Straßenbreite, gerade bei Gemeindestraßen, häufig nicht den aktuellen Normen entspricht. Gerade der Bestand an älteren Straßen ist häufig deutlich weniger als 5,5 m breit. Der hohe Anteil der Gemeindestraßen am Gesamtstraßennetz lässt den Materialbestand sensitiv auf die angenommene Breite der Straßen reagieren. Um die Spannweite der unterschiedlichen Ergebnisse abzuschätzen, wurde der Materialbestand der Straßeninfrastruktur mit einer Untergrenze von 4 m Straßenbreite sowie einer Obergrenze von 7 m Straßenbreite berechnet.

Tab. 5: Materialbestand der Straßeninfrastruktur bei einer Straßenbreite von 4 m für Gemeindestraßen

Input	BAB	BS	LS	KS	GS	Summe
km	12.531	40.711	86.597	91.520	460.000	691.359
(Neubau)	in 1.000 t	in 1.000 t	in 1.000 t	in 1.000 t	in 1.000 t	in 1.000 t
Gesteinsmehl (Füller)	16.310	20.186	24.923	22.828	42.928	127.174
Edelbrechsand	22.562	37.500	51.045	46.754	89.917	247.778
Edelsplitt	136.189	173.946	263.574	241.417	356.454	1.171.581
bit. Bindemittel	6.064	10.466	16.748	15.340	24.749	73.367
hydr. Bindemittel	13.829	0	0	0	4.296	18.125
Sand	158.010	174.759	338.525	277.944	975.796	1.925.033
Kies	198.144	212.465	416.532	342.254	940.881	2.110.276
Schotter	0	0	44.489	40.749	403.328	488.566
Summe Oberbau	551.108	629.322	1.155.836	987.286	2.838.348	6.161.901

Quelle: Eigene Berechnungen auf Grundlage von Ulbricht (2006)

Je nach Straßenbreite schwankt der Materialbestand zwischen 6,2 Mrd. Tonnen (4 m) und 8,3 Mrd. Tonnen (7 m). Gleichzeitig wird ersichtlich, dass eine Reduzierung der Straßenbreite um 1 m im Gesamtbestand der Gemeindestraßen rechnerisch 0,7 Mrd. Tonnen weniger mineralische Rohstoffe bedeuten würden, eine Menge, die nach ihrer Einsatzdauer nicht ersetzt werden müsste.

Tab. 6: Materialbestand der Straßeninfrastruktur bei einer Straßenbreite von 7 m für Gemeindestraßen

Input	BAB	BS	LS	KS	GS	Summe
km	12.531	40.711	86.597	91.520	460.000	691.359
(Neubau)	in 1000 t	in 1000 t	in 1000 t	in 1000 t	in 1000 t	in 1000 t
Gesteinsmehl (Füller)	16.310	20.186	24.923	22.828	75.124	159.371
Edelbrechsand	22.562	37.500	51.045	46.754	157.354	315.216
Edelsplitt	136.189	173.946	263.574	241.417	623.795	1.438.921
bit. Bindemittel	6.064	10.466	16.748	15.340	43.311	91.929
hydr. Bindemittel	13.829	0	0	0	7.517	21.346
Sand	158.010	174.759	338.525	277.944	1.707.643	2.656.880
Kies	198.144	212.465	416.532	342.254	1.646.542	2.815.937
Schotter	0	0	44.489	40.749	705.824	791.062
Summe Oberbau	551.108	629.322	1.155.836	987.286	4.967.110	8.290.662

Quelle: Eigene Berechnungen auf Grundlage von Ulbricht (2006)

3.1.3 Jährliche Materialflüsse für den Neu- und Ausbau der Straßeninfrastruktur

Wie einleitend geschrieben, liegen für zwei Drittel des Gesamtnetzes, die Gemeindestraßen, keine Daten über die jährlichen Zuwächse bzw. Rückgänge an Straßenkilometern vor. Die Daten über Zuwächse bei der Länge der überörtlichen Straßen beschränken sich auf die Bundesautobahnen und Kreisstraßen. Durch Neuklassifizierung von Straßen und Neubemessungen sind zudem sinkende Straßenlängen denkbar, obwohl in dieser Straßenkategorie weiterhin Straßen-Kilometer neu errichtet wurden. Der Ausbau von Fahrstreifen kann nur für die Bundesfernstraßen nach Fahrstreifen differenziert ermittelt werden. Eine aktuelle konsistente Straßenstatistik, die sowohl den gesamten Zubau der einzelnen Kategorien (von Bundesautobahnen (BAB) bis Gemeindestraßen), ihre Neuklassifikationen und die Erweiterung der Fahrspuren abbildet, ist nach gegenwärtigem Wissensstand nicht vorhanden.

Neben einer Abschätzung des Ausbaus des Straßennetzes über die Differenz des Straßenbestandes verschiedener Jahrgänge, könnten alternativ die Daten der jährlichen Straßenbauberichte bzw. der Längenstatistik der Straßen des überörtlichen Verkehrs des BMVBS (Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung) (BMVBS 2008a) verwendet werden. Diese weisen jährlich aus, welche Bauabschnitte der Bundesautobahnen (unterteilt nach Fahrstreifen) und Bundesfernstraßen freigegeben wurden bzw. bieten den aktuellen Bestand der vier überörtlichen Straßenkategorien an. Damit ist allerdings noch nicht geklärt, in welchem Umfang sich die Länge der Gemeindestraßen verändert hat.

Unter der Annahme, dass die Dichte an Gemeindestraßen in Deutschland hoch ist und ein Ausbau der Gemeindestraßen nur noch im Zusammenhang mit der Neuerschließung von Wohngebieten stattfindet, lässt sich eine Abschätzung des Zuwachses an Gemeindestraßen über das BASIS-II-Modell an Hand des Zuwachses an Wohngebäuden abschätzen (Buchert et al. 2004). Unter der vereinfachten Annahme, dass alle neu

gebauten Wohngebäude den Bau von Gemeindestraßen nach sich ziehen und nicht im Rahmen von Verdichtungen schon an bestehenden Straßen errichtet werden, könnte man aus dem in BASIS II geschätzten Neubau von 337.000 Wohneinheiten bzw. 190.500 Wohngebäuden im Jahr 2000 über eine Kopplung mit der Straßenlänge pro Haustyp ein Neubau an Gemeindestraßen von 2.140 km ableiten. Einerseits kann diese Zahl tendenziell zu hoch sein, da unterstellt wird, dass alle neu errichteten Wohneinheiten Straßenneubauten nach sich ziehen. Andererseits werden Straßenneubauten für Gewerbegebiete etc. in BASIS II nicht mit berücksichtigt.

Das Deutsche Institut für Urbanistik hat in seiner Studie „Investitionsrückstand und Investitionsbedarf der Kommunen“ (Reidenbach et al. 2008) eine Schätzung des zukünftigen Ausbaus der Gemeindestraßen veröffentlicht. Demnach würde sich für den Zeitraum 2006 bis 2020 ein Neubaubedarf an Erschließungsstraßen von 18.900 km ergeben. Pro Jahr wären dies 1.260 km Neubau von Gemeindestraßen. Wir vermuten, dass der aktuelle Wert des Neubaus von Gemeindestraßen zwischen den Zahlen nach Buchert et al. (2004) und dem zukünftigen Neubaubedarf nach Reidenbach et al. (2008) liegt. Für diese Studie wird ein jährlicher Neubau von 1.500 km Gemeindestraßen angenommen.

Eine weitere, eher theoretische Möglichkeit, den Zuwachs der Straßeninfrastruktur abzuschätzen, besteht in der Analyse der Veränderungen der Flächennutzungsstatistik. Als problematisch erweist sich jedoch, dass die so berechnete Flächennutzung für Verkehrsfläche (17.356 km² in 2003, Destatis 2005)⁹ mehr als viermal so hoch ist wie die Berechnung der Straßenflächen mittels Gesamtstraßenlängen multipliziert mit typischer Straßenbreiten je Straßenkategorie (4.186 km² in 2003, Ulbricht 2006). Selbst wenn aus der Verkehrsfläche alle anderen Flächen (Schieneninfrastruktur, Plätze, Wege, Flughäfen etc.) heraus gerechnet werden, wäre sie mit 8.540 km² immer noch doppelt so hoch wie über eine bottom-up Schätzung (Ulbricht 2006). Methodisch bedingt wird über die Flächennutzungsstatistik die Straßenfläche eindeutig zu hoch geschätzt.¹⁰

Für den Zubau an Straßen des überörtlichen Verkehrs wurden zunächst die Angaben der Längenstatistik der Straßen des überörtlichen Verkehrs mit Stand 1.1.2008 und 1.1.2007 für den aktuellen Bestand verwendet (BMVBS 2008a). Allerdings sind die freigegebenen Abschnitte der Bundesautobahnen von Jahr zu Jahr sehr unterschiedlich. Eine willkürliche Jahresbetrachtung mit den Daten des aktuellsten Stichjahres (Veränderung in 2008 zum Vorjahr) kann daher das langjährige Mittel deutlich unter- oder überschätzen. Zudem sind in den Längenstatistiken keine Angaben über den Ausbau von Fahrstreifen erfasst. Den vorliegenden Berechnungen liegen daher Daten des BMVBS (2009a) über den durchschnittlichen jährlichen Neubau und die Erweite-

⁹ Aktuelle Zahlen der Flächennutzungsstatistik zeigen einen leichten Anstieg der Verkehrsfläche (17.790 km² in 2008, Destatis 2010).

¹⁰ Die Siedlungs- und Verkehrsflächen der Flächennutzungsstatistik werden aus den Liegenschaftskatastern ermittelt. Dabei werden die Flurstücke entsprechend der Hauptnutzung klassifiziert. Bei Gemeindestraßen mit Fußwegen werden in der Regel die Flurstücke für Straße und Fußweg zusammengefasst und fließen als Straßenfläche in die Flächennutzungsstatistik ein.

rung der Bundesautobahnen im Zeitraum von 2001-2008 zugrunde. Die Verteilung nach Fahrstreifen ergibt sich aus den Anteilen der einzelnen Kategorien im Jahr 2008. Für den Neubau von Landes- und Kreisstraßen wird ebenfalls ein durchschnittlicher Jahreswert für den Zeitraum 2001 bis 2008 verwendet. Als Zuwachs an Gemeindestraßen wird ein jährlicher Neubau von 1.500 km unterstellt (Tab. 7).

Tab. 7: Durchschnittliche jährliche Veränderung der Straßenlängen 2001 bis 2008 in km

Straßenkategorie	-/+
Bundesautobahnen	126
1-bahnig	10
2-bahnig mit bis zu 4 Fahrstreifen	46
2-bahnig mit mehr als 4 Fahrstreifen	70
Bundesstraßen	-124
mit einer Fahrbahn	-112
mit zwei Fahrbahnen	-11
Landesstraßen	-28
Kreisstraßen	84
Straßen des überörtlichen Verkehrs	58
Gemeindestraßen	1.500
Straßen des überörtlichen Verkehrs und Gemeindestraßen	1.558
Erweiterung der BAB auf 6 Streifen	70

Quelle: Eigene Berechnung auf Grundlage BMVBS (2009a) und Destatis (2005a)

Während Bundesautobahnen jährlich wachsen, geht der Bestand an Bundesstraßen kontinuierlich zurück. Wie hoch der Anteil der Umklassifizierung bzw. Neuvermessung an diesen Rückgängen ist, ist nicht bekannt. Aus der so abgeschätzten Länge des Neubaus und der Erweiterung der Straßeninfrastruktur ergibt sich in der Summe ein jährlicher Anstieg der Straßenfläche um 12,5 km² (Tab. 8).

Tab. 8: Jährlicher Anstieg der Straßenfläche aus Neubau und Erweiterung

Straßenkategorie	Fläche in m ²	Fläche in km ²
Bundesautobahnen	3.159.929	3,16
1-bahnig	76.071	0,08
2-bahnig mit bis zu 4 Fahrstreifen	1.058.000	1,06
2-bahnig mit mehr als 4 Fahrstreifen	2.025.857	2,03
Bundesstraßen		
mit einer Fahrbahn		
mit zwei Fahrbahnen		
Landesstraßen		
Kreisstraßen	546.000	0,55
Straßen des überörtlichen Verkehrs	3.705.929	3,71
Gemeindestraßen	8.250.000	8,25
Straßen des überörtlichen Verkehrs- und Gemeindestraßen	11.955.929	11,96
Erweiterung der BAB auf 6 Streifen	527.143	0,53
Summe Neubau und Erweiterung	12.483.071	12,48

Quelle: Eigene Berechnung auf Grundlage von Ulbricht (2006)

Aufgrund der negativen Entwicklung der Gesamtlänge an Bundesstraßen und Landesstraßen wird folglich nur ein Materialbedarf für den Neubau und die Erweiterung im Bereich der Bundesautobahnen, Kreisstraßen und Gemeindestraßen unterstellt. Dieser wurde wie bei den Bestandsabschätzungen mittels der Regelquerschnitte der RAS-Q (Richtlinie für die Anlage von Straßen - Querschnitt), sowie der Daten der ZTVs (Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen) und RStO (Richtlinie für die Standardisierung des Oberbaues von Verkehrsflächen) pro Straßenkategorie hochgerechnet. Daraus ergibt sich ein Materialbedarf für den Neubau der Straßeninfrastruktur sowie die Erweiterung bestehender BAB-Fahrschienen von insgesamt 21,2 Mio. Tonnen pro Jahr (Tab. 9). Zusätzlich sind für den Neubau Erdbewegungen in einem Umfang von 120 Mio. Tonnen notwendig.

Tab. 9: Jährlicher Materialbedarf für Neubau und Erweiterung der Straßeninfrastruktur

	Bundesautobahn	Bundesstraße	Landesstraße	Kreisstraße	Gemeindestraße	Erweiterung BAB auf 6 Streifen	Insgesamt
km	126	0	0	84	1.500	70	
(Neubau)	in 1.000t	in 1.000t	in 1.000t	in 1.000t	in 1.000t	in 1.000 t	in 1.000t
Gesteinsmehl (Füller)	197	0	0	21	192	28	438
Edelbrechsand	272	0	0	43	403	39	757
Edelsplitt	1.641	0	0	222	1.598	235	3.695
bit. Bindemittel	73	0	0	14	111	10	209
hydr. Bindemittel	167	0	0	0	19	24	210
Sand	1.904	0	0	255	4.375	272	6.806
Kies	2.387	0	0	314	4.219	341	7.261
Schotter	0	0	0	37	1.808	0	1.846
Summe	6.640	0	0	906	12.726	949	21.222

Quelle: Eigene Berechnung auf Grundlage von Ulbricht (2006)

Die Gemeindestraßen sind mit einem Materialbedarf von 12,7 Mio. Tonnen dominant, allerdings gehen auch 69 % des Zuwachses an Straßenflächen auf das Konto der Gemeindestraßen.

3.1.4 Jährliche Materialflüsse für die Instandhaltung der Straßeninfrastruktur

Es gibt nur wenige konkrete Daten zum Umfang der jährlichen Instandhaltungen der Straßeninfrastruktur. Die einzige uns bekannte Statistik beschränkt sich auf Bundesautobahnen und schlüsselt die Erneuerungsmaßnahmen nach a) Ersatz der Deckschicht, b) Ersatz der gebundenen Schichten, c) Ersatz des gesamten Oberbaus und d) der Erneuerung im Hocheinbau für das Jahr 2007 auf (BMVBS 2008a). Allerdings können mit diesen Daten keine Aussagen über die Instandhaltung des Gesamtsystems getroffen werden.

Die kontinuierliche Beanspruchung der Straßeninfrastruktur lässt auf einen hohen Erhaltungsaufwand schließen, der durch die DIFU-Studie (Reidenbach et al. 2008) für kommunale Gemeindestraßen bestätigt wird. Der Bund, die Länder und Gemeinden haben zudem ein Interesse daran, ihre Infrastrukturen funktionsfähig zu halten und so ggf. die Nutzungsphase zu verlängern. Es kann daher angenommen werden, dass eine regelmäßige Instandhaltung durch die Straßenbauämter und Straßenbaufirmen erfolgt. Gleichzeitig stehen vorhandene finanzielle Schwierigkeiten - vor allem auf kommunaler Ebene - einer notwendigen Wartung der Straße entgegen. Trotzdem scheint es durchaus realistisch, die einzelnen Straßenschichten über die Lebensdauer abzuschreiben und so einen langjährigen gemittelten Instandhaltungsaufwand zu bestimmen.

Die verwendete Lebensdauer pro Straßenschicht und Straßentyp kann aus Tab. 10 entnommen werden. Sie orientiert sich an den einschlägigen Regelwerken und den dort angegebenen Zeithorizonten. Würden alle Straßen entsprechend dieser Lebensdauer erneuert werden und wäre die Altersstruktur der Straßen in etwa gleich verteilt, würden sich folgende jährliche Materialbedarfe für Wartung und Instandhaltung der Straßeninfrastruktur ergeben:

Tab. 10: Jährlicher Materialbedarf für Wartung und Instandhaltung der Straßeninfrastruktur

	BAB	Bundesstraßen	Landesstraßen	Kreisstraßen	Gemeindestraßen	Summe
	in 1.000 t	in 1.000 t	in 1.000 t	in 1.000 t	in 1.000 t	in 1.000 t
Gesteismehl (Füller)	498	593	469	430	1.266	3.255
Edelbrechsand	446	840	760	696	2.216	4.958
Edelsplitt	7.055	4.597	4.144	3.797	9.421	29.014
bit. Bindemittel	879	278	322	295	562	2.336
hydr. Bindemittel	606	31	0	0	177	813
Sand	3.282	3.250	4.182	3.474	13.277	27.465
Kies	3.686	3.905	5.123	4.258	15.799	32.770
Schotter	0	0	0	0	3.198	3.198
Summe Instandsetzung	16.452	13.493	14.999	12.950	45.915	103.809

Quelle: Eigene Berechnung auf Grundlage von Ulbricht (2006)

Tab. 11: Verwendete Lebensdauer nach Straßentyp und Straßenschicht

Lebensdauer in Jahren	Deckschicht	Bindeschicht	3. Trageschicht	2. Trageschicht	1. Trageschicht	Frostschuttschicht
BAB	20	40	55			55
Bundesstraßen	17	40	55			55
Landstraßen	30	60	90	90		90
Kreisstraßen	30	60	90	90		90
Gemeindestraßen	30			60	60	90

Quelle: Ulbricht (2006)

Insgesamt ergibt sich ein jährlicher Materialbedarf für die Instandhaltung der Straßeninfrastruktur von ca. 104 Mio. Tonnen. Selbst wenn die Zahl auf Grund der Finanzengpässe bei Bund, Ländern und Kommunen zu hoch angesetzt sein sollte und Deckschichten länger als 17 – 30 Jahre genutzt werden, zieht die Bestandserhaltung der Straßeninfrastruktur enorme Mengen an benötigten Ressourcen nach sich. Diese sind fünfmal höher als die Ressourcenaufwendungen für den jährlichen Neubau an Straßen.

3.2 Materialbestand und jährliche Materialflüsse für Ingenieurbauwerke der Bundesfernstraßen

3.2.1 Ingenieurbauwerke: Brücken und Tunnel

Neben den Straßen besteht die Straßeninfrastruktur aus zahlreichen Brücken und Tunneln. Die Datenlage zu wichtigen Kriterien wie Anzahl, Altersstruktur oder Bauweise ist allerdings sehr schwierig. Die Anzahl und Länge der Brücken und Straßentunnel im gesamten deutschen Straßennetz kann nur geschätzt werden. Belastbare Daten für Brücken und Tunnel im Ortsverkehr liegen nicht vor. Die BASt (2009) nennt für Deutschland eine Gesamtzahl von 340 Tunnelbauten an überörtlichen Straßen mit einer Gesamtlänge von knapp 300 km, davon 220 Tunnel mit einer Gesamtlänge von 217 km an Bundesfernstraßen. 51 % der Tunnel in Bundesfernstraßen sind demnach mit einer Tunnelröhre gebaut.

Der Gesamtbestand an Brücken (geschätzt ca. 120.000)¹¹ unterscheidet sich stark hinsichtlich Bauweise, verwendeter Materialien und Entstehungszeitraum. Zudem liegen für Brücken im örtlichen Straßennetz keine Angaben hinsichtlich Anzahl, Länge und Konstruktionsweise vor. Eine sinnvolle Abschätzung der Materialbestände aller Straßenbrücken ist dadurch nicht möglich. Die Brücken der Bundesfernstraßen (ca. 38.500) sind deutlich besser einzugrenzen, da sie zum überwiegenden Teil aus Stahl- oder Spannbeton bestehen (BMVBS 2009b). Grundsätzlich lassen sich diese Brücken nach ihrer Bauart unterscheiden: Es kann unterschieden werden zwischen Betonbrücken, Verbundbrücken und Stahlbrücken. Eine feinere Untergliederung ist nach weiteren Merkmalen möglich: So unterscheiden sich Brücken durch die Tragwerksart (u.a. Balken-, Rahmen-, Bogen-, Hänge- und Schrägseilbrücken), die Auflösung des Überbaus (Vollwand, Fachwerk), die Lage des Tragwerkes (Deck-, Trogbrücken) und die Querschnittsform des Überbaus (Platte, Plattenbalken, Hohlkasten) (Lünser 1999). Der Großteil (65 %) der Brücken in den Bundesfernstraßen wurde im Zeitraum zwischen 1965 - 1985 erbaut.

Die folgende Tabelle gibt eine Übersicht über die Brückenformen nach Lünser (1999):

¹¹ Laut BMVBS (2006)

Tab. 12: Brückenformen

Betonbrücken – Hohlkasten
Betonbrücken - Fertigteilträger mit Ortbetonplatte
Betonbrücken – Plattenbalken
Verbundbrücken – Bogen
Verbundbrücke – Hohlkasten
Verbundbrücken – Plattenbalken
Stahlbrücken – Bogen
Stahlbrücke Fachwerk
Stahlbrücken – Hohlkasten
Stahlbrücken – Plattenbalken

Quelle: Lünser (1999)

3.2.2 Materialbestand der Ingenieurbauwerke an Bundesfernstraßen

Als Grundlage für die Abschätzung des Materialbestandes im Bereich Brücken an Bundesfernstraßen wurde eine Aufstellung von Brücken des Bundeslandes Baden-Württemberg herangezogen. Lünser hat in seinem Buch „Ökobilanzen im Brückenbau“ (Lünser 1999) für rund 200 Brücken in Baden-Württemberg eine Auflistung nach Bauart, Länge, Breite und Ausmaß der Fahrbahnoberfläche, sowie Stahl- und Betonmenge erstellt. Wir haben diese mittleren Materialkoeffizienten für jeden Bautyp auf die anteiligen Flächenwerte der 38.500 Brücken der Bundesfernstraßen bezogen (Der Elsner 2009).

Tab. 13: Errechnete mittlere Dimensionierung einer Brücke nach Brückentyp

	Länge in m	Breite in m	Oberfläche in m ²	Baustahl kg/m ²	Spannstahl kg/m ²	Betonstahl kg/m ²	Betonmenge m ³ /m ²
Betonbrücke	217	20	4.287	-	31	71	0,65
Verbundbrücke	141	21	2.985	171	12	48	0,33
Stahlbrücken	305	23	7.021	386	-	-	-

Quelle: Eigene Berechnung auf Grundlage von Lünser (1999)

In Lünser (1999) sind vor allem die Materialbedarfe großer Autobahnbrücken aufgelistet. Die spezifischen Materialbedarfe pro m² Brückenfläche können daher tendenziell überschätzt sein. Insgesamt ist allerdings der reale Materialbestand der deutschen Straßenbrücken höher, da nur ein Drittel der Brücken in die Abschätzung mit einbezogen wurden. Die rund 38.500 Brücken der Bundesfernstraßen haben laut Elsner (2009) eine Fläche von knapp 29 Mio. m² im Jahr 2007. 70 % der Fläche sind Brücken aus Spannbeton, gefolgt von Stahlbetonbrücken (19 %). Der Rest sind reine Stahlbrücken. Aus der Verbindung der durchschnittlichen Koeffizienten pro Brückentyp mit dem

Bestand an Brückenfläche ergibt sich eine gespeicherte Betonmenge von 39,2 Mio. Tonnen, sowie Stahl in einer Größenordnung von 3,7 Mio. Tonnen (davon rund 1 Mio. Tonnen Baustahl und 2,7 Mio. Tonnen Bewehrungs- bzw. Spannstahl).

Straßentunnel

In Deutschland gibt es nach Angaben des BAST. (2009) rund 340 Straßentunnel¹² mit einer Gesamtlänge von 300 km. Im Ecoinvent-Report „Transport Services“ (Spielmann et al. 2007) wird der Materialbedarf pro m Tunnelröhre mit Bezug auf Daten von Maibach et al. (1999) und Leuenberger/Spittel (2001) wie folgt eingeschätzt:

Tab. 14: Materialbestand Straßentunnel

	kg/m
Beton	40.000
Bewehrungsstahl	1350
Stahl niedrig legiert	158

Quelle: Spielmann et al. (2007)

Weiterhin schätzen Spielmann et al. (2007) mit Bezug auf Daten von Frischknecht (1996), dass in der Schweiz 50 % der Tunnel mit zwei Tunnelröhren ausgestattet sind. Für die deutschen Tunnel an Bundesfernstraßen wird ebenfalls ein Anteil an zwei Tunnelröhren an Bundesfernstraßen von 51 % angegeben. Demnach muss man für Deutschland mit einer Tunnellänge an Bundesfernstraßen von insgesamt 450 km rechnen. Dadurch ergibt sich ein abgeschätzter Materialbedarf für Tunnelbauwerke der Bundesfernstraßen von 18 Mio. Tonnen Beton, 608.000 Tonnen Bewehrungsstahl und 71.000 Tonnen niedrig legiertem Stahl.

3.2.3 Jährliche Materialflüsse für den Neu- und Ausbau von Ingenieurbauwerken an Bundesfernstraßen

Für Brücken und Tunnel liegen lediglich Daten für den Neubau im Bereich der Bundesfernstraßen vor. Es wird deshalb auch nur dieser Teil in der Abschätzung des Materialbedarfs berücksichtigt. Der Zuwachs an Brückenfläche stammt aus *Der Elsner* (2009) und gibt den Jahresdurchschnitt zwischen 2000 und 2007 wider. Die Angaben sind unterteilt in vier Brückenkategorien. Der spezifische Materialbedarf pro m² Brückenfläche wurde wie bei den Bestandsschätzungen aus Lünser (1999) abgeleitet und der Materialbedarf pro m Tunnelröhre aus den Ecoinvent-Daten (Spielmann et al. 2007) entnommen. Die Brückenfläche der Bundesfernstraßen stieg zwischen 2000 und 2007 um 480.000 m² pro Jahr an (Tab. 15). Dies entspricht einem jährlichen Wachstum von 1,66 % bezogen auf den Bestand von knapp 29 Mio. m² Brückenfläche

¹² Es wird aus der Broschüre des BMVBS nicht deutlich, auf welchen Straßentyp sich die 340 Tunnel beziehen. Die geringe Anzahl lässt jedoch vermuten, dass hier nur die Straßentunnel der Bundesautobahnen gemeint sein können. Andere Daten zur Gesamtzahl an Tunnel liegen nicht vor.

der Bundesfernstraßen in 2007. Die Aufteilung nach Brückenkategorien wird aus der Tab. 15 ersichtlich.

Für neue Tunnelbauten liegen nur die Materialkoeffizienten aus Spielmann et al. (2007) vor. Es ist unklar, wie viele der neuen Tunnelbauten aus nur einer Tunnelröhre oder aus mehreren Tunnelröhren bestehen. Es wird allerdings vermutet, dass höhere Sicherheitsanforderungen zunehmend den Bau von je einer Tunnelröhre pro Fahrtrichtung zur Folge haben. Die insgesamt schlechte Datenlage veranlasst uns hier allerdings vorsichtig zu schätzen und die Längendaten des Neubaus wie im Bestand mit 50 % der Länge des Tunnelneubaus mit einer Tunnelröhre und 50 % der Länge mit zwei Tunnelröhren hoch zu rechnen.

Tab. 15: Aufteilung der jährlich neu erbauten Brücken und Tunnel an Bundesfernstraßen

	Ingenieurkategorie	Neubau
1. Brücken	Spannbeton (in m ²)	320.000
	Stahlbeton (in m ²)	78.571
	Stahl (in m ²)	11.429
	Stahlverbund (in m ²)	70.000
2. Tunnel (in Meter)		18.579

Quelle: Eigene Berechnung auf Grundlage von *Der Elsner* (2009)

Der überwiegende Anteil der neu gebauten Brücken ist in Spannbetonbauweise erbaut. Reine Stahlbrücken bilden die große Ausnahme. Der jährliche Neubau von Brücken und Tunneln an Autobahnen und Bundesstraßen verursacht geschätzt einen Materialbedarf von knapp 1,15 Mio. t Beton und rund 89.400 t Stahl (Tab. 16).

Tab. 16: Jährlicher Materialbedarf für den Neubau von Brücken und Tunneln der Bundesfernstraßen

In Tonnen	Ingenieurbauwerke	Stahl (in t)	Beton (in t)
1. Brücken	Spannbeton	32.760	308.692
	Stahlbeton	8.044	75.795
	Stahl	4.406	
	Stahlverbund	16.188	17.140
2. Tunnel		28.016	743.143

Quelle: Eigene Berechnung auf Grundlage von *Der Elsner* (2009), Lünser (1999) und Spielmann et al. (2007)

3.2.4 Jährliche Materialflüsse für die Instandhaltung von Ingenieurbauwerken an Bundesfernstraßen

Die Brücken und Tunnel der Bundesfernstraßen wurden überwiegend nach 1965 erbaut. Die bisherige Lebensdauer dieser Brücken ist also 45 Jahre und jünger (Der Elsner 2009). Bei einer angenommenen Lebensdauer von 50 Jahren würde entsprechend ein großer Teil der Brücken der Bundesfernstraßen in den nächsten 10 - 20 Jahren das Ende ihrer Nutzungsphase erreicht haben. Untersuchungen der BASt (Bundesan-

stalt für Straßenwesen) bescheinigen den Brücken der Bundesfernstraßen allerdings noch einen relativ guten Bauzustand. Kritisch wird hingegen der Zustand der kommunalen Brücken eingeschätzt. Laut Reidenbach et al. (2008) ist ein Großteil der kommunalen Ingenieurbauwerke hochgradig sanierungsbedürftig. Vor allem in Ostdeutschland existiert noch ein großer Nachholbedarf an Erneuerung kommunaler Bausubstanz, gerade im Bereich der Brückenbauwerke. Nach einer Untersuchung von 42 kommunalen Brücken im Vogtland sind 43 % der Brücken in so marodem Zustand, dass sie komplett ersetzt werden müssten (Schneider 2008). Auch in den alten Bundesländern ist ein hoher Anteil der kommunalen Brückenbauwerke in einem schlechten Zustand und sanierungsbedürftig. Aufgrund der schlechten Datensituation, die belastbare Abschätzungen zur Fläche von Brücken der Landes-, Kreis- und Gemeindestraßen nicht zulässt, kann in dieser Studie folglich auch keine Hochrechnung des jährlichen Materialbedarfs für den Neubau und die Instandhaltung oder den Ersatz von Brücken jenseits der Bundesfernstraßen vorgenommen werden. Zumal die Konstruktion, die verwendeten Baumaterialien und der Erstellungszeitraum der kommunalen Brücken noch deutlich divergenter als bei Bundesfernstraßen sind und damit die Berechnung des Materialbedarfs deutlich erschweren würden.

Bei einer Abschreibung des Materialbestandes der Brücken- und Tunnelbauwerke von Bundesfernstraßen über die Lebensdauer von 50 Jahren (Brücken) bzw. 100 Jahren (Tunnel) würde dies einen jährlichen Materialbedarf von 858.000 t für Brückenbauwerke und 187.000 t für Tunnel ergeben. Diese Werte sind zu 91 % (Brücken) bzw. 96 % (Tunnel) durch den Bedarf nach Beton bestimmt. Mit 81.000 t Stahl ist der jährliche Bedarf dennoch hoch.¹³

¹³ Auf Grund der Altersstruktur der Brücken an Bundesfernstraßen und der vereinfachten Annahme, dass Brücken und Tunnel am Ende ihrer Nutzungsphase in ähnlicher Materialintensität wieder an Ort und Stelle errichtet werden, ist es in unseren Augen zulässig, den Materialbedarf für Instandhaltung über die Abschreibung der technischen Lebensdauer zu ermitteln.

3.3 Schieneninfrastrukturen

3.3.1 Netzlänge und Aufbau der Schieneninfrastruktur in Deutschland

Die Netzlänge, also die Ausdehnung eines Schienennetzes kann auf drei Arten bestimmt werden:

- Streckenlänge: Die Streckenlänge gibt die Länge der befahrenen Strecken, unabhängig von der Anzahl der Gleise, an.
- Linienlänge: Bei der Linienlänge werden Strecken, die von mehreren Linien benutzt werden, mehrfach gezählt.
- Gleislänge: Die Gleislänge ist die gesamte Länge aller Gleisanlagen; eine zweigleisige Strecke wird also doppelt gezählt.

Für die Berechnung der Ressourcen, die sich im Infrastrukturtyp „Schienen“ befinden, ist die Gleislänge ausschlaggebend.

Laut aktuellen Daten des Statistischen Bundesamtes (Destatis 2010) betrug das Streckennetz der Eisenbahninfrastruktur im Jahr 2009 41.104 km. Davon waren 37.934 km Strecken, die der Eisenbahnbau und -betriebsordnung unterliegen. Die restlichen 3.170 km Streckenlänge sind Straßenbahnen, die in dieser Studie nicht mit abgeschätzt wurden. Die Aufteilung der Strecken-Kilometer in Gleislänge und unterschiedliche Streckenkategorien wurden aus Schmied/Mottschall (2010) übernommen, die auf Daten der Deutschen Bahn zurück greifen konnten, die sonst nicht öffentlich zur Verfügung stehen. Demnach betrug das Schienennetz in Deutschland (ohne Straßenbahnen und die S-Bahn-Netze Berlin und Hamburg) rund 73.000 Gleis-Kilometer. Davon wurden 87 % von der Deutschen Bahn AG betrieben, 11 % von anderen öffentlichen Bahnunternehmen und 2 % waren nichtöffentliche Gleisanlagen, z.B. Gleise auf Firmengeländen.

Tab. 17: Gleislänge des deutschen Schienennetzes im Jahr 2007 (km)

Deutsche Bahn AG	Hochgeschwindigkeitsverkehr	6.000
	Ausbaustrecke	15.220
	Übrige Strecke	30.320
	Service­strecke	11.750
Nicht-DB	Übrige Strecke	4.680
	Service­strecke	3.130
Werkbahnen		1.900

Quelle: Schmied/Mottschall (2010)

Der Unterbau

Der Unterbau umfasst alle Teile, die dazu dienen, den Oberbau zu tragen: von Erdbauwerken wie Rampen, Dämmen und Geländeeinschnitten bis zu Ingenieurbauwerken wie Brücken oder Tunnel.

Erdbauwerke

Geländeeinschnitte, bei denen Erdreich entfernt wird, gehören zu den Erdmassenbewegungen. Auch bei der Aufschüttung von Rampen und Dämmen werden erhebliche Massen an Erdmaterial umgesetzt. Inwieweit diese zum Materialspeicher der Technosphäre gezählt werden, hängt von der Ziehung der Systemgrenzen ab. Nach dem MIPS-Konzept sind jene Erdmassenbewegungen zu zählen, wenn der gesamte Primärmaterialaufwand zur Errichtung und für den Betrieb von Infrastrukturen berücksichtigt werden soll, sie werden jedoch nicht als Zugang zum Materialspeicher der Technosphäre gezählt, da sie systemtechnisch zugleich Input- und Outputströme darstellen (Schmidt-Bleek et al. 1998). In einer MIPS-Studie zur finnischen Schieneninfrastruktur wird danach auch deutlich, dass die Erdbewegungen des Unterbaus der wichtigste Faktor für den abiotischen Materialinput darstellen (Vihermaa et al. 2006). Eine Berechnung der Massen ist schwierig, da ein Damm auf tragfähigem Grund einen minimalen Aufbau von 2,50 m Höhe haben kann – auf weniger tragfähigem Grund, z.B. in einem Moorgebiet, aber durchaus Schütthöhen von bis zu 10 m keine Seltenheit sind. Man müsste also jeden Streckenabschnitt einzeln betrachten und die Höhen des Unterbaus herausfinden, um die Massen abschätzen zu können. Allerdings sind diese Massen zwar von ihrer Quantität bedeutsam, jedoch handelt es sich meist um Erdreich, dessen erneute Entnahme vom gleichen Ort für eine Wiederverwertung von untergeordneter Bedeutung ist. Daher werden diese Mengenflüsse zwar bei der Materialintensität von Bauwerken berücksichtigt, jedoch nicht bei der Abschätzung des Materialspeichers der Technosphäre.

Planum

Als oberste Schicht des Unterbaues dient eine Foundationsschicht aus Kies und Sand, die einerseits Niederschlagswasser von den Gleisanlagen ableiten soll und gleichzeitig auch als Frostschutzschicht dient. Laut Schmied/Mottschall (2010) wird sie in einer Dicke von 40 cm ausgeführt und hat eine Lebensdauer von 60 Jahren.

Der Oberbau

Auf dem Unterbau schließt sich der Oberbau an. Dieser umfasst das Gleisbett, die Schwellen und die darauf montierten Schienen. Das Gleisbett besteht entweder aus Schotter und Schwellen (Schotteroberbau) oder aus einer Festen Fahrbahn (800 km Gleislänge).

Schienen

Es gibt mehrere Arten von Schienen. Im deutschen Eisenbahnnetz sind fast ausschließlich Vignolschienen mit den drei folgenden Profilen verbaut:

- Das Profil S 49 ist mit 49,4 kg/m das Leichteste. Es war bis 1963 das Regelprofil der Deutschen Bundesbahn. Bei einem Durchschnittsalter der Gleise von ca. 30 Jahren sollte man also davon ausgehen, dass es kaum noch Abschnitte mit diesem Profil gibt. Allerdings sind laut Schmied/Mottschall (2010) noch rund 23 % der verlegten Schienenprofile vom Typ S 49.
- Das Profil S 54 wiegt 54,5 kg/m und ist seit 1963 das Regelprofil der Deutschen Bahn. Der Anteil an den verlegten Schienen in Deutschland beträgt 36 %.
- Das Profil UIC 60 mit 60,3 kg/m wird seit 1970 für hochbelastete Strecken (z.B. enge Radien, hohe Belastungen, Hochgeschwindigkeitstrassen) verwendet. Die Schienen haben in der Fertigung Längen von 60 Metern und werden vor Ort miteinander verschweißt. Rund 34 % der Gleiskilometer sind mit Schienen des Profils UIC 60 ausgeführt (Schmied/Mottschall 2010).

Auf Grund der hohen Qualitätsanforderungen an Schienen wird zur Herstellung von Schienen nur Primärstahl verwendet.

Schwellen

Schwellen tragen die Schienen. Sie bestehen aus Holz, Stahl oder Beton. Sie sind i.d.R. 2,60 m lang – unter Weichen mind. 2,80 m – und werden in einem Abstand von 60 cm verlegt. Größere Abstände bis zu max. 130 cm kann es in Ausnahmefällen geben.

Seit den 1990er Jahren werden in Deutschland hauptsächlich Betonschwellen verbaut. Sie wiegen 250 bis 300 kg. Ursprünglich wurde ihre Lebensdauer auf 60 Jahre geschätzt, mittlerweile geht man von 30 bis 40 Jahren aus. In den letzten Jahren hat es allerdings mehrere Fälle gegeben, bei denen der Beton schon nach weniger als zehn Jahren Risse bekommen hat, so dass die Schwellen erneuert werden mussten. Anscheinend stellt die Qualitätssicherung in diesem Bereich noch ein Problem dar.

Hartholzschwellen (153 kg, meist aus Buchenholz) werden auf weniger beanspruchten Gleisen verwendet. Sie werden beim Neubau weniger eingesetzt, was allerdings daran liegt, dass hauptsächlich neue Hochgeschwindigkeitsstrecken gebaut werden und selten Regionalstrecken. Der Vorteil von Holzschwellen liegt in dem einfacheren Transport durch ihr leichtes Gewicht gegenüber Stahl- oder Betonschwellen und den geringeren Herstellungskosten. Der Energieverbrauch für die Herstellung ist um ein Viertel geringer als der für eine Betonschwelle – 4.800 zu 6.300 Kilojoule (KJ) (Corbat 2008). Allerdings ist die Entsorgung schwierig, da die Schwellen – um eine lange Liegedauer von bis zu 40 Jahren zu gewährleisten – mit giftigem Holzschutzmittel – meist Teeröl – imprägniert werden und somit Sondermüll darstellen.

Stahlschwellen werden heutzutage nicht mehr verbaut, mit Ausnahme von Y-Schwellen. Diese wiegen ca. 140 kg. Durch ihre Verzweigung muss nur alle 120 cm eine Schwelle verlegt werden. Ihre Lebensdauer liegt ähnlich der der Betonschwelle bei 30 bis 45 Jahren.

Schienenbefestigungsmittel

Die Schienenbefestigungsmittel halten die Schienen an den Schwellen. Es gibt verschiedene Möglichkeiten: Schienennägel, Schwellenschrauben, Schrägfedernägel, Federklammern u.a.. Ihr Einsatz hängt zudem vom verwendeten Schwellentyp ab.

Der Oberbau K wurde bis Ende der 80er Jahre verwendet:

- Schiene – Pappelholzplättchen – Rippenplatte
- Hakenschraube – Schraubenmutter – Federring – Klemmplatte
- Schwellenschraube

Der modifizierte Oberbau KS wird seit Ende der 80er Jahre verwendet:

- Schiene – Kunststoffzwischenlage – Rippenplatte
- Hakenschraube – Schraubenmutter – Epsilon-Spannklemme
- Schwellenschraube

Für die Befestigung von S-54- und UIC-60-Schienen auf Betonschwellen wird die Bauart W verwendet:

- Schiene – 5 mm dicke Kunststoffzwischenlage – Betonschwellen
- Epsilon-Spannklemmen, in Kunststoffdübel eingedrehte Schwellenschrauben

Schotteroberbau

Bis auf 800 km Feste Fahrbahn werden die Schwellen in einer Schotterschicht gebettet, die wiederum die Schienen tragen. Das Schotterbett hat eine Regelstärke von 30 bis 40 cm. Seit Anfang der 1990er Jahre wird im Bereich der DB nur noch Schotter der Körnung 1 (\varnothing 30 bis 65 mm) verwendet. Das Schotterbett hat laut Schmied/Mottschall (2010) eine Lebensdauer von 15 Jahren und rund 0,1 % der Schottermasse muss pro Jahr bei der Instandhaltung des Schotterbettes (Reinigen und Stopfen) ersetzt werden.

Feste Fahrbahn

Bei der Festen Fahrbahn besteht der Oberbau aus einer Beton- oder Asphaltplatte, auf die entweder direkt die Schienen oder erst Betonschwellen und dann die Schienen montiert werden. Die Feste Fahrbahn wird in Deutschland seit 1991 vor allem auf Hoch- und Höchstgeschwindigkeitsstrecken sowie auf Tunnelabschnitten eingesetzt. Die teure Herstellung verhindert, dass sie flächendeckender gebaut wird. Außerdem gibt es eine höhere Schallemission als beim Schotteroberbau, die nur durch aufwändi-

ge und teure Maßnahmen zu verringern ist. Die Lebensdauer wurde auch hier anfangs auf mindestens 60 Jahre geschätzt; allerdings gibt es immer wieder Problemen mit der Qualität des Betons, so dass die Lebensdauer derzeit als kürzer eingeschätzt werden muss.

Es gibt drei mögliche Aufbauten für eine Feste Fahrbahn:

- Schiene – Spannbetonschwelle – Asphalttragschicht – Hydraulisch gebundene Tragschicht aus Mineralstoffgemisch;
- Schiene – Spannbetonschwelle – Betontragschicht – Hydraulisch gebundene Tragschicht aus Mineralstoffgemisch;
- Schiene – Betontragschicht – Hydraulisch gebundene Tragschicht aus Mineralstoffgemisch.

Als Schiene wird grundsätzlich der Typ UIC-60 verwendet. Die Tragschichten sind zwischen 200 und 300 mm stark. Die obere Tragschicht ragt etwa zehn Zentimeter über die Schwellen hinaus, die untere ca. 60 cm.

Weichen

Auf dem Streckennetz der Deutschen Bahn gibt es ca. 73.000 Weichen (Bahn TV 2008). Es gibt vier gängige Arten von Weichen: einfache Weichen, Doppelweichen, Kreuzungsweichen und Bogenweichen. Jede Weichenart besteht aus den Schienen des jeweiligen Gleises und zusätzlichen Bauteilen (Radlenker, seitliche Stützen etc.). Die Schwellen unter Weichen sind etwas länger als unter normalen Schienen. Die Materialintensität eines Gleises ist also an einer Weiche etwas höher als auf der freien Strecke. Allerdings ist eine Berechnung nicht möglich, da nicht herauszufinden ist, welche Anzahl es von welcher Weichenart gibt. Die Unterschiede dürften für den gesamten Materialbestand der Schieneninfrastruktur aber vernachlässigbar sein.

Ingenieurbauwerke

Im Streckennetz der DB gab es im Jahr 2008 ca. 26.900 Brücken mit einer Gesamtlänge von 611 km sowie 598 Tunnel mit einer Gesamtlänge von 452 km (Schmied/Mottschall 2010). Nicht berücksichtigt sind Brunnen und Tunnel an stillgelegten Streckenabschnitten. Der Großteil der Brücken waren Brücken über Straßen (46 %) und Wasserläufen (29 %). Große Talbrücken, die meist als Spannbetonbrücken ausgeführt sind, sind sowohl von ihrem Anteil am Brückenbestand als auch an der Brückenlänge von geringer Bedeutung. Kleinere Brücken sind oft als Stahlbetonbrücken gefertigt. Schmied/Mottschall (2010) berechnen den Materialbedarf für drei verschiedene Brückentypen (Talbrücken, Stahlbrücken und einfache Betonbrücken). Diese Daten bilden die Grundlage für unsere Abschätzungen.

Die Durchschnittslänge der Tunnel im Netz der Deutschen Bahn AG ist laut Schmied/Mottschall (2010) 760 m. Sie werden danach unterschieden, ob sie in offener oder geschlossener Bauweise erstellt wurden. Offene Bauweise bedeutet, dass die

Tunnelröhre in einer offenen Baugrube gefertigt wurde, die nach Fertigstellung verfüllt wurde und sich so ins Landschaftsbild einfügt. Bei geschlossener Ausführung wird der Tunnel mittels Maschinen oder Sprengungen in den Fels getrieben. Der Beton- und Stahlverbrauch unterscheidet sich erheblich zwischen den beiden Bauformen. Nach Schmied/Mottschall (2010) werden in den letzten Jahren Tunnel vor allem in geschlossener Bauweise erstellt, allerdings schätzen sie den Anteil der Tunnel in offener Bauweise am Bestand mit 20 – 25 % ein.

Weitere Anlagen

Streckenelektrifizierung

Rund die Hälfte des deutschen Bahnnetzes ist elektrifiziert. Zu der Elektrifizierung gehören die Oberleitungen sowie die zur Aufhängung benötigten Masten. Zudem besitzt die Deutsche Bahn eine eigene Energieversorgung mit eigenem Netz und eigenen Kraftwerken, die den Bahnfahrstrom erzeugen.¹⁴

Die Masten bestehen zumeist aus Stahl, selten aus Stahlbeton und sind mindestens sieben Meter hoch. Bei entsprechenden Geländebedingungen können Oberleitungsmasten auch deutlich höher gebaut sein. Die Abstände der Masten richten sich nach der Art der Strecke und den Geländebedingungen. Im Durchschnitt steht auf Hochgeschwindigkeitsstrecken alle 60 Meter und auf den übrigen Strecken alle 70 Meter ein Mast. An mehrgleisigen Strecken werden teilweise Masten aufgestellt, die zwei oder mehr Fahrdrähte halten. Diese Bauweise ist hinsichtlich der Masten weniger aufwändig, allerdings ist die Materialintensität pro km Streckenelektrifizierung ähnlich der der Aufstellung von einem Mast pro Gleis, da zum einen höhere Masten verwendet werden und zum anderen die Ausleger entsprechend länger sein müssen. Insofern ist es zulässig näherungsweise von einem Mast pro 60 bzw. 70 Meter Gleis auszugehen.

An den Masten sind Ausleger aus Stahl oder Aluminium befestigt. Die Materialintensität hängt nicht von festen Werten wie z.B. der Streckenklasse ab; im Neubau wird anscheinend vermehrt Aluminium verwendet. Zwischen dem Mast und dem Ausleger befinden sich Silikon-Isolatoren, die allerdings in dieser Studie nicht mit abgeschätzt wurden.

An den Auslegern ist der Fahrdraht aus Kupfer befestigt. Seine Legierung hängt davon ab, um welchen Streckentyp es sich handelt: Es gibt Kupfer-Silber-Legierungen bei Ausbaustrecken bis zu 230 km/h und Kupfer-Magnesium-Legierungen bei Hochgeschwindigkeitsstrecken bis zu 350 km/h. Der Fahrdraht wird von einem parallel verlaufenden magnesiumlegierten Kupfertrageseil gehalten. Dazwischen gibt es im Durchschnitt alle 10 Meter einen Abstandhalter aus Bronze. Bei Strecken ab 160 km/h befindet sich an jedem Mast zusätzlich ein bronzenes Y-Beiseil zur Stabilisierung.

¹⁴ Die Energieversorgung der Bahn ist nicht Bestandteil dieser Studie.

Signaltechnik

Entlang der Bahnstrecken existieren umfangreiche Signal- und Kommunikationsanlagen. Die Signaltechnik wird überwiegend von Stellwerken aus gesteuert und dient dazu, bestimmte Streckenabschnitte für die Durchfahrt zu sperren oder frei zu geben. Auf Ausbau- und Hochgeschwindigkeitsstrecken wird weiterhin noch eine so genannte Linienzugbeeinflussung zur Steuerung des Schienenverkehrs verwendet. Signalanlagen haben eine Nutzungsdauer von ca. 20 Jahren (DB Netz AG 2007). Köser et al. (2002) geben laut Schmied/Mottschall (2010) eine Lebensdauer von 25 Jahren (Haupt- und Vorsignale) bzw. 15 Jahren (Weichen-Signale) an.

Eine Abschätzung der Anzahl und damit verbundenen Materialmengen von Signalen ist schwierig, da es sehr viele unterschiedliche Bauarten von Signalen gibt. Schmied/Mottschall (2010) geben mit Verweis auf Studien der UIC (2010) und Köser et al. (2002) an, dass auf einen Kilometer zweigleisiger Strecke durchschnittlich 3,3 (UIC) bzw. 2,1 Signalanlagen (Köser et al.) installiert sind. Die Signaltechnik ist über Kabel mit den Stellwerken verbunden, zusätzlich verfügt die Deutsche Bahn AG noch über eigene Telekommunikationsleitungen entlang der Gleise. Im Bestand sollte die Mehrzahl der Kabel mit einem Kupferleiter und einer Ummantelung auf PVC- bzw. PE-Kunststoff verlegt sein. In den letzten Jahren werden aber auch vermehrt Glasfaserkabel verlegt. Während Köser et al. (2002) von 3,6 km Kabel pro zweigleisigem Strecken-Kilometer ausgehen, rechnen Schmied/Mottschall (2010) mit 8,5 km pro zweigleisigem Strecken-Kilometer.

Die Kabel werden häufig in Kabelkanälen entlang der Bahnstrecken geführt. Die Kanäle sind aus Beton gefertigt.

Stellwerke

Neben Signalen werden in Stellwerken auch noch Weichen zentral geregelt. Es gibt mechanische, elektromechanische und elektronische Stellwerke. Im Bereich der Deutschen Bahn werden hauptsächlich elektronische Stellwerke neu gebaut, die große Bereiche des Streckennetzes überwachen. Nach Angaben der DB AG sind im Netz der DB ca. 700 elektronische Stellwerke in Betrieb (DB AG 2007). Hinzu kommen rund 3.800 mechanische und elektromechanische Stellwerke (Schmied/Mottschall 2010).

Da es sich bei Stellwerken um Gebäude handelt, die in ihrem Aufbau und ihrer Größe sehr unterschiedlich ausfallen können, ist eine Berechnung der Ressourcen zu diesem Punkt nicht ohne weiteres möglich. Wir haben deshalb die Daten aus Schmied/Mottschall (2010) übernommen.

Bahnhöfe und andere Gebäude

Die Deutsche Bahn unterhält ca. 5.400 Bahnhöfe, davon rund 200 reine S-Bahnhöfe. Die Bahnhöfe werden von der DB AG in 6 Kategorien nach ihrer Bedeutung für den Schienenverkehr klassifiziert. Schmied/Mottschall (2010) konnten mit internen Daten der DB AG den verschiedenen Bahnhofs-Kategorien typische Gebäude- und Bahn-

steigflächen zuordnen und so den Bestand an Beton und Stahl für diese Gebäude abschätzen. Der Beton- und Stahlverbrauch für die Erstellung der Bahnwerke und Güterbahnhöfe wurde in Schmied/Mottschall (2010) ebenfalls über die Flächen- und Stockwerksabschätzung ermittelt. Diese Daten wurden für unsere Studie übernommen.

3.3.2 Materialbestand der Schieneninfrastrukturen

Ein Großteil der Daten wurde aus der aktuellen UBA-Studie übernommen, die von Schmied/Mottschall im Jahr 2010 mit detaillierten Daten der DB AG erstellt wurde. Zusätzlich wurden aus Fielder (2005), Fendrich (2007), sowie verschiedenen Herstellerangaben spezifische Gewichtsangaben sowohl für den Oberbau als auch für die Oberleitung samt Masten recherchiert. Die Daten beziehen sich wie bei Schmied/Mottschall (2010) auf die Schieneninfrastruktur ohne S-Bahn, U-Bahnen oder Straßenbahnen.

Diese Daten sind als Durchschnittswerte zu verstehen. In Bahnhöfen ist nicht für jedes Gleis ein Mast vorhanden, dafür sind die Masten häufig deutlich höher und massiver gebaut, da sie mehrere Oberleitungen tragen müssen. Neben Schmied/Mottschall (2010) wurden zudem noch Daten von Spielmann et al. (2007) und von Rozycki et al. (2003) als Quellen für die Ermittlung spezifischer Materialkoeffizienten verwendet. Die Aktualität und Detailtiefe der Daten aus Schmied/Mottschall (2010) veranlasste uns auf diese Daten zurückzugreifen und die weiteren Literaturquellen lediglich als Kontrollvariable zu verwenden.

Zur Abschätzung muss zunächst das Streckennetz sowohl nach Streckentyp, ein- oder zweigleisig, und schließlich ob elektrifiziert oder nicht differenziert werden. Für die 73.000 km Gleislänge wird folgende Einteilung aus den vorhandenen Daten abgeleitet:

Tab. 18: Aufteilung der Gleis-Kilometer nach Bauart

	gesamt	Feste Fahr- bahn	HGV	ABS	übrige Strecke DB	Service- strecke DB	übrige Netz nicht- DB	Service- strecke nicht- DB	Werk- bahnen
Gleislänge	73.000	800	5.200	15.220	30.320	11.750	4.680	3.130	1.900
Elektrifiziert	33.400	800	5.200	15.220	9.100	0	1.404	0	0
2-gleisig (55 % laut Destatis 2005)		800	5.200	15.220	19.000				
1-gleisig (45 % laut Destatis 2005)		0	0	0	11.320	11.750	4.680	3.130	1.900

Quelle: Eigene Zusammenstellung nach Schmied/Mottschall (2010)

Wie man der Tabelle entnehmen kann, gehen wir davon aus, dass die Hochgeschwindigkeits- und Ausbaustrecken zu 100 % sowohl zweigleisig als auch elektrifiziert ausgebaut sind. Da laut Destatis (2008b) 45 % der Strecken 1-gleisig verlaufen, werden die Nicht-DB-Strecken sowie die Servicestrecken der DB komplett als 1-gleisige Strecken gewertet.

Unterbau

Für das Planum werden die Daten aus Schmied/Mottschall (2010) übernommen, die für eingleisige Strecken einen Kies- und Sandbedarf von 9,6 t/km bei Neubaustrecken und 7,4 t/km bei den übrigen Strecken angeben. Zweigleisige Strecken brauchen wegen der größeren Breite der Planumschicht demnach 14,9 t/km (Neubaustrecke) bzw. 12,3 t/km (übrige Strecke). Für Erdarbeiten zur Erstellung des Schienendamms werden in Schmied/Mottschall (2010) basierend auf zwei nicht öffentlich zugänglichen Studien (UIC 2010, Köser et al. 2002) pro Meter zweigleisiger Strecke im Neubau 180 m³ Aushub und 135 m³ Verfüllung angenommen. Für die übrigen zweigleisigen Strecken wird hingegen nur ein Aushub von 75 m³ pro Meter bzw. eine Verfüllmenge von 25 m³/m unterstellt.

Oberbau

Weiterhin wird angenommen, dass Stahlschwellen nur noch in sehr geringen Stückzahlen verbaut sind. Der Großteil der verwendeten Schwellen im Netz der DB sind Betonschwellen. Wir übernehmen die Angaben aus Schmied/Mottschall (2010), die von 75 % Betonschwellen, 16 % Holz- und 7 % Stahlschwellen im deutschen Netz ausgehen. Die restlichen 2 % der Schwellen konnten nicht zugeordnet werden. Da in Hochgeschwindigkeits- und Ausbaustrecke ausschließlich Betonschwellen verwendet werden, ordnen wir die Holz- und Stahlschwellen vollständig den Nebenstrecken und Servicestrecken der Deutschen Bahn zu.

In den folgenden Tabellen sind die spezifischen Materialkoeffizienten aufgeführt, die für die Materialabschätzungen verwendet werden. Die Werte wurden aus Schmied/Mattschall (2010) übernommen, die auf interne Daten der Deutschen Bahn AG zurückgreifen konnten.

Tab. 19: Spezifische Materialkoeffizienten Bahnschwellen

in t/km	Betonschwellen		Holzschwellen		Stahlschwellen
	Beton	Bewehrungsstahl	Buchenholz	Teeröl	Stahl
1-gleisig	455,1	11,7	255,1	23,3	238,4
2-gleisig	910,2	23,3	510,1	46,7	476,8

Quelle: Schmied/Mottschall (2010)

Schmied/Mottschall (2010) geben mit Verweis auf Werner (2008) an, dass 14 kg Teeröl zur Imprägnierung der Holzschwellen verwendet werden. Daraus ergibt sich ein Bedarf an Teeröl von 23,3 Tonnen pro km Gleisstrecke. Die Daten für Betonschwellen stimmen mit unseren Abschätzungen sowie den Angaben in anderen Veröffentlichungen (z.B. Spielmann et al. 2007) überein.

Tab. 20: Spezifische Materialkoeffizienten Befestigung Schienen

in t/km	Befestigung Schienen					
	Betonschwellen		Holzschwellen		Stahlschwellen	
	Eisenteile	Kunststoff (PE)	Eisenteile	Kunststoff (PE)	Eisenteile	Kunststoff (PE)
1-gleisig	7,7	2	43,2	0,4	9,1	0,4
2-gleisig	15,4	4	86,4	0,8	18,2	0,8

Quelle: Schmied/Mottschall (2010)

Die Angaben von Schmied/Mottschall (2010) stimmen für Beton- und Stahlschwellen mit unseren Angaben überein. Die detaillierteren Daten in Schmied/Mottschall mit deutlich höheren Werten für die Befestigung der Schienen auf Holzschwellen veranlassen uns, diese Daten zu verwenden.

Tab. 21: Spezifischer Materialkoeffizient Bahnschotter

in t/km	Schotter		
	Betonschwellen	Holzschwellen	Stahlschwellen
1-gleisig	3.573	3.030	2.319
2-gleisig	7.099	6.141	4.907

Quelle: Schmied/Mottschall (2010)

Tab. 22: Spezifischer Materialkoeffizient Feste Fahrbahn

in t/km	Feste Fahrbahn	
	Beton	Bewehrungsstahl
1-gleisig	2.717	66
2-gleisig	5.434	133

Quelle: Schmied/Mottschall (2010)

Die Betonwerte für Feste Fahrbahnen werden bei Schmied/Mottschall aus verschiedenen Beispieldatensätzen zweier Neubaustrecken (Köln-Rhein/Main, Nürnberg-Ingolstadt) abgeleitet und von uns zur Berechnung des Materialbestandes verwendet.

Tab. 23: Spezifischer Materialkoeffizient Bahnschienen

		S49	S54	UIC60	Sonstige (wie UIC60)
Stahl pro Schiene	kg/m	49,43	54,54	60,34	60,34
Stahl – eingleisig	t/km	98,86	109,08	120,68	120,68
Stahl – zweigleisig	t/km	197,72	218,16	241,36	241,36
Anteile am Schienennetz in %					
		23	34	36	7

Quelle: Schmied/Mottschall (2010)

Oberleitung

Für die Abschätzung der gespeicherten Materialmengen in der Schieneninfrastruktur wird angenommen, dass die Oberleitungsmasten an Hochgeschwindigkeits- und Ausbaustrecken komplett aus Betonmasten gefertigt sind. Für übrige Strecken wird dagegen von 80 % Stahl- und 20 % Betonmasten ausgegangen. Eine weitere getroffene Annahme ist, dass an eingleisigen Strecken nur auf einer Gleisseite Masten verwendet werden, an zweigleisigen Strecken dagegen auf beiden Gleisseiten. Eine Unterscheidung zwischen ein- und zweigleisig muss daher nicht vorgenommen werden. Allerdings müssen die Tunnel-Kilometer mit geringeren Werten berechnet werden, da im Tunnel die Oberleitung an der Tunneldecke angebracht werden kann.

Tab. 24: Spezifischer Materialkoeffizient Oberleitungsmasten

Oberleitungsmasten	in t/km
HGV/ABS ohne Tunnel - 2 gleisig	
Beton	91,68
Bewehrungsstahl	44,4
Stahl	6,6
Aluminium	4,3
HGV/ABS mit Tunnel - 2 gleisig	
Beton	0,24
Bewehrungsstahl	0
Stahl	6,6
Aluminium	4,3
übrige Strecken ohne Tunnel: Betonmasten - 2	
Beton	74,64
Bewehrungsstahl	36,1
Stahl	5,3
Aluminium	3,5
übrigen Strecken ohne Tunnel: Stahlmasten - 2	
Beton	18
Bewehrungsstahl	33,6
Stahl	17,8
Aluminium	3,5
übrigen Strecken mit Tunnel - 2 gleisig	
Beton	0,24
Bewehrungsstahl	0
Stahl	5,3
Aluminium	3,5

Quelle: Schmied/Mottschall (2010)

Die Werte für Oberleitungsmasten leiten Schmied/Mottschall (2010) von zwei Studien Köser et al. (2002) und UIC (2010) ab. Die Werte für Stahl und Aluminium beziehen sich auf die Ausleger der Oberleitungsmasten, an denen der Oberleitungsdraht befestigt ist.

Tab. 25: Spezifischer Materialkoeffizient Oberleitungsdraht

Oberleitungsdraht	
Hochgeschwindigkeit – zweigleisig	in t/km
Kupfer	2,1
Bronze	2,5
Ausbaustrecke – zweigleisig	in t/km
Kupfer	2
Bronze	1,3
übrige Strecken – zweigleisig	in t/km
Kupfer	1,8
Bronze	1,1

Quelle: Schmied/Mottschall (2010)

Ein weiterer Bestandteil der Elektrifizierung von Bahnstrecken sind so genannte Unterwerke. Diese dienen als Transformatoren entlang der elektrifizierten Strecken.

Mit Rückgriff auf verschiedene Literaturquellen gehen Schmied/Mottschall in ihrer Studie von einem Unterwerk alle 170 km Gleislänge aus. Dies sind geringere Angaben als in den bei Schmied/Mottschall zitierten Studien Köser et al. (2002) und UIC (2010), die sich jedoch auf Hochgeschwindigkeitsstrecken beziehen.

Tab. 26: Materialbedarf Unterwerke

	in t/km
Stahl	1,18
Kupfer	0,72
Mauerwerk	2,95
Beton	0,26

Quelle: Schmied/Mottschall (2010)

Signaltechnik

Ursprünglich waren die Unterwerke, Signaltechnik und Gebäude mangels vorhandener Daten nicht für die Abschätzung des Materialbedarfs der Schieneninfrastruktur vorgesehen. Da zum Ende der MaRes-Projektlaufzeit die parallel erarbeiteten Daten der Schmied/Mottschall-Studie zur Verfügung standen, wurden die entsprechenden Angaben in die Gesamtabschätzung des Materialbestandes der Schieneninfrastruktur integriert.

Für die Gesamtmenge des Materialbestandes der Schieneninfrastruktur ist die Signaltechnik allerdings relativ unbedeutend.

Tab. 27: Spezifische Materialkoeffizienten Signaltechnik

in t/km		1-gleisig	2-gleisig
Signaltechnik	Beton	1,008	1,68
	Stahl	0,8	1,34
Kabel Signaltechnik	Kupfer	3,46	5,77
	PE	2,35	3,92
Kabelkanal Signaltechnik	Beton	50	83,3
Linienzugbeeinflussung	Kupfer	1,39	2,79
	PE	0,94	1,89
Stellwerk	Beton/Ziegelwerk		7,16
	Stahl		0,56
	Kupfer		0,03
	HDPE		0,04

Quelle: Schmied/Mottschall (2010)

Gebäude der Schieneninfrastruktur

Schmied/Mottschall (2010) geben in ihrer Studie die geschätzten Beton- und Stahlmengen für die Personen- und Güterbahnhöfe sowie die Instandhaltungswerke der Deutschen Bahn an. Die Personenbahnhöfe werden dabei mit der durchschnittlichen Materialmenge pro entsprechende Bahnhofskategorie verknüpft. Die Güterbahnhöfe und Instandhaltungswerke werden mit durchschnittlichen Quadratmeterzahlen und Stockwerken und den daraus abgeleiteten Beton- und Stahlmengen hochgerechnet.

Tab. 28: Spezifischer Materialbedarf Personenbahnhöfe

Bahnhofskategorien	Anzahl	Fläche in m ² (inkl. Bahnsteige)	Beton in t pro Bahnhof	Stahl in t pro Bahnhof
1	20	49.121	60.180	1.177
2	63	20.509	25.015	477
3	216	9.694	12.859	238
4 bis 6	4.883	2.672	4.336	70

Quelle: Schmied/Mottschall (2010)

Tab. 29: Spezifischer Materialbedarf Güterbahnhöfe und Instandhaltungswerke

Aufwand pro Werk	Beton in t	Stahl in t
Instandhaltungswerke der DB AG	55.370	1.172
Güterbahnhöfe	6.842	150

Quelle: Schmied/Mottschall (2010)

Ingenieurbauwerke der Deutschen Bahn AG (Brücken und Tunnel)

Schmied/Mottschall unterscheiden zwischen Talbrücken, die deutlich materialintensiver sind, Betonbrücken über Straßen und Stahlbrücken. Bei Tunneln wird zwischen Tunneln in geschlossener und offener Bauweise unterschieden.

Tab. 30: Spezifischer Materialbedarf Eisenbahnbrücken

Brücken	Beton in t/m	Bewehrungsstahl in t/m	Konstruktionsstahl in t/m
Talbrücke	76,8	2,975	0,525
Betonbrücken	33,6	1,275	0,225
Stahlbrücken			7,2

Quelle: Schmied/Mottschall (2010)

Tab. 31: Spezifischer Materialbedarf von Eisenbahntunneln

Tunnel	Beton in t/m	Stahl in t/m	Ausbruch m ³ /m
geschlossene Bauweise	89,28	1,6	127,9
offene Bauweise	117,6	6,1	299,8

Quelle: Schmied/Mottschall (2010)

Aus der Verteilung der Gleis-Kilometer (Tab. 18), der Tunnel- und Brücken-Kilometer kombiniert mit den einzelnen spezifischen Materialkoeffizienten (Tab. 19 bis Tab. 31) sowie der Materialabschätzung für 5.182 Personenbahnhöfe, 741 Güterbahnhöfe und 107 Instandhaltungswerke der Deutschen Bahn ergibt sich ein Gesamtmaterialbestand der deutschen Schieneninfrastruktur von rund 1,1 Mrd. Tonnen. Davon sind 98 % mineralische Rohstoffe, vor allem Sand-Kies des Planums (670 Mio. Tonnen), Beton für Schwellen, Tunnelbauten und Gebäude von zusammen 138 Mio. Tonnen, sowie Granit für den Gleisschotter (314 Mio. Tonnen).

Tab. 32: Materialbestand Schieneninfrastruktur

		in 1.000 t
Mineralische Rohstoffe	Sand-Kies	670.515
	Beton	137.565
	Granit	313.935
	Mauerwerk	99
Metalle	Bewehrungsstahl	4.667
	Primärstahl	13.354
	Eisen/Stahl	2.827
	Aluminium	134
	Kupfer	436
	Bronze	46
Kunststoff	PE	396
	HDPE	3
Sonstige	Teeröl	273
	Buchenholz	2.979
Summe		1.147.229

Quelle: Eigene Berechnung auf Grundlage von Schmied/Mottschall (2010) und eigenen Abschätzungen

3.3.3 Jährlicher Materialbedarf für Neu- und Ausbau der Schieneninfrastruktur

Das Gesamtstreckennetz des Schienenverkehrs ist in den letzten Jahren geschrumpft, auch wenn die Streckenlänge in 2009 wenige Kilometer länger ist als 2008. Eine Ableitung des Neubaus über die Veränderung der Gesamtlänge ist also nicht möglich, da trotz schrumpfender Gesamtstreckenlängen noch neue Bahnstrecken gebaut bzw. ausgebaut werden. Destatis (2008b) veröffentlicht mit den „Betriebsdaten des Schienenverkehrs“ Angaben zur Entwicklung des Schienennetzes in der Aufteilung nach

Neubau, Netzabbau und Reaktivierung. Die Werte für die Jahre 2006 bis 2008 sind in Tab. 33 dargestellt. Ähnlich wie bei den Bundesautobahnen ist die Gesamtzahl der fertig gestellten Gleisabschnitte der einzelnen Jahre sehr unterschiedlich. Es macht daher wenig Sinn, mit den konkreten Daten eines Jahres zu rechnen. Zudem werden diese Fertigstellungen auch durch externe Ereignisse beeinflusst. Der hohe Anteil an Netzneubau im Jahr 2006 ist auch bedingt durch die Fußball-WM 2006, zu der bestimmte Strecken fertig gestellt sein sollten.

Tab. 33: Entwicklung des Schienennetzes (km)

	2005	2006	2007	2008
Streckenlänge	38.206	38.165	38.005	37.798
Gleislänge	70.557			
Netzabbau		243,9	385,7	231,5
Neubau		137,3	56,1	24,3
Reaktivierung		65,7	169,2	169,2

Quelle: Destatis (2008b)

Aus dem gemittelten Wert der Jahre 2006 - 2008 würde sich ein Neubau von 73 km Streckenlänge pro Jahr, oder 146 km Gleislänge ergeben. Eine Analyse der Bauzeiten einiger Neubaustrecken (Köln - Rhein/Main, Hannover - Würzburg, Nürnberg - Erfurt sowie Nürnberg - Ingolstadt) ergibt eine Fertigstellung pro Jahr zwischen 5 km (Nürnberg - Erfurt, 107 km Neubaustrecke von 1996 bis geplant 2017)¹⁵ bzw. 20 km (Köln - Rhein/Main, 143 km von 1995 - 2002). Aus diesen Fertigstellungszeiträumen scheinen 73 km Neubaustreckenlänge pro Jahr als zu hoch geschätzt. Wir schätzen in dieser Studie den jährlichen durchschnittlichen Materialbedarf für Neubaustrecken von 50 km Streckenlänge oder 100 km Gleislänge. Es liegen keine Informationen darüber vor, ob die Neubaustrecken mit Fester Fahrbahn oder herkömmlich mit Betonschwellen in Schotterbauweise errichtet wurden. Weiterhin ist nicht bekannt, ob die Strecken ein- oder zweigleisig gebaut wurden. Allerdings zeigen die online verfügbaren Informationen der z.Z. im Bau befindlichen Strecken bzw. der kürzlich fertig gestellten Strecken, dass diese mittlerweile fast vollständig in der Bauweise Feste Fahrbahn erstellt werden. Die Abschätzung des Materialbestandes basiert damit auf der Annahme, dass alle Neubau-Strecken als zweigleisige Feste Fahrbahnen gebaut werden.

Damit ist aber nur ein Teil der Baumaßnahmen im Bereich der Schieneninfrastruktur erfasst. Neben dem Bau von kompletten Neubaustrecken werden bestehende Strecken von Grund auf saniert und so für höhere Geschwindigkeiten ausgebaut. Die so überholten Strecken-Kilometer sollten den Anteil der reinen Neubaustrecken übersteigen. Es liegen jedoch keine konkreten Daten für das Gesamtnetz vor. Um dennoch ein Verhältnis für die Neubaustrecke vs. Ausbaustrecke festzulegen, wurde eines der

¹⁵ Die lange Bauzeit ergibt sich zum einen aus einem mehrjährigen Baustopp, veranlasst im Jahr 2002, sowie dem Umstand, dass 53 km der 107 km langen Neubaustrecke in Form von Tunneln und Brücken erstellt werden müssen.

wichtigsten Bauprojekte der Deutschen Bahn, die Strecke München - Berlin, näher analysiert. Im Jahr 2006 wurden 3 von 5 Bauabschnitte dieser Strecke eröffnet mit einer Gesamtlänge von 358 km. Der Abschnitt Nürnberg - Ingolstadt über 89 km war eine Neubaustrecke, die Abschnitte Berlin - Halle/Leipzig (187 km) und Ingolstadt - München (82 km) waren Ausbaustrecken. Verallgemeinert man diese Zahlen kommt man auf ein Verhältnis von 1:3 zwischen Neubau- und Ausbaustrecke. Wird zudem unterstellt, dass Ausbaustrecken ebenfalls durchgängig als zweigleisige Strecke modernisiert werden, ergeben sich bei 100 km neugebauter Gleislängen modernisierte Gleislängen als Ausbaustrecke von 300 km.

Auch bei der Abschätzung des Materialbedarfs für Ausbaustrecken stellt sich die Frage, in welcher Bauweise diese modernisiert wurden. Beispiele wie die Strecke Berlin – Hamburg zeigen, dass dies noch überwiegend in üblicher Schotterbauweise mit Betonschwellen erfolgt. Weiterhin stellt sich die Frage, ob die Oberleitung nur teilweise oder komplett inklusive Mast erneuert wird. Darüber liegen keine Informationen vor. Daher wird für die Abschätzung des jährlichen Materialbedarfs für die Modernisierung bestehender Fernverkehrsstrecken zu Ausbaustrecken eine komplette Erneuerung der Oberleitungsinfrastruktur und die Verwendung von Betonmasten angenommen. Da auf bestehende Streckenanlagen zurückgegriffen wird, wäre es unzulässig, auch den Unterbau mit in die Berechnung für den Ausbau einfließen zu lassen, auch wenn es durch Gleisverlegungen durchaus zu Neubauten des Unterbaus bei Ausbaustrecken kommen kann. Für die Abschätzung werden daher nur 10 % der spezifischen Materialkoeffizienten pro km für den Unterbau verwendet.

Die Abschätzung des jährlichen Materialbedarfs bezieht sich somit auf zum Teil geschätzte Daten und eine Reihe Annahmen. Aus der jährlich neugebauten Streckenlänge von 100 km und dem Ausbau von 300 km ergeben sich pro Jahr folgende Materialbedarfe:

Tab. 34: Jährlicher Materialbedarf für Neu- und Ausbau der Schieneninfrastruktur

		in 1.000 t
Mineralische Rohstoffe	Sand-Kies	1.936
	Beton	1.461
	Granit	2.840
	Mauerwerk	1
Metalle	Bewehrungsstahl	54
	Primärstahl	98
	Eisen/Stahl	10
	Aluminium	2
	Kupfer	5
	Bronze	1
Kunststoff	PE	4
	HDPE	0
Sonstige	Teeröl	0
	Buchenholz	0
Summe		6.411

Quelle: Eigene Berechnungen, auf Basis der Koeffizienten aus Schmied/Mottschall (2010)

Neben knapp 6,23 Mio. Tonnen mineralischer Rohstoffe (Kies, Schotter, Beton) fällt der jährliche Bedarf von knapp 152.000 Tonnen Stahl für Schienen und Bewehrung ebenfalls hoch aus.

3.3.4 Jährlicher Materialbedarf für die Erneuerung und Instandhaltung der Schieneninfrastruktur

Neben dem Neu- und Ausbau bedarf es auch einer regelmäßigen Instandhaltung des Streckennetzes. Zur Abschätzung des jährlichen Materialbedarfs für Instandhaltung könnte die Abschreibung über die technische Lebensdauer erfolgen. Allerdings zeigen die Probleme mit den Betonschwellen auf der Strecke Hamburg-Berlin, dass die erwartete Lebensdauer für bestimmte Bestandteile der Schieneninfrastruktur zu optimistisch eingeschätzt wird. Andere Streckenelemente werden u. U. auch über ihre technische Lebensdauer hinweg weiter genutzt. Schmied/Mottschall (2010) geben für alle einzelnen Bestandteile der Schieneninfrastruktur Daten zur technischen Lebensdauer an. Schreibt man die Materialbestände über die entsprechenden technischen Lebensdauern ab, kommt man auf einen jährlichen Instandhaltungsbedarf in Höhe von 41,3 Mio. Tonnen.

Tab. 35: Jährlicher Materialaufwand für Instandhaltung über technische Lebensdauer abgeleitet

		in 1.000t
Mineralische Rohstoffe	Sand-Kies	12.395
	Beton	2.517
	Granit	25.614
	Mauerwerk	0
Metalle	Bewehrungsstahl	85
	Primärstahl	437
	Eisen/Stahl	88
	Aluminium	2
	Kupfer	20
	Bronze	5
Kunststoff	PE	15
	HDPE	0
Sonstige	Teeröl	9
	Buchenholz	99
Summe		41.286

Quelle: Eigene Berechnung auf Grundlage der Daten in Schmied/Mottschall (2010)

Schmied/Mottschall selbst benutzen jedoch die technische Lebensdauer nur, um den Errichtungsaufwand auf ein Jahr umrechnen zu können. Für den eigentlichen Instandhaltungsaufwand nutzen Schmied/Mottschall spezielle jährliche Ersatzbedarfe, die häufig aus Köser et al. (2002) übernommen wurden. Für den Unterbau, die Ingenieurbauwerke sowie die Gebäude liegen keine speziellen Ersatzbedarfe vor, so dass sie in der Studie von Schmied/Mottschall nicht mit beachtet werden können. Schätzt man den jährlichen Materialbedarf für Instandsetzung über die dort genannten jährlichen Ersatzbedarfe (z.B. eine Schwelle pro zwei km eingleisiger Strecke), so kommt man lediglich auf einen jährlichen Materialaufwand für die Instandhaltung von 471.000 t. Die Ergebnisse der beiden Methoden unterscheiden sich somit um fast das 88-fache.

Tab. 36: Jährlicher Materialaufwand für Instandhaltung abgeschätzt über jährlichen Ersatzbedarf

		in 1.000 t
Mineralische Rohstoffe	Sand-Kies	0
	Beton	63
	Granit	384
	Mauerwerk	0
Metalle	Bewehrungsstahl	5
	Primärstahl	10
	Eisen/Stahl	2
	Aluminium	1
	Kupfer	2
	Bronze	0
Kunststoff	PE	1
	HDPE	0
Sonstige	Teeröl	0
	Buchenholz	1
Summe		471

Quelle: Eigene Berechnung, nach Schmied/Mottschall (2010)

Insbesondere bei den Daten zum eingesetzten Schotter wird deutlich, dass die Angaben zur Berechnung der Materialflüsse für Instandhaltung einer enormen Spannweite unterliegen. Insofern besteht eine Unsicherheit über die tatsächliche Höhe der jährlichen Materialflüsse. Im Bereich der Schieneninfrastruktur reicht der jährliche Bedarf an Primärschotter für die Gleisbettung von 384.000 Tonnen laut jährlichem Ersatzbedarf (Schmied/Mottschall (2010) über 1,28 Mio. Tonnen (20 % der 6,42 Mio. Tonnen, die laut DB AG jedes Jahr ausgetauscht werden) bis 5,1 Mio. Tonnen (20 % der 25,6 Mio. Tonnen, die sich aus der Abschreibung der technischen Lebensdauer ergeben (Tab. 35). Wir haben aus Gründen der Vergleichbarkeit mit den Daten der anderen Infrastruktursysteme den jährlichen Erneuerungsbedarf der Schieneninfrastruktur über die Abschreibung der technischen Lebensdauer ermittelt. Der Materialbedarf für Gebäude wurde analog zu den Energieerzeugungsinfrastrukturen nur mit 10 % in die jährliche Abschreibung einbezogen. Die damit berechnete Größenordnung erscheint plausibel, wie im Folgenden kurz dargelegt wird:

Die Deutsche Bahn AG hat in ihrer Internetpräsenz für das Jahr 2007 Investitionen von 3,5 Mrd. Euro für die Instandsetzung ihres Streckennetzes angegeben. Danach wurden in 2007 1.800 Weichen, 4.400 km Schienen, 3,3 Mio. Schwellen und 3,9 Mio. m³ Schotter ausgewechselt. Vermutlich sind in diesen Daten auch die Baumaßnahmen an Ausbaustrecken enthalten. Trotzdem würden die Werte der DB AG umgerechnet auf Gleislängen bedeuten, dass im Jahr 2007 auf 2.200 km Gleislänge die Schienen erneuert wurden.

Bei einem Abstand von 60 cm zwischen zwei Schwellen bedeutet der Austausch von 3,3 Mio. Schwellen eine Gesamtlänge von 1.980 km Gleisstrecken. Bei einem Schwellen-Gewicht von 280 kg (Betonschwelle) bzw. 153 kg (Holzschwelle), würde allein der Austausch von 3,3 Mio. Schwellen einen Materialaufwand von 924.000 Tonnen Beton

bzw. 505.000 Tonnen Buchenholz bedeuten. Für den unterstellten Ausbau von jährlich 300 km bestehenden Strecken zu Ausbaustrecken würden für Betonschwellen 273.000 Tonnen Beton anfallen. Die verbleibenden 650.000 Tonnen sind dabei näher an dem geschätzten Instandhaltungsbedarf über die technische Lebensdauer (rund 1 Mio. Tonnen pro Jahr) als die 25.000 Tonnen geschätzt über den angenommenen jährlichen spezifischen Ersatzbedarf von einer Schwelle je zwei Kilometer eingleisiger Bahnstrecke. Auch bei einem Plausibilitätscheck der Schotterwerte scheint der Wert abgeleitet über den jährlichen Ersatzbedarf von 0,1 % der Schottermenge im Bestand zu niedrig. Dies wären rund 384.000 Tonnen pro Jahr. Bei einer Schotterdichte von $1,65 \text{ t/m}^3$ würde der Austausch von 3,9 Mio. m^3 (laut DB AG) dagegen einen jährlichen Austausch von 6,42 Mio. Tonnen Schotter bedeuten. In den Bestandschätzungen wurde von einem Schotter-Volumen von $2.170 \text{ m}^3/\text{km}$ für Betonschwellen ausgegangen.¹⁶ Setzt man diese Zahl ins Verhältnis zu den 3,9 Mio. m^3 ausgewechselten Schotters, dann ergibt sich daraus eine Gleislänge von 1.798 km. Zusammen mit den ausgewechselten Schienen und Schwellen sind die angegebenen Größenordnungen in Tab. 35 in sich stimmig. Bei einer Gleislänge der deutschen Schieneninfrastruktur von rund 73.000 km würden demnach pro Jahr bei ca. 2,5 % bis 3 % der Gleislängen das Schotterbett gereinigt und neu gestopft sowie die Schwellen und Schienen instand gesetzt.

¹⁶ Die Betonschwellen sind in 75 % der Gleis-Kilometer verwendet (Schmied/Mottschall 2010).

3.4 Wasserstraßen

Wasserstraßen sind neben Straße und Schiene Teil des Verkehrswegenetzes. Deutschland verfügt im europäischen Vergleich über das umfangreichste und am intensivsten ausgebaute Binnenwasserstraßennetz mit den höchsten Verkehrsleistungen. Die überwiegende Zahl der deutschen Großstädte besitzt einen direkten Wasserstraßenanschluss mit eigenem Binnenhafen.

Bundeswasserstraßen werden nach dem Wasserwegerecht unterschieden in Binnen- und Seewasserstraßen (Wasserwegerecht)¹⁷. Letztere umfassen die Flächen zwischen der Küstenlinie oder der seewärtigen Begrenzung der Binnenwasserstraßen und der seewärtigen Begrenzung des Küstenmeeres (WSV 2008b). Sie sind nicht Teil dieser Studie. Binnenwasserstraßen fungieren überwiegend als Verkehrsweg für den Gütertransport, wenngleich ihre Bedeutung für die Sport- und Freizeitschifffahrt zunimmt.

Zu den Anlagen an den Binnenwasserstraßen gehören (Stand Juni 2007, nach WSV 2008a):

- 326 Schiffsschleusenanlagen mit 416 Schleusenkammern,
- 337 Wehranlagen,
- 11 Sperrwerke,
- drei Schiffshebwerke,
- zwei Talsperren,
- etwa 1.600 Brücken,
- 10 Kanalbrücken,
- 4.359 Buhnen (Bauwerke zur Flussregulierung, meist geschüttete Dämme, mit Steinen gepflastert oder mit Schotter bedeckt),
- 106 Wasserkraftanlagen.¹⁸

Daneben gibt es mehr als 100 öffentliche See- und Binnenhäfen (BMVBS 2008b).

Jährlich werden 6,7 % (bis zu 240 Mio. Tonnen) der gesamten in Deutschland transportierten Gütermenge mit der Binnenschifffahrt über ein weitmaschiges Netz von 7.354 km Länge¹⁹ (Stand 2005, WSV 2008b) transportiert, 35 % davon unter deutscher Flagge. In erster Linie werden Massengüter transportiert: Steine und Erden, Mineralöle, Erze, feste mineralische Brennstoffe. Seit Anfang der 1990er Jahre verändert

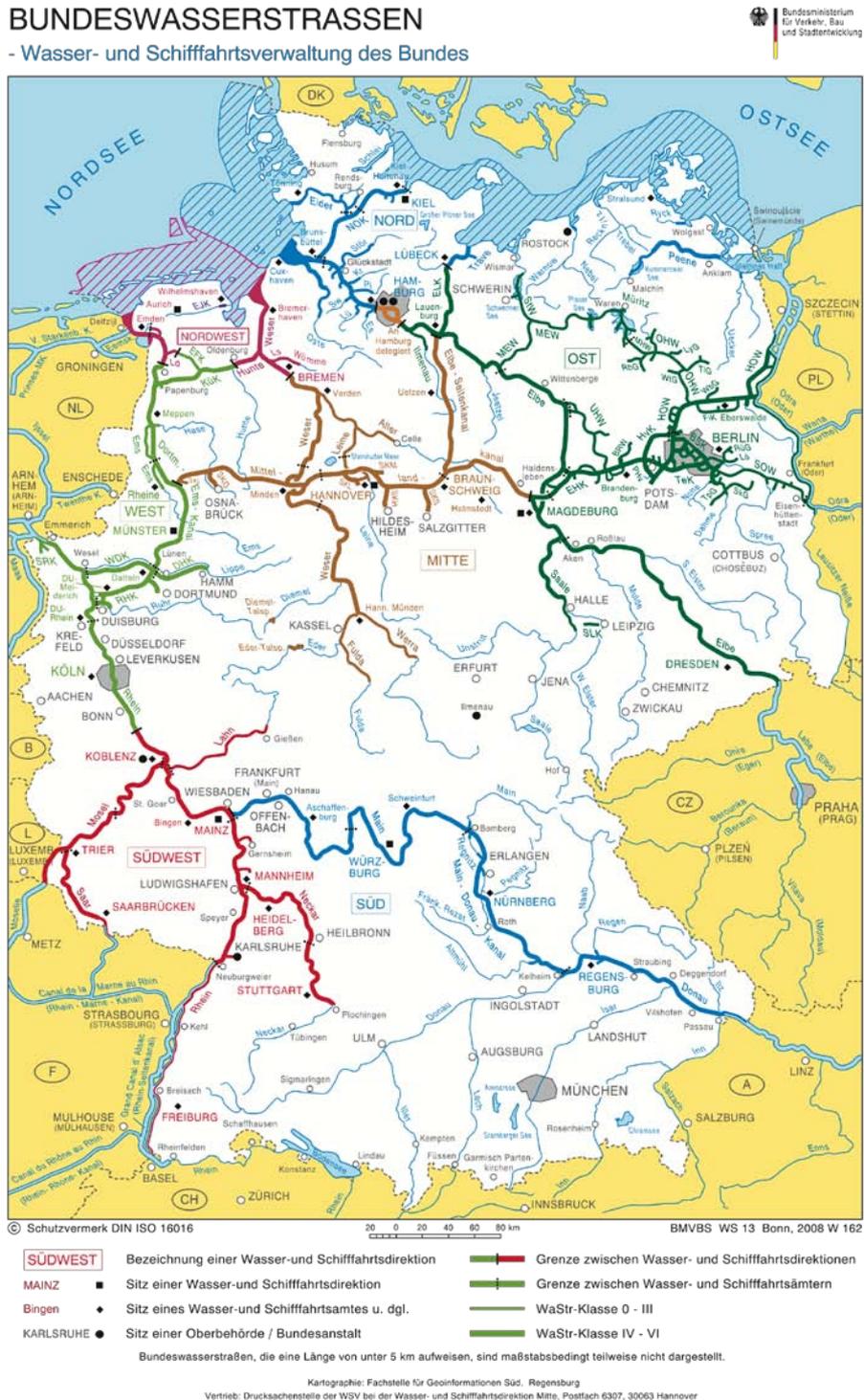
¹⁷ Weitere Differenzierungen erfolgen in Binnen- und Seeschifffahrtsstraßen nach der überwiegenden Art von Schiffsverkehr. Diese ist für diese Arbeit nicht sinnvoll.

¹⁸ Talsperren und Brücken (mit Ausnahme von Kanalbrücken) sind dem Bereich Wasser bzw. Straße und Schiene zugeordnet. Desgleichen sind Wasserkraftwerke Bestandteil des Moduls Energieversorgung.

¹⁹ Davon 6.732 km nach Bundeswasserstraßengesetz und sonstige Binnenwasserstraßen des Bundes (574 km) (WSV 2008b)

sich die Güterstruktur dahingehend, dass zunehmend Container, und damit hochwertige Verbrauchsgüter, über die Wasserstraßen transportiert werden (BMU 2006, 96f). Einen Überblick über das Bundeswasserstraßennetz liefert Abb. 3.

Abb. 3: Übersicht über die Binnenwasserstraßen des Bundes (klassifiziert)



Quelle: BMVBS (2008f)

3.4.1 Materialbestand der Wasserstraßen-Infrastrukturen

Stofflich relevant sind die Schleusen, verschiedene Formen von Uferbefestigungen und Abdichtungen von Kanälen sowie die Binnen- und Seehäfen. Der Aushub (jährliche Unterhaltungsbaggerungen) wird in dieser Studie nicht erfasst. Desgleichen werden Dämme für den Hochwasserschutz nicht bilanziert. Circa 76 % der Binnenwasserstraßen entfallen auf Flüsse, 24 % der Strecke auf Kanäle (WSV 2009).

Vorliegende Berechnungen basieren zum Großteil auf Untersuchungen von Manstein und Stiller (Stiller 1995; Manstein / Stiller 2000), welche am Wuppertal Institut durchgeführt wurden und im Rahmen von MaRes aktualisiert wurden.

Tab. 37: Länge deutscher Binnenwasserstraßen 2005

	Länge in km	Anteil
Flussstrecken	5.607	0,76
Kanäle	1.747	0,24
Gesamt Binnenwasserstraßen	7.354	1,00

Quelle: WSV (2009)

Kanalabdichtungen

Wird ein Kanal über dem Grundwasserhorizont geführt, muss eine Abdichtung vorgenommen werden. Bei neueren Kanälen geschieht dies durch eine wasserundurchlässige Asphaltsschicht, bei älteren Kanälen wurde eine 50 cm dicke Tonschicht eingebaut (Stiller 1995). Verläuft der Kanal unter dem Grundwasserspiegel, werden teilweise zur Vermeidung von Aufschwemmen Folien eingebaut. Der Anteil der ungedichteten Kanalstrecken wurde von Stiller über den Anteil losen Deckwerks an Kanalufern geschätzt. Unterschieden wird des Weiteren nach dem Querschnitt: Neuere Kanäle sind bevorzugt in Trapezquerschnitt erstellt worden, während bei älteren Kanälen die Rechteckform vorherrscht (Regelbreite 43,10 m).

Wendet man die spezifischen Materialverbräuche von Stiller (1995) pro Meter Kanalabdichtung auf die gesamtdeutsche Kanallänge von 1.747 km an, so erhält man folgenden Materialbestand:

Tab. 38: Materialbestand Kanalabdichtungen

		Asphalt- abdichtung	Ton- abdichtung	ohne Ab- dichtung	Gesamt (in 1.000 t / bzw. 1.000 m²)
Anteil Kanalnetz		0,38	0,43	0,19	
Anteil (m)		663.860	751.210	331.930	
Asphaltbeton	t	24,3			16.132
Bitumensand	t	2			1.328
Ton	t		48		36.058
Filtermatten	m ²			30,9	10.257
PVC-Folie	t			5,7	1.892

Quelle: Berechnet auf Grundlage von Stiller (1995); PVC-Folie 1,32 kg/m², Einbaudichte Ton 2 t/m³

Ton und Asphaltbeton machen hier mit 36 bzw. 16 Millionen Tonnen den größten Massenanteil aus.

Uferbefestigungen

Uferbefestigungen schützen Binnenwasserstraßen fast durchgehend gegen Erosion durch Wellenschlag an Ufern. Die Verteilung der verschiedenen Arten von Uferbefestigungen (durchlässiges/loses Deckwerk, dichtes Deckwerk, Deckwerk über Asphalt, Spundwände, Betonmauern) variiert in Kanälen und Flüssen und basiert auf Angaben von 1981 für westdeutsche Binnenwasserstraßen, welche von Stiller 1995 aktualisiert wurden.

Um die in Uferböschungen gebundenen Materialien zu bilanzieren, wurden die von Stiller angegebenen Materialverbräuche pro Meter Uferböschung auf das Gesamtnetz hochgerechnet. Daraus ergibt sich folgender aktueller Materialbestand:

Tab. 39: Materialbestand Uferbefestigungen an Wasserstraßen

		Kanäle	Flüsse	Gesamt
Anteil m		1.747.000	5.607.000	
Sand & Kies	1.000 t	432	5.859	6.291
Schotter & Splitt	1.000 t	730	5.971	6.702
Schüttsteine, Wasserbausteine	1.000 t	4.051	17.942	21.994
Schlacke, Grandgeröll	1.000 t	2.247	493	2.740
Mastixverguss	1.000 t	332	869	1.201
Geotextilien	1.000 m ²		11.186	11.186
Asphaltbeton	1.000 t		310	310
Bitumensand	1.000 t		224	224
Beton	1.000 t		1.290	1.290
Stahlspundwand	1.000 t	1.291	2.220	3.512

Quelle: Berechnet auf Grundlage von Stiller (1995); Rohdichte Beton 2,3 t/m³; Spundwandgewicht 0,33 t/m²

In den Uferbefestigungen dominieren Wasserbausteine. Als Material werden Natursteine oder industriell hergestellte Baustoffe, z.B. Metallhüttenschlacken, verwendet.

Schleusen

Mit Stand Juni 2007 (WSV 2008) gab es an deutschen Binnenwasserstraßen 326 Schiffsschleusenanlagen mit 416 Schleusenkammern sowie 337 Wehranlagen und 11 Sperrwerke. Stiller (1995) hat auf der Grundlage von Massenangaben einzelner Schleusenbauwerke durch lineare Interpolation über die Schleusenlänge und –höhe einen Wert für die deutsche Durchschnittsschleuse berechnet. Der angegebene mittlere Beton- und Stahlverbrauch pro Schleuse wurde auf die aktuelle Gesamtschleusen-zahl hochgerechnet. Damit ergibt sich ein geschätzter Materialbestand in Schleusen wie folgt:

Tab. 40: Materialbestand Schleusen

		mittl. Verbrauch pro Schleuse	Gesamt
Beton	1.000 t	155	50.566
Stahl	1.000 t	4,5	1.460

Quelle: Berechnet auf Grundlage von Stiller (1995); Rohdichte Beton 2,3 t/m³ Spundwandgewicht 0,33 t/m²

Umschlaganlagen

Der Güterumschlag auf Schiffe erfordert große Anlagen, die mit enormem Materialaufwand verbunden sind. Es gibt in Deutschland mehr als 100 öffentliche See- und Binnenhäfen (BMVBS 2008b). Aufgrund der Inhomogenität der Hafenanlagen ist eine Bilanzierung praktisch mit großen Schwierigkeiten verbunden. Stiller hat in seiner Materialintensitätsanalyse von 1995 die 32 größeren Binnenhäfen Deutschlands sowie die 7 größten Seehäfen²⁰ Deutschlands bilanziert. An Anlagen sind die Kailänge, sonstige Uferbefestigungen, Eisenbahngleise, Lagerhallen, Silos, Tanks und Kräne relevant. Straßenlängen und Flächen sind nicht erfasst. Auf der Basis der spezifischen Materialverbräuche von Stiller kann die hier errechnete Gesamtmenge (Tab. 41, Tab. 42) lediglich als Anhaltspunkt für die Größenordnungen dienen, da davon ausgegangen werden kann, dass in den letzten 15 Jahren eine erhebliche Ausweitung der Umschlaganlagen stattgefunden hat.

²⁰ Hamburg, Bremen, Lübeck, Kiel, Bremerhaven (Übersee + Fisch), Emden

Tab. 41: Materialbestand Binnenhäfen

	Spundwandkai	sonst. Ufer	Gleise	offene Lager	gedeckte Lager	Tank	Gesamt
Anlagen Einheit	m	m	m	m2	m2	m3	in 1.000 t
Anlagen Menge (in 1000)	145	63	377	7.883	3.603	6.846	
Beton	13,8	2,3		0,2	1,2		8.099
Kies, Schotter, Stein	6,8	6,8	1,9	0,5	0,5		7.978
Asphaltbeton				0,1			907
Wasserbausteine		4,0					253
Betonstahl	0,3	0,1	0,1		0,1	0,0	661
Stahlspundwand	1,7	1,3					328
Gesamt							18.226

Quelle: Berechnet auf der Grundlage von Stiller (1995), Rohdichte Beton 2,3 t/m³; Spundwandgewicht 0,21 t/m²; Schüttdichte Kies 1,7 t/m³; Schüttdichte Wasserbausteine 2,0 t/m³

Tab. 42: Materialbestand Seehäfen

	Spundwandkai	sonst. Ufer	Gleise	offene Lager	gedeckte Lager	Tank	Silos	Gesamt
Anlagen Einheit	m	m	m	m2	m2	m3	t	in 1.000 t
Anlagen Menge (in 1000)	119	206	1.155	7.119	3.410	6.768	1.320	
Beton	16,1	2,3		0,2	1,2		0,2	8.248
Kies, Schotter, Stein	3,4	2,7	1,9	0,5	0,5		0,2	8.718
Asphaltbeton				0,1				819
Wasserbausteine		3,2						659
Betonstahl	0,4	0,1	0,1		0,1	0,0		740
Stahlspundwand	5,4	2,1						1.074
Gesamt								20.259

Quelle: Berechnet auf der Grundlage von Stiller (1995), Rohdichte Beton 2,3 t/m³; Spundwandgewicht 0,35 t/m²; Schüttdichte Kies 1,7 t/m³; Schüttdichte Wasserbausteine 2,0 t/m³

Gesamtmaterialbestand Wasserstraßen

Tab. 43 gibt einen Überblick über die Größenordnungen der in den Wasserstraßen in Deutschland gebundenen Materialien.

Tab. 43: Materialbestand Wasserstraßen in Deutschland

in 1.000 t bzw. 1.000 m ²	Kanal- abdichtung	Ufer- befestigung	Schleusen	Umschlag- anlagen	Gesamt
Sand, Kies		6.291			6.291
Schotter, Splitt		6.702		16.696	23.397
Wasserbausteine		21.994		913	22.906
Schlacke, Grandgeröll		2.740			2.740
Mastixverguss		1.201			1.201
Asphaltbeton	16.132	310		1.725	18.167
Bitumensand	1.328	224			1.552
Ton	36.058				36.058
Beton		1.290	50.566	16.347	68.203
Stahl		3.512	1.460	2.803	7.775
Geotextilien (m²)	10.257	11.186			21.443
PVC-Folie	1.892				1.892

Quelle: Eigene Berechnungen auf Grundlage von Stiller (1995)

Insgesamt sind in den Infrastrukturen der Wasserstraßen knapp 200 Millionen Tonnen Material gebunden, davon zum Großteil Beton und mineralische Baustoffe.

3.4.2 Jährlicher Materialbedarf der Wasserstraßen-Infrastrukturen

Jährliche Materialflüsse durch Neubau / Rückbau

Die Güterschifffahrt, und hier besonders die Containerschifffahrt, hat in den letzten Jahren stark an Bedeutung gewonnen. Hinzu kommt die Öffnung der osteuropäischen Märkte, wodurch die Ost-West-Schifffahrtswege wichtiger geworden sind. Der scharfe Wettbewerb der verschiedenen Verkehrsträger bedingt eine rasche Vergrößerung und Verbesserung der Transportfahrzeuge. Die Programme der Bestandssicherung werden den zukünftigen Anforderungen nicht mehr gerecht. Das Regelschiff der Zukunft wird 135m lang und mind. 11m breit sein und damit einen Ausbau der meisten Schifffahrtswege und entsprechenden Ingenieurbauwerke erfordern (Pogalens / Lenz 2008). So soll nach einem Beschluss der Bundesregierung von 2006 beispielsweise eine Kammverlängerung an allen 27 Schleusen des Neckars für 135m-Schiffe in den nächsten Jahren (bis 2025) erfolgen (ebd.). Je Kammer-Verlängerung wird eine Investitionssumme von 6,9 Millionen Euro kalkuliert (Stuttgarter Zeitung 2008).

Tab. 44: Geplanter Neubau und Erweiterung von Schleusen

		Bauzeit	Beton (m3)	Stahl (t)	Quelle
Neubau	Uelzen II	1998-2005	250.000	33.000	Fockenberg et al. 2005
Ersatzneubau	Sülfeld Süd		90.000	n.a.	Saathoff et al. 2009
Ersatzneubau	Dörverden	2009-2012	n.a.	n.a.	Neubauamt Hannover
Neubau	Minden	2010-2013	n.a.	n.a.	Neubauamt Hannover
Ersatzneubau	Bolzum	2007-2011	n.a.	n.a.	Neubauamt Hannover
Erweiterung	27 Neckar-Schleusen	2011-2025			Pogalens/Lenz 2008, Stuttgarter Zeitung 2008
Erweiterung	10 Mosel-Schleusen*	-2032	70.000**	5.000**	WSV 2007
Neubau	Rothensee	1997-2001	533.000	5.000	Tölle o.J.
Neubau	Hohenwarthe		320.000	41.600	Tölle o.J., Weisner 2003
Neubau	Kaiserschleuse	2006-2010	65.000	42.000	Els 2009

Quelle: Eigene Zusammenstellung, ohne Anspruch auf Vollständigkeit; *jeweils Erweiterung um eine zweite Schleusenkammer; **Beispiel Trier

Darüber hinaus werden durch den gestiegenen Schifffahrtsverkehr kontinuierlich die deutschen Umschlaganlagen ausgebaut und erweitert.

Die vorliegenden Berechnungen stellen Schätzungen der jährlichen Flüsse durch Neubau und Erweiterung dar, auf Grundlage der aktuellen Bundeswasserstraßenprojekte (BMVBS 2008) und Massenbeispielen von Einzelprojekten (Els 2009, Weisner 2003, Tölle o.J., diverse Schifffahrtsämter, Saathoff et al. 2009, Fockenberg et al. 2005).

Folgende Annahmen werden getroffen:

- In Umschlaganlagen erfolgt eine jährliche Erweiterung von offenen Lagerflächen um 5 %, des Spundwandkais um 2 %, sowie der sonstigen Ufer, Gleise und gedeckten Lager um 1 %. Die spezifischen Materialangaben basieren auf Stiller 1995.
- Aktuell werden etwa zwei Schleusen jährlich an die veränderten Schiffsgrößen angepasst. Der Materialaufwand der Erweiterung wird auf etwa 70.000 m³ Beton und 5.000 Tonnen Stahl geschätzt. Darüber hinaus erfolgt ein (Ersatz-)Neubau von einer Schleuse jährlich. Hier ist der Materialaufwand im Vergleich zu den bestehenden Schleusen erhöht: Die Berechnungen basieren auf erhöhten Durchschnittswerten von 150.000 m³ Beton und 20.000 Tonnen Stahl pro Schleuse.

Damit ergibt sich ein jährlicher Input in die Wasserstraßen bedingt durch Neubau und Erweiterung wie folgt:

Tab. 45: Jährliche Materialflüsse Wasserstraßen durch Neubau und Erweiterung

in 1.000 t	Ingenieur- bauwerke	Umschlag- anlagen	Gesamt
Beton	655	424	1.079
Kies, Schotter, Stein		485	485
Wasserbausteine		9	9
Schlacke, Grandgeröll			0
Mastixverguss			0
Stahl	29	34	63
Gesamt	684	951	1.635

Quelle: Eigene Berechnungen

Jährliche Materialflüsse durch Sanierung

Die Abschätzung der Lebensdauer der einzelnen Infrastrukturen der Umschlaganlagen ist schwierig, da gerade in Häfen häufig Erweiterungen und Umbauten stattfinden. Für Wasserstraßen legen Manstein und Stiller (2000) (auf Grundlage von Investitionsrechnungen des DIW für den Ersatzinvestitionsbedarf für die Verkehrswege in Deutschland) folgende Nutzungsdauern zugrunde:

Tab. 46: Nutzungsdauern der Anlageinfrastruktur Wasserstraßen

Trassierungen	116 Jahre
Loses / dichtes Deckwerk	44 Jahre
Spundwände	55 Jahre
Betonmauern	58 Jahre
Schleusenammern	78 Jahre
Schleusentore	40 Jahre

Quelle: Manstein/Stiller (2000, 13f)

Der Instandsetzungsaufwand an den Schleusenammern wird analog zu Stiller 1995 geschätzt: der Materialaufwand addiert sich über die Lebensdauer von 78 Jahren auf 5 % des Erstellungsaufwandes. Der Sanierungsaufwand der anderen Infrastrukturen (Umschlaganlagen, Uferbefestigungen, Kanalabdichtungen) wird mangels Daten nicht berücksichtigt. Damit ergibt sich ein jährlicher Materialfluss durch Sanierung an den Schleusen in Deutschland von rund 32.000 Tonnen Beton.

3.5 Kumulierter Materialaufwand

Für die Herstellung der Materialien, die in den verschiedenen Infrastruktursystemen gespeichert sind bzw. jährlich für den Aus- und Neubau bzw. für die Instandhaltung benötigt werden, sind wiederum andere Materialien und Rohstoffe notwendig, die in den direkten Mengen der Bestände und der jährlichen Flüsse nicht wiedergegeben werden. Zudem fallen bei der Gewinnung von Rohstoffen weitere Materialflüsse an, die wirtschaftlich nicht weiter genutzt werden. Dies sind z.B. Abraum im Bergbau oder Erdaushub im Baubereich. Eine Kombination der Bestands- und Flussmengen mit Materialintensitätskoeffizienten (MIT) erlaubt es, diese vorgelagerten Rohstoffaufwendungen, wie auch die wirtschaftlich nicht genutzten Materialien (z.B. Abraum) mit abzubilden und somit ein umfassendes Bild der Materialmengen der Bestände und der jährlichen Flüsse zu zeichnen. Für diese Studie werden die Daten des jeweiligen Bestandes und der jährlichen Materialmengen mit den Materialkoeffizienten der Datenbank des Wuppertal Instituts (Wuppertal Institut 2003) verbunden. Der MIT-Koeffizient der Produkte aus primären Rohstoffen ist in der Regel höher als das gleiche Produkt aus Sekundärrohstoffen. Gerade für die Abschätzung des kumulierten Materialaufwandes für metallische Rohstoffe ist es wichtig zu wissen, ob Primär- oder Sekundärmaterial verwendet wird oder in der Vergangenheit wurde. Allerdings liegen zum einen nur für wenige Basismetalle unterschiedliche MIT-Koeffizienten für die Herstellungsrouten sowohl aus Primär- als auch aus Sekundärmaterial vor. Und zum anderen ist für viele Materialbestände und -flüsse unklar, ob Primär- oder Sekundärmaterial verwendet wurde. Für diese Studie wurde daher bei fehlenden konkreten Information typischen Durchschnittswerte für das Verhältnis Primär- vs. Sekundärmaterialien verwendet: Für Aluminium und Kupfer wird der durchschnittliche MIT-Koeffizient, der jeweils 50 % Primär- und 50 % Sekundäranteil beinhaltet, verwendet. Für Stahl werden verschiedene Koeffizienten verwendet. Der MIT-Koeffizient für Stahl aus der Hochofenroute ist deutlich höher als der Wert für Stahl aus der Elektrostahlroute, bei dem hohe Sekundäranteile üblich sind. Nichtlegierter bzw. niedrig-legierter Stahl ist in unseren Daten in der Regel Bewehrungsstahl, der zumeist aus Elektrostahl besteht. Legierungsstahl oder rostfreier Stahl wird zumeist als Edelstahl mit 17 % Chromanteil und 12 % Nickelanteil gewertet. Wenn keine konkreten Werte für Eisen und Stahl vorhanden sind (z.B. Kleinteile der Schienenbefestigungen etc.), wird nach unseren Abschätzungen Warmbandstahl der Hochofenroute verwendet. Dieser Stahl verfügt über die qualitativen Eigenschaften des Hochofenstahls, ist aber weitestgehend unbearbeitet. Für hochwertigen Stahl, der in Erdgasrohren und Schienen verwendet wird, werden die MIT-Koeffizienten für Maschinenbaustahl und Träger aus der Hochofenroute (Schienen) bzw. Grobbleche der Hochofenroute (Rohre) benutzt. Weiterhin müssen einige MIT-Werte als Proxy des eigentlichen Koeffizienten verwendet werden, da die eigentlichen Koeffizienten nicht vorhanden sind, der Proxy-Koeffizient stofflich jedoch vergleichbar ist. So wird z.B. für bitumische Produkte, für die kein MIT-Koeffizient vorhanden ist, der MIT-Wert von schwerem Heizöl verwendet. Proxywerte sind nachfolgend jeweils unter den Tabellen gesondert gekennzeichnet.

3.5.1 Straßeninfrastruktur

Für Straßen sind nur mineralische Rohstoffe in die Abschätzung mit eingeflossen. Eine Unterscheidung zwischen Primär- und Sekundärmaterial beeinflusst das Ergebnis voraussichtlich nur geringfügig. Unter Beachtung der vorgelagerten Aufwendungen für abiotische Rohstoffe beträgt der kumulierte Materialaufwand des Bestandes 9,4 Mrd. Tonnen, im Gegensatz zum Materialbestand ohne Beachtung der vorgelagerten Prozesse von 7,2 Mrd. Tonnen. Die jährlichen Materialaufwendungen für Neu- und Ausbau bzw. Instandsetzung sind unter Beachtung der vorgelagerten Ressourcenaufwendungen um 31 % (Neu- und Ausbau) bzw. 34 % (Instandhaltung) höher als der direkte Materialeinsatz.

Tab. 47: Kumulierter Materialaufwand der Straßeninfrastruktur

in 1.000 t	MIT-Koeffizienten in t/t	Bestand	kumulierter MA des Bestandes	jähr. Materialflüsse für Neu- und Ausbau	kumulierter MA Neu- und Ausbau	jähr. Materialflüsse für Instandhaltung	kumulierter MA Instandhaltung
Gesteinsmehl (Füller)	1,65	143.272	236.400	438	723	3.255	5.370
Edelbrechsand	1,42	281.497	399.726	757	1.075	4.958	7.040
Edelsplitt	1,42	1.305.251	1.853.456	3.695	5.247	29.014	41.200
bit. Bindemittel*	1,5	82.648	123.972	209	313	2.336	3.504
hydr. Bindemittel	3,2	19.736	63.154	210	671	813	2.603
Sand	1,18	2.290.957	2.703.329	6.806	8.031	27.465	32.408
Kies	1,18	2.463.106	2.906.465	7.261	8.568	32.770	38.669
Schotter	1,42	639.814	908.537	1.846	2.621	3.198	4.542
Summe		7.226.281	9.195.038	21.222	27.249	103.809	135.336

Quelle: Eigene Berechnung auf Basis von Wuppertal Institut (2003), *MIT-Koeffizient für schweres Heizöl

3.5.2 Ingenieurbauwerke der Bundesfernstraßen

Für Brücken und Tunnel der Bundesfernstraßen werden nur Beton und Stahl als Materialkategorien abgeschätzt. Es ist unklar, in welchem Umfang Stahl aus der Primär- und Sekundärroute verwendet wird. Für Spannbeton- und Stahlbetonbrücken wird Bewehrungsstahl verwendet, der auf Grund der geringeren Qualitätsanforderungen aus Elektrostahlwerken stammt und damit einen hohen Anteil an Schrott enthält. Konstruktionsstahl in Stahlbrücken ist dagegen durch höhere Qualitätskriterien gekennzeichnet, die nur im begrenzten Maße den Einsatz von Stahl aus Schrott zulassen. Der hohe Anteil der Spannbetonbrücken am Gesamtbestand an Brücken der deutschen Bundesfernstraßen führt dazu, dass der größte Teil des Stahlbedarfs mit dem MIT-Koeffizienten der Elektrostahlroute berechnet werden kann. Für die Berechnung wird angenommen, dass alle Spann- und Betonstähle im Brückenbau sowie alle unlegierten Stahlmengen im Tunnelbau mittels der Elektrostahlroute produziert wurden, wäh-

rend alle Baustähle im Brückenbau und der niedrig legierte Stahl im Tunnelbau aus der Hochofenroute stammt und mit dem MIT-Koeffizient von Warmbandstahl multipliziert wird.

Unter diesen Annahmen ergibt sich für die Ingenieurbauwerke der Bundesfernstraßen folgender kumulierter Materialaufwand:

Tab. 48: Kumulierter Materialaufwand der Brücken der Bundesfernstraßen

in 1.000 t	MIT-Koeffizienten in t/t	Bestand Brücken	kumulierter MA des Bestandes	jährl. Materialflüsse für Neu- und Ausbau	kumulierter MA Neu- und Ausbau	jährl. Materialflüsse für Instandhaltung	kumulierter MA Instandhaltung
Beton	1,33	39.191	52.124	402	534	784	1.042
Stahl Hochofenroute	7,63	994	7.584	16	125	20	152
Stahl Elektrostahtofenrouten	1,47	2.707	3.979	45	66	54	80
Summe		42.892	63.688	463	725	858	1.274

Quelle: Eigene Berechnungen auf Basis von Wuppertal Institut (2003)

Tab. 49: Kumulierter Materialaufwand der Tunnel der Bundesfernstraßen

in 1.000 t	MIT-Koeffizienten in t/t	Bestand Tunnel	kumulierter MA des Bestandes	jährl. Materialflüsse für Neu- und Ausbau	kumulierter MA Neu- und Ausbau	jährl. Materialflüsse für Instandhaltung	kumulierter MA Instandhaltung
Beton	1,33	18.000	23.940	743	988	180	239
Stahl Hochofenroute	7,63	71	542	3	22	1	5
Stahl Elektrostahtofenrouten	1,47	608	894	25	37	6	9
Summe		18.679	25.375	771	1.048	187	254

Quelle: Eigene Berechnungen auf Basis von Wuppertal Institut (2003)

Auf Grund des hohen Anteils an Bewehrungsstahl, der normalerweise nicht in der Hochofenroute hergestellt wird, erhöht sich der kumulierte Materialbedarf der Ingenieurbauwerke trotz des hohen Stahlanteils nur um 50 % gegenüber dem Wert des direkten Ressourceneinsatzes. Der geringere Stahlanteil in Tunnelbauten und die längeren technischen Lebensdauer der Tunnelbauwerke reduziert den Zuwachs des kumulierten Materialaufwandes der Tunnelbauten im Vergleich zum direkten Materialaufwandes (rund 36 %) im Vergleich zu Brückenbauwerken, bei dem der Anstieg gegenüber dem direkten Ressourcenaufwand zwischen 52 % (Bestand vs. Instandhaltung) und 62 % (Bestand vs. Neu- und Ausbau) liegt.

3.5.3 Schieneninfrastruktur

Die Schieneninfrastruktur ist gekennzeichnet zum einen durch einen recht hohen Anteil an metallischen Rohstoffen, die bei der Betrachtung der kumulierten Materialbedarfe von besonderer Bedeutung sind, und zudem durch hohe Qualitätsanforderungen, die an diese metallischen Bauteile gestellt werden. So werden z.B. Schienen nur aus Primärstahl hergestellt; wir verwenden daher den MIT-Koeffizienten für Maschinenbaustahl der Hochofenroute. Ebenso werden hohen Anforderungen an die Güte der Oberleitungsdrähte aus Kupfer bzw. Kupfer-Legierungen gestellt. Da jedoch Kupfer ohne Qualitätsverluste rezykliert werden kann, teilen wir nicht die Annahme von Schmied/Mottschall (2010), die für den Kupferanteil der Oberleitungen 100 % Primärkupfer in ihren Berechnungen angesetzt haben. Wir verwenden einen MIT-Koeffizienten für 50 % Primär- und 50 % Sekundärkupfer, der gleichzeitig der Größenordnung der deutschen Kupfer-Recyclingquote entspricht (Erdman et al. 2004). In der Oberleitung wird zudem Bronze als Legierungsmetall eingesetzt. Bronze besteht zu rund 90 % aus Kupfer und zu 10 % aus Zinn (Wittmer 2006), so dass aus diesen Informationen der MIT-Koeffizient für Bronze gebildet werden kann. Für den Kupferanteil wird wiederum auf den 50/50 %-MIT-Koeffizient zurückgegriffen. Zu 10 % fließt der MIT-Koeffizient des deutschen Import-Mixes für Zinn in den MIT-Koeffizienten für Bronze ein. Für Teeröl wird schweres Heizöl als Näherungswert verwendet.

Tab. 50: Kumulierter Materialaufwand der Schieneninfrastruktur

in 1000 t		MIT-Koeffizienten in t/t	MA für Bestand	kum. MA Bestand	jährl. MA Neu- und Ausbau	kum. MA Neu- und Ausbau	jährl. MA Instandhaltung über Lebensdauer	kum. MA Instandhaltung	jährl. MA Instandhaltung über Ersatzbedarf	kum. MA Instandhaltung über Ersatzbedarf
Mineralische Rohstoffe	Sand-Kies	1,18	670.515	791.208	1936	2285	12.395	14.626	0	0
	Beton	1,33	137.565	182.962	1461	1943	2.517	3.347	63	84
	Granit	1,42	313.935	445.788	2840	4032	25.614	36.372	384	546
	Mauerwerk	2,11	99	208	1	2	0	0	0	0
Metalle	Bewehrungsstahl	1,47	4.667	6.860	54	80	85	124	5	8
	Schienen	8,14	13.354	108.705	98	800	437	3.561	10	82
	Eisen/Stahl	7,63	2.827	21.572	10	77	88	668	2	19
	Aluminium	18,98	134	2.541	2	33	2	42	1	23
	Kupfer	179,07	436	78.021	5	812	20	3.533	2	401
	Bronze	1009,76	46	46.944	1	646	5	4.753	0	155
Kunststoff	PE	2,49	396	986	4	10	15	37	1	4
	HDPE	2,52	3	6	0	0	0	0	0	0
Sonstige	Teeröl*	1,5	273	409	0	0	9	14	0	0
	Buchenholz	4,8	2.979	14.299	0	0	99	477	1	4
Summe			1.147.229	1.147.229	1.700.509	6.411	10.720	41.286	67.555	471

Quelle: Eigene Berechnung auf Basis von Wuppertal Institut (2003). *MIT-Koeffizient Schweröl

Der im Gegensatz zur Straßeninfrastruktur höhere Metallanteil am Materialbedarf der Schieneninfrastruktur führt zu einer stärkeren Erhöhung der Materialmengen bei der Abschätzung des kumulierten Materialbedarfs. Während der kumulierte Materialbedarf der Straßeninfrastruktur um 30 % über dem eigentlichen Materialbedarf liegt, ist er für die Schieneninfrastruktur um 50 % über dem Bestandwert des direkten Ressourcenaufwandes und fast 300 % über dem direkten jährlichen Materialbedarf für Instandhaltung, wenn er über den Ersatzbedarf bestimmt wird (letzte beide Spalten in Tab. 50). Die deutliche Erhöhung des kumulierten Materialaufwandes bei Instandhaltung über Ersatzbedarf erklärt sich aus dem hohen Ersatzbedarf der Oberleitungsdrähte. Der kumulierte Materialbedarf der jährlichen Materialmengen für den Neu- und Ausbau und die Instandhaltung über die technische Lebensdauer ist jeweils um knapp 70 % höher als die direkten Materialmengen. Die hohen MIT-Koeffizienten der metallischen Rohstoffe sorgen dafür, dass der Anteil der Metalle am Gesamtmaterialbedarf von 2 % bis 5 % auf 15 % (Bestand) bis 55 % (Instandhaltung über Ersatzbedarf) des kumulierten Materialaufwands ansteigt. Bei den jährlichen Flüssen für den Neu- und Ausbau bzw. die Instandhaltung geschätzt über die technische Lebensdauer liegt der Anteil der metallischen Rohstoffe am kumulierten Materialaufwand bei ungefähr 20 % bis 23 %.

3.5.4 Wasserstraßen

Durch den hohen Anteil an mineralischen Baustoffen in der Infrastruktur der Wasserstraßen ist der kumulierte Materialaufwand nicht übermäßig hoch im Vergleich zum direkten Materialinput. Teilweise wird durch die Verwendung von Abfallprodukten anderer industrieller Prozesse sogar ein MIT-Koeffizient von 0 angesetzt (Schlacke). An Stahl wird in Wasserstraßen, Schleusenbauwerken und Umschlaganlagen sowohl Spundwand- (Hochofenroute) als auch Bewehrungsstahl (Elektrolichtbogenroute) eingesetzt und mit den jeweiligen Koeffizienten multipliziert. Für Wasserbausteine wird der MIT-Koeffizient von Diabas verwendet.

Unter diesen Annahmen ergibt sich für die Infrastrukturen der Wasserstraßen folgender kumulierter Materialaufwand:

Tab. 51: Kumulierter Materialaufwand der Wasserstraßeninfrastruktur

in 1.000 t	MIT-Koeff. (t/t)	Bestand	kum. MA des Bestandes	Jährl. Materialflüsse (Neu- und Ausbau)	kum. Materialaufwand (Neu- und Ausbau)	Jährl. Materialflüsse (Instandhaltung)	kum. Materialaufwand (Instandhaltung)
Sand, Kies	1,18	6.291	7.423				
Schotter, Splitt	1,42	23.397	33.224	485	689		
Wasserbausteine	1,42	22.906	32.527	9	13		
Schlacke, Grandgeröll	0	2.740	0				
Bitumensand**	1,2	1.552	1.862				
Mastixverguss**	1,22	1.201	1.465				
Ton*	1	36.058	36.058				
Asphaltbeton**	1,22	18.167	22.163				
Beton	1,33	68.203	90.710	1.079	1.435	32	43
Stahl (Hochofenroute)	7,63	5.206	39.722	29	221		
Stahl (Elektrolichtbogenofenroute)	1,47	2.569	3.776	34	50		
PVC	3,47	1.892	6.565				
Gesamt		190.182	275.497	1.636	2.408	32	43

Quelle: Eigene Berechnungen auf Basis von Wuppertal Institut 2003, *= kein MIT-Koeffizient vorhanden, **= MIT-Koeffizient geschätzt

3.6 Zusammenfassung Verkehrsinfrastrukturen

Die Materialbestände der deutschen Straßeninfrastruktur wurden über technische Straßenbaunormen, die den Aufbau verschiedener Straßenkategorien festlegen, für einen Quadratmeter Referenzstraße ermittelt und diese Werte auf der Basis von Referenzquerschnitten dann auf die bestehende Länge des deutschen Straßennetzes hochgerechnet. Die hier erfassten Materialmengen ergeben sich aus der Betrachtung der Straßenflächen der gesamten deutschen Straßeninfrastruktur sowie der Ingenieurbauwerke an Bundesautobahnen. Andere Bereiche, die ebenfalls der Straßeninfrastruktur zugerechnet werden können, wie Fuß- und Radwege, Lärmschutzwände oder Schutzplanken waren nicht Teil der Analyse.

Der Materialbestand im Bereich der Schieneninfrastruktur konnte im Verlauf des Projektes mit den Daten eines parallel durchgeführten UBA-Projektes (Schmied/Mottsall 2010) in großer Detailtiefe ermittelt werden. Die Hochrechnung der gespeicherten Materialmengen in der Wasserstraßeninfrastruktur, einschließlich Umschlaganlagen, basiert im Wesentlichen auf früheren Untersuchungen von Stiller (1995) und Mantein/Stiller (2000), welche am Wuppertal Institut durchgeführt wurden.

Die gespeicherte Menge an mineralischen Rohstoffen in der Straßeninfrastruktur übersteigt die der anderen Infrastruktursysteme um das Mehrfache. Im Bereich der Verkehrsinfrastruktur lassen die Straßen mit über 7,2 Mrd. Tonnen mineralischer Rohstoffe alle anderen Bereiche des Verkehrs weit hinter sich²¹. Die Schieneninfrastruktur ist mengenmäßig ebenfalls stark durch mineralische Baustoffe geprägt. Die metallischen Rohstoffe (vor allem Stahl, Kupfer, Aluminium und Bronze) sind mit über 20 Mio. Tonnen zwar nicht unbedeutend, machen jedoch im Vergleich zum Gesamtmaterialbestand von 1,15 Mrd. Tonnen lediglich knapp zwei Prozent aus. Hinzu kommen noch über 60 Millionen Tonnen an Beton und Stahl für die Ingenieurbauwerke der Bundesautobahnen und der Schieneninfrastruktur.

Der Materialbestand bei Wasserstraßen ist mit rund 190 Mio. Tonnen ebenfalls hoch und wird wie die anderen Infrastrukturbereiche durch mineralische Baustoffe dominiert.

Insgesamt sind in den von uns untersuchten Verkehrsinfrastrukturen rund 8,6 Mrd. Tonnen Baustoffe gespeichert, welche zu über 99 % aus mineralischen Rohstoffen bestehen (Tab. 52).

²¹ Im weiteren Verlauf wird deutlich werden, dass die Straßen auch im Vergleich mit den anderen Infrastrukturtypen den größten Material Stock darstellen.

Tab. 52: Übersicht über den Materialbestand im Verkehr

Material in 1.000 t		Straßen	Brücken, Tunnel	Schienen	Wasser- straßen	Verkehr gesamt
mineralische Rohstoffe	Sand, Kies	4.754.063		670.515	6.291	5.430.869
	Gesteinsmehl (Füller)	143.272				143.272
	Edelbrechsand	281.497				281.497
	Edelsplitt	1.305.251				1.305.251
	Schotter, Splitt	639.814			23.397	663.211
	Granit			313.935		313.935
	Mauerwerk			99		99
	Wasserbausteine				22.906	22.906
	Schlacke, Grandgeröll				2.740	2.740
	Mastixverguss				1.201	1.201
	Asphaltbeton				18.167	18.167
	Bitumensand				1.552	1.552
	Ton				36.058	36.058
	bit. Bindemittel	82.648				82.648
	hyd. Bindemittel	19.736				19.736
	Beton		57.191	137.565	68.203	262.959
metallische Rohstoffe	Stahl		4.380	20.848	7.775	33.003
	Aluminium			134		134
	Kupfer			436		436
	Bronze			46		46
Kunststoff / Sonstige	PE			396		396
	HDPE			3		3
	Geotextilien (1.000 m ²)				21.443	21.443
	PVC				1.892	1.884
	Teeröl			273		273
	Buchenholz			2.979		2.979
Summe mineralische Rohstoffe		7.226.281	57.191	1.122.114	180.515	8.586.101
Summe metallische Rohstoffe		0	4.380	21.464	7.775	33.619
Summe Kunststoffe / Sonstige*		0	0	3.651	1.892	5.535
Gesamtsumme*		7.226.281	61.571	1.147.229	190.182	8.625.255

Quelle: Eigene Abschätzung, Details in den vorangegangenen Tabellen, *ohne Geotextilien

Die jährlichen Erneuerungsbedarfe im Straßen- und Schienennetz wurden über die Nutzungs- bzw. Lebensdauer hochgerechnet.²² Im Bereich der Wasserstraßen konnten die jährlichen Erneuerungsbedarfe nicht ermittelt werden. Hier gehen Erneuerung und Erweiterung insbesondere der Schleusen häufig Hand in Hand. Daher dominieren im Bereich der Wasserstraßen im Gegensatz zu Straße und Schiene die jährlichen Materialflüsse für Neubau und Erweiterung (Tab. 53).

²² Soweit keine detaillierten Informationen vorlagen, wird auch in den anderen Infrastrukturbereichen der Erneuerungsbedarf über die Lebensdauer ermittelt.

Tab. 53: Übersicht über die jährlichen Flüsse für Neubau und Erweiterung der Verkehrsinfrastrukturen

Material in 1.000 t		Brücken, Straßen Tunnel Schienen			Wasser- straßen	Verkehr gesamt
mineralische Rohstoffe	Gesteinsmehl	438				438
	Edelbrechsand	757				757
	Edelsplitt	3.695				3.695
	Sand	6.806				6.806
	Sand-Kies			1.936		1.936
	Kies, Schotter, Stein	9.107			485	9.592
	Granit			2.840		2.840
	Mauerwerk			1		1
	Wasserbausteine				9	9
	bit. Bindemittel	209				209
	hyd. Bindemittel	210				210
	Beton		1.145	1.461	1.079	3.685
metallische Rohstoffe	Stahl		89	162	63	314
	Aluminium			2		2
	Kupfer			5		5
	Bronze			1		1
Kunststoff / Sonstige	PE			4		4
Summe mineralische Rohstoffe		21.222	1.145	6.238	1.573	30.178
Summe metallische Rohstoffe		0	89	170	63	322
Summe Kunststoffe / Sonstige		0	0	4	0	4
Gesamtsumme		21.222	1.234	6.412	1.635	30.503

Quelle: Eigene Abschätzung, Details in den vorangegangenen Tabellen

Insgesamt sind die jährlichen Stoffflüsse im Bereich der Verkehrsinfrastrukturen - im Gegensatz zu den anderen Infrastruktursystemen - vor allem durch die Instandhaltung der Infrastruktur (Tab. 54) bestimmt. So ist der jährliche Materialbedarf für die Instandhaltung im Straßenbau (100 Mio. Tonnen) fünfmal höher als der des Neu- und Ausbaus (21 Mio. Tonnen). Dabei sind Gemeindestraßen sowohl beim Neubau als auch bei der Instandsetzung in absoluten Größen auf Grund der Länge des Straßennetzes der größte Verursacher von Stoffflüssen²³. Auch im Schienennetz geht der Großteil der jährlichen Stoffströme in die Instandhaltung der Strecken. Eine Erweiterung findet dort nur noch in geringem Maße statt.

²³ Pro Kilometer sind Autobahnen der ressourcenintensivste Straßentyp.

Tab. 54: Übersicht über die jährlichen Flüsse für Instandhaltung der Verkehrsinfrastrukturen

Material in 1.000 t		Straßen	Brücken, Tunnel	Schienen	Wasser- straßen	Verkehr gesamt
mineralische Rohstoffe	Gesteinsmehl	3.255				3.255
	Edelbrechsand	4.958				4.958
	Edelsplitt	29.014				29.014
	Sand	27.465				27.465
	Sand-Kies			12.395		12.395
	Kies, Schotter, Stein	35.968				35.968
	Granit			25.614		25.614
	Mauerwerk					0
	bit. Bindemittel	2.336				2.336
	hyd. Bindemittel	813				813
	Beton		964	2.517	32	3.513
metallische Rohstoffe	Stahl		81	610		691
	Aluminium			2		2
	Kupfer			20		20
	Bronze			5		5
Kunststoff / Sonstige	PE			15		15
	Teeröl			9		9
	Buchenholz			99		99
Summe mineralische Rohstoffe		103.809	964	34.904	40.526	32
Summe metallische Rohstoffe		0	81	597	637	0
Summe Kunststoffe / Sonstige		0	0	120	123	0
Gesamtsumme		103.809	1.045	41.286	32	146.172

Quelle: Eigene Abschätzung, Details in den vorangegangenen Tabellen

4 Trink- und Abwasserinfrastruktur

Dieses Kapitel untersucht die Materiallager und –flüsse der Trink- und Abwasserinfrastruktur in Deutschland. Erfasst werden die wichtigsten Baumaterialien (mineralische Baustoffe, Metalle, Kunststoffe) im Bestand sowie die jährlichen Materialflüsse, die durch Neubau und Sanierung²⁴ der Trink- und Abwasserinfrastruktur induziert werden.

Es gibt bisher nur wenige Forschungsprojekte, welche sich mit dieser Thematik beschäftigen: So wird an der ETH Zürich (Abteilung Siedlungswasserwirtschaft der EAWAG) zum Materialbedarf und den Lagerbeständen der Wasserinfrastruktur der Schweiz im 20. Jahrhundert – hinsichtlich Status Quo und der historischen Entwicklung – geforscht mit dem Ziel, eine Grundlage für eine nachhaltige Umgestaltung der Infrastruktur zu bilden. Weitere Untersuchungen befassen sich mit der Integration der technischen Infrastruktur in Ökobilanzen (Buchert et al. 2004; Zimmermann et al. 1996; Siedentop et al. 2006) oder der Materialintensität einzelner Anlagentypen (Boermans-Schwarz 1998; Bringezu 1998; Bringezu 2000; Markus et al. 1996; Reckerzügl 1997; Venkatesh et al. 2009). Einen weiteren Schwerpunkt bilden Lebenszyklusanalysen und Öko-Bilanzierungen der Wasserinfrastrukturen (Tillmann et al. 1998; Dennison et al. 1999; Jekel et al. 2006; Doka 2007; Althaus et al. 2007; Lassaux et al. 2007; Hillenbrand 2009).

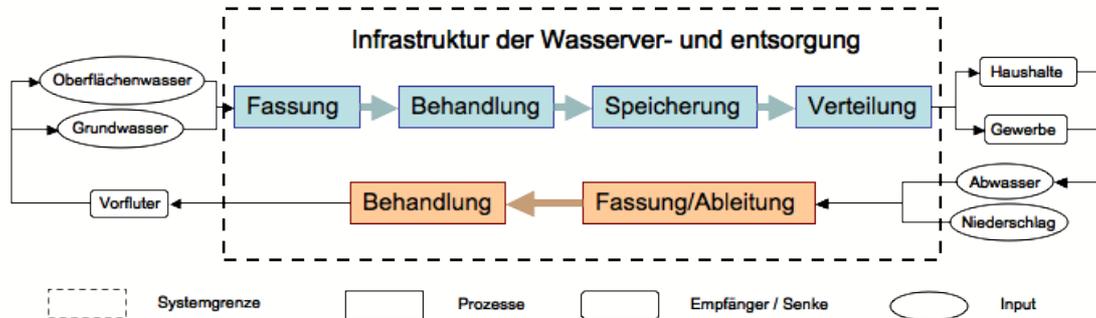
Grundlage der vorliegenden Berechnungen bilden umfangreiche Recherchen in einschlägiger (technischer) Fachliteratur, vorhandenen Ökobilanzierungen und Lebenszyklusuntersuchungen (s.o.). Darüber hinaus wurden die getroffenen Annahmen in Expertengesprächen und einem Expertenworkshop überprüft und ggf. angepasst. Die Anmerkungen werden jeweils kurz in den entsprechenden Abschnitten aufgeführt.

Insgesamt ist die Datensituation im Trink- und Abwasserbereich bezogen auf die Infrastruktur wenig zufrieden stellend. Die Leitungs- und Kanalnetze sind aufgrund ihres großen Anlagewertes und zu vermeidender Schäden hinsichtlich ihrer Materialverteilung relativ gut erfasst, es fehlen jedoch Daten zur Nennweitenverteilung und Gesamtkilometerzahl (Leitungsnetz). Für viele Systemkomponenten fehlen verlässliche Daten zur Gesamtmenge, so dass auf Schätzungen zurückgegriffen werden muss.

Wasserversorgung und Abwasserentsorgung sind – neben Energieversorgung, Nachrichtenversorgung und Abfallentsorgung – Teilsysteme der Ver- und Entsorgung. Abb. 4 veranschaulicht die Systemkomponenten der beiden Teilsysteme, welche – prinzipiell ähnlich - jedoch in ihrem Systemablauf spiegelbildlich verlaufen (Tietz 2006, 5):

²⁴ Die Veränderung des aktuellen Materialbestandes resultiert aus Neubau- / bzw. Rückbauaktivitäten sowie unterschiedlichsten Sanierungsverfahren (Reparatur, Renovation, Erneuerung). Reparaturen sind in den jährlichen Flüssen nicht berücksichtigt, da es sich hierbei um die Behebung örtlich begrenzter Schäden handelt. Diese sind in der Regel mit geringem Materialaufwand verbunden und nicht belastbar quantifizierbar.

Abb. 4: System der Wasserver- und Abwasserentsorgung



Quelle: Eigene Darstellung

Es findet gewissermaßen ein Stoffwechsel (Metabolismus) statt, welcher sich in den gesamten „urban metabolism“ (Baccini/Brunner 1991; Baccini et al. 2001; Blum/Stutzriemer 2007) einfügt. Neben dem Ziel der Systemoptimierung, indem die zunächst linear ausgelegten Systeme in Kreisläufe umgewandelt werden (Tietz 2006, 3), kann eine Ressourcenschonung auch durch einen reduzierten Materialverbrauch im Funktionsablauf erfolgen.

Unter der Wasserversorgung werden nach Tietz (2006, 190) alle Einrichtungen und Anlagen zur leitungsgebundenen Versorgung der Siedlungen mit der natürlichen Ressource Wasser als Trink- und Nutzwasser verstanden. Die Wasserversorgung umfasst die Gewinnung von Rohwasser (Oberflächen- und Grundwasser) aus Brunnen, Quellen, Talsperren oder Uferfiltrat und seine Aufbereitung zu Trink- und Brauchwasser sowie seine Verteilung, um eine flächendeckende Versorgung der privaten Haushalte mit Trinkwasser sowie der Industriebetriebe und Kraftwerke mit Brauchwasser zu gewährleisten. Da die Ressource Wasser in der Regel nicht flächendeckend am Ort ihres jeweiligen Bedarfes und in den jeweils erforderlichen Eigenschaften auftritt, ist ein umfangreiches System, bestehend aus Infrastrukturen und technischen Anlagen zur Fassung, Behandlung, Speicherung und Verteilung, notwendig, um eine solche flächendeckende, qualitative Versorgung gewährleisten zu können.

Das System Abwasserentsorgung dient dazu, die Siedlungsflächen von Abwasser (Schmutzwasser und Regenwasser) zu entsorgen und dieses – großteils gereinigt – wieder dem natürlichen Wasserkreislauf zuzuführen. Das Abwasser wird zunächst gesammelt und dann meist unterirdisch in Abwasserleitungen unter Ausnutzung des natürlichen Gefälles einer Behandlungsanlage (Kläranlage) und dann einem Vorfluter zugeführt (Tietz 2006, 228). Die Abwasserentsorgung leistet einen wichtigen Beitrag zur Umwelthygiene, indem sie auf eine Verhinderung oder Minderung von Schadstoffbelastungen abzielt. Sie umfasst zum einen die Sammlung, Ableitung und Reinigung

von Schmutzwasser sowie zum anderen die Sammlung, Ableitung (und teilweise Reinigung) von Regenwasser.

Im Rahmen des Projektes werden lediglich öffentliche Anlagen betrachtet – endend an der jeweiligen Privatgrundstücksgrenze. Damit liegen sämtliche Grundstücks- und Hausanschlüsse und –leitungen außerhalb der Betrachtung. Obgleich zahlenmäßig relevant, liegen für den privaten Bereich so gut wie keine Daten vor. Liegenschaften des Bundes und anderer Gebietskörperschaften sind Teil der Grundstücksentwässerung und liegen somit auch im privaten Zuständigkeitsbereich (Stein 2004). Auch Anschlusskanäle, obgleich gemäß Deutschem Normenwerk zum öffentlichen Zuständigkeitsbereich der Kanalisation gehörend, werden nicht betrachtet, da sie vom Statistischen Bundesamt nicht mit erfasst werden (Destatis 2009, Tab. 7).

4.1 Materialbestände und –flüsse der Infrastrukturen der Wasserversorgung

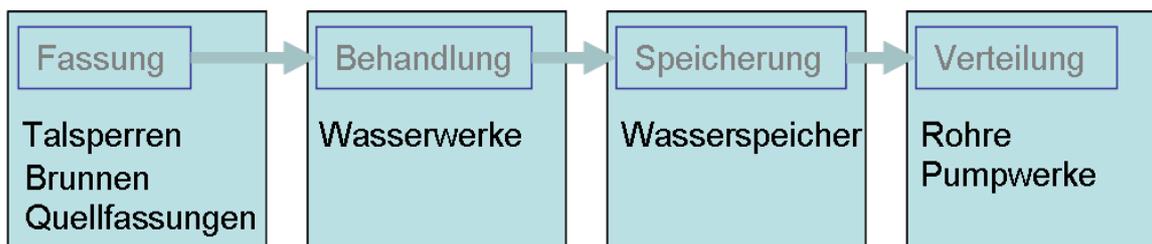
Die Trinkwasserversorgung fällt grundsätzlich in die Verantwortung der Gemeinden im Rahmen ihres Auftrags zur Daseinsvorsorge. Die Städte und Kommunen können diese Pflichtaufgabe hoheitlich wahrnehmen oder privatrechtlich organisierte Unternehmen mit der Durchführung beauftragen. Derzeit gibt es in Deutschland etwa 6.400 Betriebe der Wasserversorgung (ATT et al. 2008).

Die zentrale öffentliche Trinkwasserversorgung in Deutschland besteht in ihren Grundzügen seit mehr als 100 Jahren und wird fortlaufend den technischen und hygienischen Erfordernissen angepasst. Kennzeichnend sind selten auftretende Rohrbrüche und eine im globalen Vergleich sehr hohe hygienische Sicherheit mit überaus niedrigen Wasserverlusten (BMU 2006). Zur Gewährleistung der Versorgungssicherheit und einer hinreichenden Trinkwasserhygiene besteht grundsätzlich ein in den jeweiligen kommunalen Satzungen geregelter Anschluss- und Benutzungszwang. Der Anschlussgrad der Bevölkerung an das Netz der öffentlichen Trinkwasserversorgung liegt daher bei über 99 % (ATT et al. 2008). Allerdings ging in den letzten 15 Jahren die entnommene Wassermenge in allen Bereichen spürbar zurück (Destatis 2009). Ursachen liegen in verändertem Verbraucherverhalten sowie verstärkter Kreislauf- und Kaskadennutzung in der Industrie.

Die Infrastruktur der Wasserversorgung bedarf v.a. in den städtischen Regionen (wie, in noch größerem Ausmaß, die Abwasserinfrastruktur) durch ihr hohes Alter großer Sanierungs- und Instandhaltungsmaßnahmen (BMU 2006). Darüber hinaus führen geänderte Rahmenbedingungen (demographischer Wandel, Klimawandel) zu modifizierten Anforderungen an die Netze, welche sich entsprechend anpassen müssen.

Zur Sicherstellung einer flächendeckenden qualitativ hochwertigen Wasserversorgung ist eine aufwändige Infrastruktur mit hohen Erschließungskosten erforderlich. Vielfältige technische Anlagen zur Wassergewinnung, -aufbereitung, -speicherung sowie -verteilung sind notwendig (ATT et al. 2008). Den einzelnen Prozessschritten in der Wasserversorgung lassen sich folgende Anlagen zuordnen:

Abb. 5: Anlagen der Wasserversorgung



Quelle: Eigene Darstellung

Nach einer kurzen Einführung in den jeweiligen Infrastrukturtyp werden die jeweiligen Materialbestände und –flüsse detailliert hergeleitet.

4.1.1 Talsperren

Charakteristisch für Deutschland ist die bevorzugte Nutzung örtlicher Ressourcen für die (Trink-) Wassergewinnung. Geringe jährliche Niederschlagsmengen, geologische Bedingungen, touristische Nutzung sowie große Ballungsgebiete erfordern jedoch in einigen Regionen Deutschlands, dass ein Teil des Wasserbedarfs aus Talsperren (Sachsen, Thüringen) oder durch Fernwasserversorgungen (Schwäbische Alb, Neckareinzugsgebiet, Halle-Leipzig) gedeckt wird (BMU 2006). Talsperrengestützte Wasserversorgungssysteme finden sich vorwiegend an kleinen Flüssen mit unregelmäßigem Dargebot, an denen sich über Jahrzehnte eine Absicherung der Wasserversorgung über Talsperren entwickelt hat. Diese befinden sich überwiegend an der Ruhr, in Thüringen, in Sachsen und im Harz. Insgesamt beziehen in Deutschland 14 Mio. Menschen ihr Trinkwasser direkt aus Talsperren oder ihre Versorgung wird durch Talsperren abgesichert (DTK 2003). Zwölf Prozent des Trinkwassers in Deutschland werden daher aus See- bzw. Talsperrenwasser gewonnen (Destatis 2009).

Eine Talsperre ist nach DIN 4048 definiert als „eine Stauanlage, die über den Querschnitt des Wasserlaufs hinaus den ganzen Talquerschnitt absperrt“. Sie besteht in der Regel aus der Hauptsperre (Absperrbauwerk) mit Speicherbecken und Vorsperren, diese wiederum mit Stau- oder Speicherbecken“ (Rißler 1998). Viele Talsperren erfüllen als sog. Mehrzweck-Talsperren mehrere der folgenden Funktionen (DTK 2003): Energiegewinnung, Energiespeicherung, Versorgung mit Trink- und Brauchwasser, Hochwasserschutz, Erholung und Freizeit.

Ermittelter Gesamtmaterialbestand

311 Talsperren erfüllen die Kriterien der ICOLD (International Commission on Large Dams) als so genannte „große“ Talsperren. Über die Gesamtzahl aller Talsperren und Staudämme in Deutschland liegen keine Zahlen vor, sie dürfte jedoch in etwa doppelt bis dreifach so hoch sein und viele kleinere Anlagen umfassen. Im internationalen

Vergleichen sind die Talsperren in Deutschland relativ klein: 70 % der Bauwerke haben ein Volumen kleiner 500.000 m³. Die Höhe der Talsperren in Deutschland variiert von 20 m bis 100 m, jedoch ist der Großteil weniger als 30 m hoch (DTK 2003, 8; ICOLD 2003).

Unsere Berechnungen umfassen jene 308 Talsperren, welche in DTK 2001 aufgelistet sind und bezüglich Bauwerks-Volumen und Typ relativ gut dokumentiert sind (DTK 2001; LTV Sachsen 2007; Roscher 2006)²⁵.

Talsperren sind bedingt durch ihre Größe sehr materialintensiv: das volumenmäßig mächtigste Absperrbauwerk in Deutschland ist der Damm des Brombachspeichers (Erddamm mit Innendichtung) in Bayern mit 3.500.000 m³ (DTK 2001).

Grundsätzlich können Staumauern und Staudämme unterschieden werden: Staumauern bestehen aus den Baustoffen Bruchsteinmauerwerk (bis etwa 1930) oder Beton, die Dämme aus Erd- oder Felsschüttungen (teilweise mit Betonkern) mit einer Dichtung aus feinkörniger Erde, Beton oder Asphaltbeton oder Folien (Rißler 1998, 81). Aufgrund der geologischen Bedingungen sowie verbesserter Erdbautechnik wurden in Deutschland in den letzten Jahrzehnten hauptsächlich Staudämme gebaut. Es dominieren mit 50 % Erddämme, gefolgt von Steinschüttdämmen (Tab. 55). In Kombination mit erheblich größeren durchschnittlichen Bauwerksvolumina wird deutlich, dass im Bereich der Talsperren natürliche Baustoffe (Kiese, Sande, gebrochenes Felsmaterial) dominieren. Von den meisten Bauwerken liegen Daten über das Volumen vor (DTK 2001; LTV 2007; Roscher 2006). Fehlende Angaben wurden über das Durchschnittsvolumen der jeweiligen Bauwerkstypen ermittelt.

Tab. 55: Talsperren nach Bauwerkstyp und Bauwerksvolumen

Bauwerkstypen	Anzahl	Anteil	durchschn. Volumen (m ³)	Gesamt Volumen (m ³)
Erddämme (TE)	156	51 %	404.809	63.150.151
Steinschüttdämme (ER)	61	20 %	805.093	49.110.664
Gewichtsstaumauern (PG) Beton	44	14 %	123.098	5.416.295
Gewichtsstaumauern (PG) Bruchstein	41	13 %	68.195	2.795.990
Pfeiler-Staumauer (CB)	1	0 %	123.000	123.000
Gewölbe-Staumauer (VA)	2	1 %	72.500	145.000
Gewölbereihen-Staumauer (MV)	1	0 %	7.000	7.000
Stauwehr (W)	2	1 %	50.000	100.000
Gesamt	308			120.848.100

Quelle: Eigene Berechnungen auf der Grundlage verschiedener Quellen (DTK 2001; LTV 2007; Roscher 2006), Einteilung verändert nach ICOLD

Nur bei geringen Stauhöhen ist die Konstruktion von **Staudämmen** aus einem einheitlichen Schüttstoff möglich – meist ist der Staudamm zonal unterteilt in Dichtungs-,

²⁵ Es ist davon auszugehen, dass es sich bei den drei kürzlich hinzugekommenen Sperren um Erd- oder Steinschüttdämme handelt.

Stütz- und Drainagekörper (Dachroth 2002). Die Dichtungskörper werden entweder als Oberflächendichtung auf der wasserseitigen Dammoberfläche oder als Innendichtung im Dichtungskern angebracht. Als Dichtungselemente kommen Erdstoffdichtungen, Betondichtungen, Asphalt-dichtungen, Kunststoffdichtungen und Spundwände zum Einsatz. Aufgrund der mangelnden Datenlage und vernachlässigbarer Mengen (abgesehen von den häufigen Erdstoffdichtungen sind die Dichtungskerne meist schmal) werden diese jedoch nicht betrachtet. Das Material für den Stützkörper kommt meist aus dem Flussbett selber oder aus der näheren Umgebung. Für verdichtete Erdstoffe gehen wir von einer Einbaudichte von 2,0 t/m³ aus, für Naturstein von 1,6 t/m³.

Bruchsteinmauern wurden um die Jahrhundertwende 19. / 20. Jahrhundert gebaut und sind meist vom sogenannten „Intze-Typ“ nach Prof. Otto Intze aus Aachen. Sie sind meist in bogenförmiger, monolithischer Ausführung aus vor Ort vorhandenem Naturstein mit Kalk-Trass-Mörtel gebaut. Sanierungen und Anpassungen an die Regeln der Technik sind zu fast 100 % erfolgt. Bruchsteine haben eine Rohdichte von ca. 2,7 t/m³.

Ab den 1930er Jahren ersetzte zunehmend Beton die Bruchsteine als Baustoff beim Bau der Gewichtsstaumauern. Dieser Spezialbeton wurde zumeist vor Ort hergestellt und durch Kunststoff-Fugenbänder und Kupferbleche abgedichtet. Die Betonzuschläge kamen häufig aus Steinbrüchen vor Ort, als Betonzusatzstoff wurde Flugasche verwendet. Als Zement wurde häufig Hochofenzement verwendet. Die Betondichte bei Staumauern liegt in der Regel zwischen 2,3 und 2,5 t/m³, hier liegt den Berechnungen die geringere Dichte von 2,3 t/m³ zugrunde. Der Stahlverbrauch für die Talsperren ist relativ gering und wird vernachlässigt. Bei Vollmauern wird fast durchweg unarmerter Beton verwendet. Pfeiler-, Gewölbe- und Gewölbereihenstaumauern sowie Stauwehre²⁶ werden ebenfalls in Betonbauweise erstellt.

In den meisten Fällen sind umfangreiche Untergrundabdichtungen mittels Zementinjektionen notwendig. Meistens wird in die Bohrlöcher reiner Zement eingepresst, gelegentlich auch Mischungen mit Ton, Bentonit und Chemikalien. Daten sind jedoch nur wenige publiziert (z.B. Zillierbach, Rappbode) und unterscheiden sich sehr in Abhängigkeit von den lokalen Gegebenheiten. Daher sind diese Mengen nicht hochrechenbar. Aus dem gleichen Grund und aufgrund vernachlässigbarer Mengen werden Armaturen, Hochwasserentlastungsanlagen und Stollen vernachlässigt.

Tab. 56 Materialbestand Talsperren in Deutschland

Material (1.000 t)	Gesamt	davon für Wasserkraft	netto
Kiese, Sande	126.300	9.132	117.168
Naturstein	86.126	30.668	55.458
Beton	13.320	3.973	9.347
Gesamt	225.746	43.773	181.973

Quelle: Eigene Berechnungen

²⁶ Das Bauvolumen für die Stauwehre wurde aufgrund fehlender Daten auf durchschnittliche 50.000 m³ geschätzt.

Insgesamt sind nach unseren Berechnungen in den 308 großen Talsperren Deutschlands knapp 130 Millionen Tonnen Erdstoffe, knapp 90 Millionen Tonnen Natursteine und gut 13 Millionen Tonnen Beton gespeichert (Tab. 56). Ausgehend von einem durchschnittlichen Zementgehalt von 200 kg/m^3 ²⁷ ist somit von knapp 1,2 Mio. Tonnen Zement allein in den Beton-Staumauern auszugehen (ohne Stollen, Injektionen, Betonbauwerke in Staudämmen).

Rechnet man die Wasserkraft heraus (43 Dämme und Staumauern, welche überwiegend der Energieversorgung dienen und im Besitz von Energieversorgungsunternehmen sind), so bleiben noch gut 180 Millionen Tonnen Bestand, davon zum Großteil Erdbaustoffe (Kiese, Sande, Natursteine).

Ermittlung der jährlichen Materialflüsse

Absperrbauwerke sind im allgemeinen für eine sehr lange Lebensdauer ausgelegt – ca. 80 – 100 Jahre. Darüber hinaus sind sie so zu konstruieren, dass die geplante Lebensdauer nach einer Sanierung ohne großen Aufwand wesentlich verlängert werden kann (DTK 2003). Die vorerst letzte große Talsperre in Deutschland, Leibis/Lichte in Thüringen, wurde 2005 fertig gestellt.

In Deutschland steht demnach die Unterhaltung der bestehenden Anlagen im Vordergrund. Durch gewandelte Zweckbestimmungen und Anforderungen an Talsperren (insb. bzgl. Hochwasserschutz) können darüber hinaus bauliche Anpassungen und betriebliche Veränderungen notwendig werden (Rißler 1998). Teilweise werden Talsperren rückgebaut: Beispiele sind die Talsperre Krebsbach in Thüringen oder die Herbringhauser Talsperre in Wuppertal (Thüringer Fernwasser 2010).

Zukünftige Bauprojekte von Talsperren und Dämmen betreffen hauptsächlich Anlagen zur Energieerzeugung²⁸ und zur Hochwasserregulierung. Mit der Häufung extremer Wetterverhältnisse steigt in Zukunft der Bedarf an zusätzlichem Rückhalteraum für Hochwasser- und Niedrigwasserperioden jedoch wieder an und könnte zu zunehmender Bautätigkeit führen (Preußner 2007). Tab. 57 gibt einen Überblick über aktuelle Neubauprojekte im Talsperren- / Speicherbau.

²⁷ Wir gehen hier von einem geringeren Zementgehalt aus als Ecoinvent für die Schweiz mit 230 kg/m^3 , da in Deutschland Gewichtsstaumauern dominieren, welche einen höheren Anteil an magerem Beton ($140\text{-}180 \text{ kg/m}^3$) aufweisen (Bauer et al. 2007),

²⁸ Im Zusammenhang mit der stärkeren Erzeugung erneuerbarer Energien erfahren Pumpspeicherwerke zurzeit eine Renaissance. Konkret sind in Deutschland zwei neue Groß-Projekte in Vorbereitung: PSW Blaubeuren der Stadtwerke Ulm / Neu-Ulm und das PSW Atdorf der Schluchseerwerke AG (BEE 2009). Beide werden der Wasserkraft zugerechnet.

Tab. 57: Neubauprojekte im Talsperren- / Speicherbau

Name	Bundesland	Bauweise	Fertigstellung	Nutzung	Höhe ü. Talsohle	Kronenlänge	Volumen (m³)
Lauenstein	Sa	Steindamm mit Asphaltbetoninnendichtung	2006	H	41,4	260	480.000
Drachensee (Furth im Wald)	Bay	Erddamm mit Innendichtung	2008	H, E	11	170	NA
Goldbergsee	Bay	Erddamm mit Innendichtung	2010	H	7	290	NA
Rennersdorf	Sa	Steinschüttdamm mit Asphaltbetoninnendichtung	2010	H	15	260	160.000
Wippra	S-A	Erddamm	2011	H	17	190	NA
Wolterdingen	BW	Erdschüttdamm	2011	H	18	460	300.000
Straßberg	S-A	Erddamm	2012	H	19	260	NA
Meisdorf	S-A	Erddamm	2013	H	15,5	117,5	NA
Neuwürschnitz	Sa	Steinschüttdamm mit Asphaltbetoninnendichtung	2013	H	12,5	535	NA
Querfurth	S-A	Homogener Erddamm	2013	H	7	140	NA
Niederseidewitz	Sa	Steinschüttdamm mit Asphaltbetoninnendichtung	2015	H	32	140	NA

Quelle: LfU Bayern (2009a), LTV Sachsen (2009), LTV Sachsen (2010), Regierungspräsidium Freiburg (2008), Talsperrenbetrieb Sachsen-Anhalt (2010)

In allen Fällen handelt es sich um Schüttdämme aus Erdbaustoffen und/oder Natursteinen, welche vergleichsweise kleiner sind als bereits bestehende Dämme. Folgende Annahmen werden getroffen:

- Pro Jahr wird ein Erd- oder Steinschüttdamm gebaut (0,7:0,3)
- Das durchschnittliche Bauwerksvolumen beträgt für Erddämme 150.000 m³, für Steinschüttdämme 300.000 m³.

Damit ergibt sich folgender geschätzter Materialinput durch Neubau:

Tab. 58: Jährliche durchschnittliche Zunahme Talsperren / Dämme durch Neubau

Material	In 1.000 t
Kiese / Sande	210
Natursteine	144
Gesamt	354

Quelle: Eigene Schätzung, Dichte Kiese / Sande 2.000 kg/m³, Schüttdichte Natursteine 1.600 kg/m³

Ein Rückbau von Dämmen oder Staumauern erfolgt in der Regel nicht. In den meisten Fällen erfolgt eine fortlaufende Nutzung als Naherholungsziel. In Thüringen wurde als erste Talsperre in Deutschland in 2007 die Talsperre Krebsbach rückgebaut. Die einzelnen Fraktionen werden dabei zum Teil vor Ort für die neu zu errichtenden Bauwerke

ke (Wartungs- und Wanderweg, Sohlgleitung, Erosionsschutzbuhnen) verwendet. Überschüssiges Dammmaterial wird in einen Seitendamm eingebaut. Abbruchmaterialien der Hoch- und Tiefbauten sowie die ausgebauten technologischen Ausrüstungen wurden abtransportiert und entsorgt oder verwertet (Thüringer Fernwasser 2010).

Legt man eine Lebensdauer von 80 Jahren zugrunde, so sind aktuell alle Talsperren mit Baujahr bis 1930 zu sanieren²⁹, das sind 61 Bauwerke (= 20 %). Davon sind 32 Bauwerke bereits saniert, so dass 29 aktuell zu sanierende Dämme und Staumauern verbleiben (davon 7 Absperrbauwerke, die hauptsächlich der Wasserkraft zugeordnet werden können). Für die verschiedenen Bauwerkstypen gibt es eine Vielzahl von Sanierungsvarianten, die im Einzelfall spezifisch ausgewählt werden. Daher ist eine Ermittlung der jährlichen Flüsse für Sanierungsarbeiten nicht leistbar.

4.1.2 Brunnen

Mit 62 % wird der überwiegende Teil der Wasserversorgung in Deutschland aus Grundwasser gespeist (Destatis 2009). Man unterscheidet im Allgemeinen zwei Arten von Grundwasserfassungen: vertikale und horizontale Fassung. Bei vertikaler Fassung werden neben den zahlenmäßig unbedeutenden Schlag- und Schachtbrunnen hauptsächlich Vertikalfilterbrunnen (Bohrbrunnen) genutzt. Bei der horizontalen Fassung dominieren Horizontalfilterbrunnen. Auch bei der Gewinnung von Uferfiltrat kommen Brunnen zum Einsatz. Für die Grundwassergewinnung im Rahmen der zentralen Wasserversorgung werden hauptsächlich Vertikalfilterbrunnen eingesetzt.

Meistens liegen Brunnen und Wasserwerke direkt beieinander. Häufig wird aber auch ein Wasserwerk von mehreren Brunnen bedient. Deshalb ist es schwierig, eine genaue Anzahl von Brunnen in Deutschland zu ermitteln. Teilweise verfügen die Landesbehörden über detaillierte Zahlen zu den genutzten Brunnen: In Bayern werden nach Informationen des Bayerischen Landesamts für Umwelt bspw. 4.500 Brunnen für die öffentliche Trinkwassergewinnung genutzt (von 2.400 Versorgungsunternehmen). Eine Gesamtanzahl für Deutschland liegt bisher nicht vor. Die Tiefen der Brunnen sind darüber hinaus je nach Tiefe der Grundwasser führenden Schichten sehr unterschiedlich.

Erste Materialintensitätsanalysen wurden beispielhaft für die Brunnen der Stadtwerke Düsseldorf durchgeführt (Westerhof 2001). Die 74 Vertikalbrunnen und 1 Horizontalbrunnen fördern eine Mischung aus uferfiltriertem Rheinwasser und Grundwasser aus der Region. Folgende Größenordnungen wurden ermittelt:

²⁹ Der Großteil der Bauwerke ist in den 1930er bis 1980er Jahren gebaut worden, so dass bis zum Jahr 2070 mit weiteren Sanierungsvorhaben zu rechnen ist.

Tab. 59: Beispieldaten zur Materialintensität von Brunnen

Vertikalbrunnen (20 m Tiefe)	Stahl	0,72 t
Horizontalbrunnen (15 m Tiefe)	Kupfer	6,68 t
Horizontalbrunnen (15 m Tiefe)	Beton	106,03 t

Quelle: Westerhof (2001)

Mit zunehmender Betriebszeit lässt die Brunnenleistung verschleißbedingt nach, der Brunnen „altert“. Teilweise sind Brunnensanierungen notwendig. Brunnen (und Grundwassermessstellen), die auf Dauer außer Betrieb genommen werden oder nicht mehr zu sanieren sind, müssen zum Schutz des Grundwassers endgültig zurückgebaut werden. Der Brunnen wird entsprechend der geologischen Verhältnisse verfüllt und nachgedichtet. Teilweise wird der Brunnenausbau vollständig oder nur zum Teil entfernt.

Aufgrund der vergleichsweise geringen Relevanz als Materiallager im Gesamtsystem sowie unter Berücksichtigung der nicht ausreichenden Datensituation wurde jedoch von einer weiteren Bearbeitung abgesehen.

4.1.3 Quellwasserfassungen

Quellfassungen zur Wassergewinnung sind althergebrachte Bauweisen. Die Bauart der Quellfassungen hängt von der Art und Ursache des Zutagetretens des Grundwassers ab. Man unterscheidet aufsteigende (artesische) und absteigende oder seitlich austretende Quellen. Der Quellwasseranteil an der Wassergewinnung der öffentlichen Wasserwerke hat ständig abgenommen und stagniert derzeit bei ca. 8 % der Gesamtförderung (Mutschmann/Stimmelmayer 2007; Destatis 2009).

Es ist schwierig, eine genaue Anzahl von Quellfassungen in Deutschland zu ermitteln. Teilweise verfügen die Landesbehörden über detaillierte Zahlen zu den genutzten Quellfassungen: In Bayern werden nach Informationen des Bayerischen Landesamts für Umwelt bspw. 7.100 Quellfassungen für die öffentliche Trinkwassergewinnung genutzt (LfU Bayern 2010). Die Wahl der Baustoffe ist abhängig von der Beschaffenheit des Quellwassers. Zumeist Beton- und Lettendecken (aus Ton) zur Abdichtung, Waschkies. Sickerrohrleitungen bestehen aus Steinzeug, Beton, Faserasbestzement, Stahl (mit Schutzüberzug). Bei Aufgabe müssen Quellfassungen zwingend rückgebaut werden, so dass die Materialien potenziell wieder in die Stoffkreisläufe eingehen können: Aufgrund der besonderen Bedeutung natürlicher Quellaustritte soll der Rückbau von Quellen zu einer weitgehenden Wiederherstellung der ursprünglichen Situation führen (Mutschmann/Stimmelmayer 2007).

Analog zu den Brunnen haben wir aufgrund der untergeordneten Bedeutung der Quellfassungen als Materiallager verbunden mit ihrer Inhomogenität und der unzureichenden Datensituation von einer weiteren Bearbeitung der Quellfassungen abgesehen.

4.1.4 Wasserwerke

Häufig enthält das Grund- oder Oberflächenwasser Stoffe, die gesundheitsschädigend oder wegen ihres Geruchs oder Geschmacks unerwünscht sind oder zu technischen Störungen führen können. Um den qualitativen Ansprüchen der Nutzer (Haushalte, Gewerbe, Industrie, öff. Einrichtungen) zu entsprechen, muss das Rohwasser in den meisten Fällen zu Trinkwasser oder Brauchwasser technisch aufbereitet werden. Dies geschieht in Wasseraufbereitungsanlagen (hier: Wasserwerke).

An Aufbereitungszielen werden unterschieden:

- Die Entfernung geogener Stoffe,
- die Entfernung anthropogener Stoffe,
- der Schutz des Verteilungsnetzes,
- sowie die technische Verwendbarkeit (BMU 2006).

Nach den allgemein anerkannten Regeln der Technik bietet sich eine Vielzahl von technischen Möglichkeiten, diese Aufbereitungsziele zu erreichen, die auf physikalischen, chemischen oder biologischen Vorgängen beruhen. Das Wasser wird zunächst einer Reinigungsanlage mit Grob- und Feinfilter zugeführt. Danach folgt in den meisten Fällen eine Entkeimung, häufig durch Chlorung, seltener mit ultravioletter Bestrahlung oder Ozonierung (Beigabe von Ozon).

Folgende Verfahren kommen schrittweise nacheinander zur Aufbereitung von Grundwasser zur Anwendung:

Tab. 60: Verfahren der Grundwasseraufbereitung und erforderliche Anlagen

Aufbereitungsverfahren	Anlagen
Vorreinigung	Rechen; Siebe, auch Mikrosiebe; Sandfang
Flockung, Fällung	Rührbecken; Rohre; Dosieranlagen für Al- und Fe-Salze, Kalk, Polymere; Misch- und Rührreinrichtungen; evtl. Schwebbett; evtl. Flockenrückführung
Sedimentation	Absetzbecken, Lamellenseparatoren, Pulsatoren u.a.
Gasaustausch	Wellbahn-, Kaskaden oder Flachbodenbelüfter; früher auch Verdüngen; auch Füllkörperkolonnen
Oxidation, Desinfektion	Ozonerzeugungsanlagen; Reaktionsbehälter; Begasungskammer
Filtration	Schnellfilter als offene oder geschlossene (Druck-) Filter; Langsamfilter; Sonderfall: Feinfiltersysteme / Mechanisch wirkende Filter
Membranverfahren	Ultra-, Mikro-, Nanofilter
Adsorption	Aktivkohlefilter; spezielle Adsorptionsfilter
Chem. „Neutralisation“	Filtration über Kalkstein oder halbgebrannte Dolomite
Biol. Denitrifikation	Festbettreaktoren; auch fluidisierte Reaktoren; Substratzugabe
Ionenaustausch	Kationen- / Anionen- / Mischbettauwechsler
Zugabe von Inhibitoren	Dosieranlagen für Phosphate / Silikate

Quelle: Eigene Zusammenstellung nach Mutschmann/Stimmelmayer (2007)

Die Anforderungen an die Aufbereitungstechnik passen sich im Laufe der Zeit den veränderten Bedingungen an, wie größer werdende Verteilungsnetze und damit verbunden längere Aufenthaltszeiten des aufbereiteten Trinkwassers vom Wasserwerk zum Verbraucher (BMU 2006). Die Wasseraufbereitung muss individuell, immer auf das jeweilige Wasservorkommen abgestimmt, entworfen werden. Daher sind die Wasserwerke jeweils hinsichtlich ihrer Ausstattung sehr unterschiedlich.

Eine Wasseraufbereitungsanlage besteht aus den folgenden Anlageteilen, die meist getrennt ausgeschrieben, vergeben und ausgeführt werden (Mutschmann /Stimmelmayr 2007):

- Aufbereitungs- und maschinentechnischer Teil,
- elektrotechnischer Teil,
- Mess- und Steuereinrichtungen,
- bauliche Anlagen.

Wesentliche Bestandteile von Wasserwerken sind Filter und Pumpen sowie Wasserspeicher. Da die Gebäude sehr unterschiedlich sein können, empfiehlt sich nur eine Betrachtung der technischen Einrichtungen und der Massen für die Speicher.

Ermittelter Gesamtmaterialbestand

Die Anzahl der Wasserversorgungsunternehmen in Deutschland nach Bundesländern und Größenklassen des Wasseraufkommens kann der offiziellen Statistik (Destatis 2009, Tab. 3) entnommen werden: Es gibt nach Angaben des Statistischen Bundesamtes 4.833 Wasserunternehmen, die selber Wasser fördern und 6.211 Wasserversorger insgesamt (Tendenz sinkend). Einige Versorgungsunternehmen betreiben jedoch mehrere Wasserwerke. 1991 gab es in Deutschland (inkl. der Neuen Bundesländer) 8.160 Anlagen zur Wasseraufbereitung (Destatis 1994). Eine aktuellere Gesamtzahl ist nicht vorhanden. Diese fördern insgesamt eine Wassermenge von 5,1 Mrd. m³ Wasser (Destatis 2009).

Unsere Berechnungen basieren auf den EcoInvent-Daten von Althaus et al. 2007. Diesen liegt eine Beispiel-Anlage aus der Schweiz (Marin) mit einer Gesamtförderung von 1,2 Mio. m³ Wasser zugrunde. Jedoch ist zu berücksichtigen, dass Althaus et al. für die Bauphase der Infrastrukturen lediglich grobe Überschlagsrechnungen vornehmen, da sie im Vergleich zur Betriebsphase von untergeordneter Bedeutung ist.

Die EcoInvent-Daten lassen sich zum einen nach der Anlagenzahl, zum anderen nach der Fördermenge hochrechnen. Es ist jedoch anzumerken, dass das Schweizer Wasserwerk relativ groß ist³⁰. Auch wenn davon ausgegangen werden kann, dass kleinere Anlagen verhältnismäßig größere Infrastrukturen in Relation zu ihrer Fördermenge aufweisen, liefert eine Hochrechnung nach der Gesamt-Anlagenzahl tendenziell zu

³⁰ Nach Aussage eines Teilnehmers des Experten-Workshops sind in Deutschland ca. 80 % der Wasserwerke kleiner als das Referenzwerk in der Schweiz.

hohe Werte. Deshalb verwenden wir für weitere Berechnungen den niedrigeren Gesamtmaterialbestand, wie er über die Fördermenge ermittelt wurde.

Tab. 61: Materialbestand Wasserwerke in Deutschland

Baustoff	1 Anlage (Althaus et al.)		Gesamtmaterialbestand (1.000 t)	
	Menge (kg)	kg/m ³	nach Anla-	nach Förder-
			genzahl 5.000	menge 5.127.600.000
Guss-/Roheisen	18.200	1,52E-02	149	78
Roheisen	510	4,25E-04	4	2
Messing	2	1,67E-06	0	0
Bronze	3	2,50E-06	0	0
Aluminium, Produktionsmix	11	9,17E-06	0	0
Bewehrungsstahl	81.100	6,76E-02	662	347
Stahl, niedrig-legiert	25.500	2,13E-02	208	109
Kupfer	2.750	2,29E-03	22	12
Zink	1.020	8,50E-04	8	4
Kunstgummi, Synthetikgummi	1	8,33E-07	0	0
PVC, bulk polymerised	2.560	2,13E-03	21	11
Flachglas, beschichtet	28	2,33E-05	0	0
Ziegel	135.000	1,13E-01	1.102	577
Quarzsand	209.000	1,74E-01	1.705	893
geschäumter Vermiculit	14.400	1,20E-02	118	62
Beton	26.910.000	2,24E+01	219.586	114.986
Gesamt	27.400.085		223.585	117.081

Quelle: Eigene Berechnungen auf der Grundlage von Althaus et al. (2007)

Festzuhalten ist, dass der überwältigende Anteil des Gesamtmaterialbestandes (etwa 98 %) Beton ist.

Ermittlung der jährlichen Materialflüsse

Die Anzahl der Wasser fördernden Unternehmen nimmt seit Jahren linear ab – von 5.477 Unternehmen in 1998 auf 4.833 Unternehmen in 2007 (Destatis 2009). Jedoch war die Rückmeldung auf dem Experten-Workshop, dass in der Regel Wasserwerke nicht geschlossen werden, da eine breite Grundversorgung sichergestellt werden muss. Wenngleich es tendenziell einen leichten Rückgang gebe, da der Wasserverbrauch stetig abnimmt, so sei diese Zahl aber zu vernachlässigen.

Darüber hinaus lassen sich keine genauen Zahlen ermitteln, wie viele Werke in welcher Größe geschlossen werden. Gleiches gilt für die jährlichen Materialflüsse durch Erneuerung und Instandhaltung. Daher können die jährlichen Materialflüsse im Bereich der Wasserwerke nicht belastbar ermittelt werden.

4.1.5 Versorgungsnetz

Hauptbestandteile des Systems zur Wasserverteilung sind die Rohrleitungen, auf die auch ein Großteil der Investitionen und Wartungskosten entfallen (rund 70 % des investierten Kapitals der Wasserversorgungsunternehmen nach DVGW 2002). Die Verteilung des Trink- und Brauchwassers (sowie teilweise des Löschwassers) erfolgt über ausgedehnte Leitungsnetze, von großen Sammel- und Fernwasserleitungen bis hin zu kleinen Versorgungsleitungen. Man unterscheidet wie folgt:

- Zubringerleitungen (Transport zu den Versorgungsgebieten),
- Fernleitungen (Länge >25 km, DN >500, z.B. Schwäbische Alb, Neckareinzugsgebiet, Halle-Leipzig),
- Hauptleitungen,
- Versorgungsleitungen,
- Anschlussleitungen.

Ermittelter Gesamtmaterialbestand

Die genaue Gesamtlänge der Wasserversorgungsleitungen ist unbekannt. Wasserverbände gehen jedoch von 500.000 km ohne Anschlussleitungen aus³¹ (ATT et al. 2008; E-Mail BDEW). Desgleichen gibt es keine Daten zur Nennweitenverteilung des Rohrnetzes in Deutschland. Aufbauend auf der Größenverteilung der Mittelstadt Rastatt (aus Klinger 2007; 47.500 Einwohner, Rohrnetz 193,8 km in 2001 inkl. Anschlussleitungen) und Beispieldaten einiger Wasserversorger wird die Nennweitenverteilung wie folgt geschätzt³²:

Tab. 62: Größenverteilung Leitungsnetz in Deutschland (geschätzt)

durchschnittliche Nennweite DN	Anteil Gesamtnetz	Länge (km)
DN 100	50 %	250.000
DN 150	30 %	150.000
DN 200	10 %	50.000
DN 400	8 %	40.000
DN 800	2 %	10.000
Gesamt	100 %	500.000

Quelle: Schätzungen auf der Grundlage von Klinger (2007), Daten des LfU Bayern und des Oldenburgisch-Ostfriesischen Wasserverbandes, Aussagen auf dem Experten-Workshop

In der Trinkwasserversorgung werden, ähnlich dem Kanalnetz (s.u.), eine Vielzahl unterschiedlicher Werkstoffe eingesetzt: Stahl, Kunststoffe, Gusseisen, Zementmörtel

³¹ Wie bereits im Kapitel Systemgrenzen erwähnt, umfasst die vorliegende Betrachtung lediglich die öffentliche Infrastruktur. Die privaten Leitungsnetze sind um einiges länger.

(zur Auskleidung metallischer Rohre als Korrosionsschutz). Insgesamt richtet sich die Auswahl geeigneter Materialien für das Trinkwassernetz nach der novellierten Trinkwasserverordnung in der Umsetzung der EG-Trinkwasserrichtlinie (Tietz 2006).

Im Bestand dominieren Gusseisenleitungen und Kunststoffleitungen. Die Schadenstatistik Wasser der DVGW gibt für 1999 folgende Werkstoffverteilung an:

Tab. 63: Materialverteilung Leitungsnetz 1999 (größenunabhängig)

Material	Anteil
Grauguss GG	30,7 %
Duktilguss GGG	26,2 %
Stahl St	7,2 %
PE	6,4 %
PVC	20,4 %
Faserzement FZ	8,9 %
Spannbeton SB	0,2 %
	100,0 %

Quelle: DVGW (2002), Schadenstatistik Wasser; Datengrundlage: 128.444 km, ohne Anschluss- und Fernleitungen

Dabei ist zu beachten, dass Grauguss-, Faserzement- und Betonrohre für die Wasserversorgung nicht mehr eingesetzt und sukzessive ersetzt werden – ein sinkender Anteil für diese Werkstoffe ist das Resultat. Der Anteil der Kunststoffrohre am Trinkwassernetz steigt insgesamt (Markus et al. 1996), mit einem steigenden Anteil von PE-Rohren im Vergleich zu PVC-Rohren (LfU 2009).

Verschiedene Werkstoffe werden vorzugsweise für bestimmte Nennweiten eingesetzt: So dominieren Kunststoffe im Versorgungsnetz mit kleinen Rohrdurchmessern, wohingegen Stahl- und Betonrohre fast ausschließlich in großen Nennweiten (ab DN 500) verwendet werden (BGW 1993; Mutschmann/Stimmelmayer 2007; KRV 2002; Merkl 2008).

Auf der Grundlage dieser Überlegungen wurden die Werkstoffe nach Nennweite geschätzt.³² Aus Herstellerangaben lassen sich die spezifischen Rohrgewichte der verschiedenen Materialien und Rohrgrößen ermitteln. Neben den reinen Rohrmaterialien geht der Korrosionsschutz bei Guss- und Stahlrohren in die Materialbilanz ein. Duktile Gusseisenrohre werden in der Regel mit Zementmörtel ausgekleidet und mit einem Zink-Überzug versehen. Stahlrohre haben werkseitig eine Zementmörtelauskleidung und eine PE-Umhüllung.

³² Aufbauend auf den Anmerkungen aus dem Experten-Workshop wurde die Größenverteilung im Vergleich zu vorherigen Arbeitsberichten leicht modifiziert, um eine bessere Repräsentativität auch für den städtischen Raum zu erzielen.

³³ Die entsprechende Tabelle ist in der beigelegten Excel-Datei. Hier wurden die Anmerkungen der Experten nach dem Experten-Workshop berücksichtigt.

Zum Rohrnetz gehören auch die zahlreichen Armaturen, von denen die Absperrvorrichtungen³⁴ die wichtigsten sind (Mutschmann/Stimmelmayer 2007, 517). Die Gehäuse von Armaturen bestehen meist aus Gusseisen. Teile der Armaturen sind aus Stahl, legiertem Stahl, Buntmetallen, Kunststoffen und Dichtungstoffen. Darüber hinaus war früher ein innerer und äußerer Bitumenüberzug als Korrosionsschutz üblich. Heute kommen verschiedene Verfahren wie z.B. elektrolytische Kunststoffbeschichtung oder Emaillierung in Betracht. Bei kleinen Nennweiten in Haupt- und Versorgungsleitungen (bis DN 300) dominieren weich dichtende Keilschieber, bei größeren Nennweiten und in Zubringer- und Fernleitungen kommen aus technisch-wirtschaftlichen Gründen und zunehmend vorwiegend Absperrklappen zum Einsatz (DVGW 2004; Mutschmann / Stimmelmayer 2007; Merkl 2008).

Folgende Annahmen werden getroffen (basierend auf DVGW 2004; Merkl 2008): Bis DN 250 sind in Abständen von 500 m Keilschieber angebracht, ab DN 400 kommen auf 50.000 km Leitungsnetz 20.000 Absperrklappen. Hydranten werden etwa alle 150 m im Haupt- und Versorgungsnetz angebracht, fast ausschließlich in Form von Unterflurhydranten. Ausgehend von 6 Hydranten / km Leitungsnetz ergibt sich eine Gesamtzahl von drei Millionen Hydranten. Unter Heranziehung spezifischer Herstellerangaben wurde folgender Materialbestand (Gusseisen³⁵) für Armaturen ermittelt:

Tab. 64: Materialbestand Armaturen im Leitungsnetz

	Anzahl	kg/ St.	Gesamt (t)
Keilschieber DN 100	500.000	24,5	12.250
Keilschieber DB 150	300.000	40,5	12.150
Keilschieber DN 200	100.000	64	6.400
Absperrklappe DN 400	16.000	130	2.080
Absperrklappe DN 800	4.000	620	2.480
Unterflurhydrant DN 80	3.000.000	36	108.000
			143.360

Quelle: Eigene Berechnungen

Zum Schutz der Rohrleitung wird in der Regel das Wasserrohr in ein Sandbett verlegt, um Schäden zu vermeiden. Dafür wird der Rohrgrabenbereich von der Grabensohle bis 30 cm über den Rohrscheitel mit geeignetem verdichtungsfähigem steinfreiem Material nach DVGW 440-2 verfüllt. Die Rohrgrabenbreite beträgt in der Regel 30 bis 60 cm (Mutschmann/Stimmelmayer 2007; Merkl 2008). Für die Ermittlung der Sandbettung wurde für jede durchschnittliche Rohrgröße jeweils das Volumen Sand für 1m Länge Rohrnetz abgeschätzt und auf das Gesamtnetz hochgerechnet:

³⁴ Absperrarmaturen sind für den Einsatz in den Schaltstellungen „geschlossen“ oder „vollständig offen“ bestimmt, wohingegen mit Regelarmaturen der Durchfluss geregelt werden kann.

³⁵ Weitere Materialfraktionen werden aufgrund ihrer geringen Massenanteile und mangelnder Daten vernachlässigt

Tab. 65: Materialbestand Sandbettung im Leitungsnetz

DN	Länge (km)	V					Menge (kg/m)	Gesamt (1.000t)
		d	b	h	r	(m ³)		
DN 100	250.000	0,1	0,5	0,5	0,1	0,24	484	121.073
DN 150	150.000	0,15	0,55	0,55	0,1	0,28	570	85.449
DN 200	50.000	0,2	0,6	0,6	0,1	0,33	657	32.858
DN 400	40.000	0,4	0,8	0,8	0,2	0,51	1.029	41.147
DN 800	10.000	0,8	1,5	1,2	0,4	1,30	2.595	25.947
Gesamt	500.000							306.474

Quelle: Eigene Berechnungen; d= Rohrdurchmesser, b= Breite Rohrgraben, h= Höhe Sandbettung, r= Radius Rohr

Insgesamt ergibt sich damit ein Materialbestand im gesamtdeutschen Leitungsnetz wie folgt:

Tab. 66: Materialbestand Leitungsnetz in Deutschland

Nennweite	DN 100	DN 150	DN 200	DN 400	DN 800	Gesamt
Leitungsnetzlänge (km)	250.000	150.000	50.000	40.000	10.000	500.000
Material (1.000t)						
Grauguss GG	1.326	930	435	876		3.567
Duktiles Gusseisen GGG	1.193	1.047	490	985	710	4.568
Zink-Überzug	3	2	1	2	1	9
Stahl St	0	222	146	404	863	1.635
PE-Umhüllung	0	8	5	13	24	50
Zementmörtel	96	132	75	172	213	688
PE-HD	54	78	27	84	0	243
PVC-U	233	167	55	174	0	630
Faserzement FZ	0	275	286	545	0	1.106
Spannbeton SB	0	0	0	0	653	653
Sand	121.073	85.449	32.858	41.147	25.947	306.474
Gesamt	123.978	88.311	34.378	44.401	28.410	319.622

Quelle: Eigene Berechnungen auf der Grundlage von Klinger (2007), KRV (2002), DVGW (2002), Mutschmann/Stimmelmayer (2007), Hillenbrand (2009), diverse Herstellerangaben inkl. Armaturen und Sandbettung, 50 % der Leitungen aus Grauguss und Stahl mit innerer und äußerer Beschichtung

Das Wasserversorgungsnetz bindet somit im eigentlichen Rohrnetz nur eine vergleichsweise kleine Menge an Ressourcen. Jedoch ist durch die Rohrbettung in Sand der Materialbestand mit über 300 Millionen Tonnen im Vergleich zu den anderen Wasser-Infrastruktursystemen überdurchschnittlich hoch. Interessant ist darüber hinaus der im Vergleich zu anderen Infrastruktursystemen hohe Anteil an Metallen im Leitungsnetz.

Neubau / Rückbau

Mit einem Anschlussgrad von 99,1 % der Bevölkerung an die öffentliche Trinkwasserversorgung (ATT et al. 2008) ist eine Erweiterung und somit der Neubau von Trinkwasserleitungen nur noch in begrenzten Maßen zu erwarten.

Aufgrund fehlender Daten muss die jährliche Zunahme der Länge des Leitungsnetzes geschätzt werden. Mit einer Erweiterungsrate von 0,5 % (= 2.500 km) liegt die Erweiterung des Leitungsnetzes unter der der Kanalisation mit ihrem geringeren Anschlussgrad. Da hauptsächlich neue Leitungen zur Erschließung von Wohngebieten gelegt werden, wird eine angepasste (kleiner dimensionierte) Größenverteilung angenommen. Des Weiteren werden aktuelle Trends der Materialwahl berücksichtigt; dabei wird insbesondere der verstärkten Nutzung von Kunststoff Rechnung getragen³⁶ (Buchert et al. 2004; KRV 2002; Frank et al. 2006). Unter Anwendung der spezifischen Rohrgewichte nach Herstellerangaben (wie im Bestand) ergibt sich folgende jährliche durchschnittliche Zunahme im Materialbestand:

Tab. 67: Jährlicher Materialbedarf im Leitungsnetz durch Neubau

Nennweite	DN100	DN150	DN200	DN400	Gesamt
Länge Anteil	70 %	20 %	8 %	2 %	
Länge (km)	1.750	500	200	50	2.500
Material (1.000t)					
Gusseisen GGG	8	3	2	0	13
Zink	0	0	0	0	0
Stahl St	1	1	2	3	6
PE-Umhüllung	0	0	0	0	0
Zementmörtel	2	1	1	1	5
PE-HD	3	1	1	0	5
Sand	848	285	131	51	1.315
Gesamt	861	292	137	55	1.344

Quelle: Eigene Berechnungen auf der Grundlage von KRV (2002), Herstellerangaben, Stein (2004), Hiltenbrand (2009)
inkl. Armaturen; 2 % Materialaufschlag für Überlappungen; 100 % innere und äußere Beschichtung auf Eisen- und Stahlrohre

Die jährliche Zunahme des Leitungsnetzes durch Erweiterung wird fast ausschließlich durch die Neuverlegung der Rohrbettung bestimmt. Daneben werden noch jährlich kleinere Mengen (ca. 13.000 Tonnen) Gusseisen verbaut.

³⁶ Nach Buchert et al. 2004 liegt der Kunststoffanteil beim Bau neuer Wasserleitungen derzeit bei etwa 30 %.

Jährliche Materialflüsse durch Erneuerung und Instandhaltung

Trinkwasser- und Abwassernetze haben eine Lebensdauer von bis zu 100 Jahren. Daher sind die kontinuierliche Instandhaltung und Erneuerung der Netze eine Daueraufgabe. Bei der Rohrreparatur unterscheidet man grundsätzlich zwischen der Erneuerung (Austausch) der Rohrleitung und der Sanierung einer bestehenden Rohrleitung. Bei der Sanierung wiederum unterscheidet man zwischen Zementmörtelauskleidung und Reliningverfahren. Aufgrund der schlechten Datenlage und vernachlässigbarer Mengen werden letztere Verfahren im Folgenden nicht berücksichtigt.

Netzerneuerungsraten müssen vor dem Hintergrund der jeweiligen individuellen Voraussetzungen wie Rohrnetzmaterial, Netzalter, Schadensraten, Leckagen bewertet werden. Ergebnisse aus einzelnen Trinkwasser-Benchmarkingprojekten zeigen Netzerneuerungsraten differenziert nach Unternehmensgröße von 0,40 bis 0,98 % (Hessen) und 0,43 bis 1,28 % (Bayern). Insgesamt werden jährlich über 2 Mrd. € im Bereich der Trinkwasserversorgung investiert, davon der Großteil in die Netze (ATT et al. 2008, 50). In Anlehnung an Tietz (2006: 241) wird eine durchschnittliche tatsächliche Netzerneuerungsrate von 0,91 % angenommen (= 4.500 km Erneuerung jährlich)³⁷. Dabei wird die Materialverteilung im Neubau auf die Größenverteilung im Bestand angewendet.

Damit ergibt sich eine jährliche durchschnittliche Zunahme durch Netzerneuerung von knapp 100.000 Tonnen (Tab. 68). Der vergleichsweise hohe Materialaufwand für die Erneuerung (ohne Rohrbettung) ergibt sich daraus, dass diese gleichmäßig über alle Dimensionen erfolgt, wohingegen der Neubau vorwiegend in kleineren (leichteren) Dimensionen erfolgt.

Tab. 68: Jährlicher Materialinput Leitungsnetz durch Netzerneuerung

Nennweite	DN100	DN150	DN200	DN400	DN800	Gesamt
Länge (km)	1800	1575	675	360	90	4.500
Material (1.000t)						
Gusseisen GGG	8	10	6	0	0	24
Zink	0	0	0	0	0	0
Stahl St	1	4	7	18	13	42
PE-Umhüllung	0	0	0	1	1	3
Zementmörtel	2	3	4	8	5	22
PE-HD	3	5	2	0	0	9
Gesamt	13	22	19	27	18	99

Quelle: Eigene Berechnungen

Materialverteilung wie Neubau, Größenverteilung wie Bestand

2 % Materialaufschlag für Überlappungen; 100 % innere und äußere Beschichtung auf Eisen- und Stahlrohre

³⁷ Der Erneuerungsbedarf liegt dagegen bei ca. 2 % und variiert in Abhängigkeit vom Rohrmaterial (Rocher 2000). Damit ergäbe sich ein jährlicher Materialinput durch Netzerneuerung von rund 220.000 Tonnen.

Analog ergibt sich ein Materialabgang von knapp 130.000 Tonnen jährlich durch die Leitungserneuerung (Tab. 69).

Tab. 69: Jährlicher Materialoutput Leitungsnetz durch Netzerneuerung

Nennweite	DN 100	DN 150	DN 200	DN 400	DN 800	Gesamt
Leitungsnetzlänge (km)	1.800	1.575	675	360	90	4.500
Material (1.000t)						
Grauguss GG	13	10	6	8		37
Duktiles Gusseisen GGG	10	11	7	9	6	43
Zink-Überzug	0	0	0	0	0	0
Stahl St	0	2	2	4	8	16
PE-Umhüllung	0	0	0	0	0	0
Zementmörtel	1	1	1	2	2	7
PE-HD	0	1	0	1	0	2
PVC-U	1	2	1	2	0	5
Faserzement FZ	0	3	4	5	0	12
Spannbeton SB	0	0	0	0	6	6
Gesamt	26	30	21	29	22	128

Quelle: Eigene Berechnungen

Material- und Größenverteilung wie im Bestand, 2 % Materialaufschlag für Überlappungen; 50 % innere und äußere Beschichtung auf Eisen- und Stahlrohre

4.1.6 Trinkwasserspeicher

Bei nahezu jeder Wasserversorgungs-Anlage ist eine Komponente zur Speicherung von Wasser erforderlich. Hierfür werden im Durchschnitt ca. 5-10 % der Gesamtkosten investiert, in Abhängigkeit von der Größe der Wasserversorgungs-Anlage (Mutschmann/Stimmelmayr 2007: 375). Man unterscheidet Hochbehälter, Wassertürme und Tiefbehälter, an die Pumpstationen angeschlossen sind. Sie werden meist als ganz oder teilweise unterirdische oder oberirdische Bauten konzipiert (DVGW 2005).

Der „typische“ Trinkwasserspeicher besteht aus zwei oder mehr Kammern, die zusammen das notwendige Behältervolumen ergeben. Dabei werden mehrere Behälterformen nach ihrem Grundriss (rechteckig, kreisförmig, vieleckig) unterschieden. Steuerung und Kontrolle des Speichers erfolgt durch ein direkt angegliedertes Bedienungshaus. Je nach Bauverfahren wird unterschieden in (i) Ortbetonbehälter, (ii) Fertigteilbehälter und (iii) Fertigbehälter. Die Standardausrüstung umfasst mindestens zwei baugleiche Wasserkammern (rund oder rechteckig) und ein Bedienungshaus³⁸. Pro Wasserkammer gibt es einen Zulauf, eine Entnahme, einen Überlauf sowie die Entleerung mit den notwendigen Armaturen, ggf. ergänzt um Durchflussmesser und Wasserstandsmesseinrichtungen (DVGW 2005).

³⁸ Bei Kleinbehältern unter 100 m³ als Bedienungsschacht

Ermittelter Gesamtmaterialbestand

Die Datenlage im Bereich Trinkwasserspeicher ist in Deutschland relativ schlecht. Die vorliegenden Berechnungen basieren größtenteils auf Ergebnissen aus Benchmarking-Projekten in Bayern (LfU Bayern 2009b), welche angepasst wurden. Auf gesamtdeutscher Ebene gibt es lediglich Angaben zur Gesamtanzahl und –speichermenge, datierend von 1996 (BEW 1996, tel. Aussage Hr. Herkner / BDEW).

Insgesamt gibt es in Deutschland etwa 10.000 Wasserspeicher mit einem Gesamtvolumen von insgesamt 17.000.000 m³ (LfU Bayern 2009³⁹; Wilderer / Merkl 2001). In Bayern alleine werden laut Bayerischem Landesamt für Umwelt mehr als 2.400 Wasserspeicher (inklusive Wassertürme) mit einem Gesamtvolumen von über 2,5 Mio. m³ für die Trinkwasserversorgung genutzt. Dort dominieren klar die erdüberdeckten und teilweise eingeebneten Wasserspeicher (82 + 15 %). Freistehende Behälter und Wassertürme sind von untergeordneter Bedeutung (1 bzw. 2 %). 60 % der Wasserkammern der bayerischen Trinkwasserspeicher haben ein Volumen von bis zu 500 m³ und sind somit sehr klein. Die Gesamt-Zahl an Wassertürmen ist nicht bekannt, jedoch ist sie sehr gering (in Bayern nach Angaben des Landesamtes für Umwelt lediglich 2 %, Schulze (1998) geht von 6 % Wassertürmen aus). Darüber hinaus werden bei Neubau vorwiegend Hochbehälter gebaut, so dass der Anteil der Wassertürme weiter sinkt. Entsprechend basiert unsere Hochrechnung auf deutschlandweit 98 % ebenerdigen Wasserspeichern (Hoch- oder Tiefbehälter). Wassertürme werden nicht betrachtet.

Wasserbehälter werden fast ausschließlich aus Stahlbeton in Ortbeton gebaut (Mutschmann/Stimmelmayer 2007). Runde Behälter werden aufgrund ihrer Statik auch häufig aus Spannbeton gebaut. Auch Stahl, glasfaserverstärkter Kunststoff (GFK) oder anderes geeignetes Material darf verwendet werden (Merkl 2004). Auf Grundlage der bayerischen Daten basieren unsere Berechnungen auf einer Materialverteilung von 96 % Beton und 4 % Edelstahl. Die Zementinnenbekleidung in Betonbehältern wird für den Bestand vernachlässigt. Darüber hinaus wird unterstellt, dass Edelstahlbehälter lediglich bis zu einem Speichervolumen von 1.000 m³ Verwendung finden.

Da auf Bayern 25 % der gesamtdeutschen Wasserspeicher, jedoch nur 15 % der gesamten gespeicherten Wassermenge (2,5 von 17 Millionen m³) entfallen, muss bzgl. der Größenverteilung für Gesamtdeutschland von einer Verschiebung zugunsten größerer Behältergrößen ausgegangen werden (Tab. 70).

Tab. 70: Größenverteilung Wasserspeicher in Deutschland (geschätzt)

Größe der Wasserspeicher in m ³	Bayern	Deutschland	Anzahl	Durchschnittsgröße
0-500	33 %	30 %	2.940	250
>500-1.000	27 %	24 %	2.352	750
>1.000-4.000	31 %	28 %	2.744	2.500
>4.000-10.000	6 %	13 %	1.274	7.000
> 10.000	3 %	5 %	490	20.000
	100 %	100 %		

Quelle: Eigene Berechnungen auf der Grundlage von LfU Bayern (2009b)

Über Massenbeispiele lassen sich spezifische Beton- und Stahlmassen je m³ Speichervolumen ermitteln. Mit zunehmender Speichergöße nehmen bei Betonbehältern die verbauten Betonmengen potenziell ab. Für Stahl wird für alle Größen ein Materialeinsatz von 0,06 t/m³ geschätzt. Vereinfachend wird unterstellt, dass der Materialeinsatz unabhängig von der Behälterform (rund oder eckig) ist. Edelstahlspeicher werden auf der Grundlage von Massenbeispielen auf ein Gewicht von 14 Tonnen Edelstahl für 500 m³ Wasserspeicher geschätzt. Die Bedienungshäuser werden hier unterschlagen, da sie sich in der Ausführung sehr unterscheiden (teilweise Holzbauweise).

Die ermittelten spezifischen Massen wurden für die verschiedenen Größenklassen hochgerechnet:

Tab. 71: Materialbestand Wasserspeicher in Deutschland

Größenklasse	m ³	0-500	>500 - 1.000	> 1.000 - 4.000	> 4.000 - 10.000	> 10.000	Gesamt
durchschn. Volumen	m ³	250	750	2.500	7.000	20.000	
Anzahl		2.940	2.352	2.744	1.274	490	9.800
Beton / Speicherraum	m ³ /m ³	0,75	0,58	0,44	0,35	0,27	
Beton	1.000 t	1.097	2.362	6.968	7.154	6.180	23.761
Stahl	1.000 t	44	106	412	535	588	1.685
Edelstahl	1.000 t	5					5
Gesamt	1.000 t	1.147	2.467	7.380	7.689	6.768	25.451

Quelle und Anmerkungen: Eigene Berechnungen auf der Grundlage von LfU Bayern (2009b) und Herstellerangaben; Stahl nicht spezifiziert

Insgesamt ergibt sich somit ein Materialbestand für Wasserspeicher in Deutschland von rund 25 Millionen Tonnen – zum überwiegenden Teil Beton. Der Stahl setzt sich zusammen aus Betonstahl und Edelstahl für die Armaturen. Hier fehlen jedoch für eine differenzierte Betrachtung Beispieldaten. Desgleichen werden an Tiefbehälter angeschlossene Pumpstationen aus der Betrachtung ausgeklammert, da Tiefbehälter nur in Ausnahmefällen gebaut werden und aussagekräftige Daten fehlen.

Ermittlung der jährlichen Materialflüsse

Neubau / Rückbau

Im Neubau-Bereich dominieren kleine Speicher im ländlichen Raum. Diese sind häufig aus neuen Materialien (GFK, Edelstahl, PE) gefertigt. Dabei spielt auch die zunehmende Bedeutung von Löschwasserspeichern vor allem in kleineren Gemeinden eine Rolle (Hahmann/Becher 2008, tel. Auskunft Ingenieurbüro Osterhammel). Aufgrund fehlender Daten beruhen die Berechnungen auf folgenden Annahmen:

- Die Neubaurate wird auf 0,5 % geschätzt⁴⁰.
- Die Größenverteilung wird angepasst (vorwiegend kleinere Wasserspeicher).
- Die Materialverteilung wird angepasst: 50 % der Wasserspeicher bis 500 m³ sind aus Edelstahl, 30 % der Wasserspeicher bis 500 m³ sind aus GFK gefertigt.
- Die Massenbeispiele für Edelstahl und GFK beruhen auf Herstellerangaben: 500 m³ Edelstahltank à 14 Tonnen; 250 m³ GFK-Tank à 8 Tonnen.
- Beton- und Stahlkoeffizienten werden aus der Bestandsrechnung übernommen: Stahl 0,06 t/m³ Speicherraum, Betonanteil sinkt mit zunehmender Größe.

Tab. 72: Jährlicher Materialbedarf Trinkwasserspeicher durch Neubau

Größenklasse	m ³	>500 - 0-500	> 1.000 - 1.000	> 1.000 - 4.000	> 4.000 - 10.000	> 10.000	Gesamt
durchschn. Speichervolumen	m ³	250	750	2.500	7.000	20.000	
Größenverteilung		50 %	20 %	20 %	8 %	2 %	
Anzahl		25	10	10	4	1	50
Beton / Speicherraum	m ³ /m ³	0,75	0,58	0,44	0,35	0,27	
Beton	1.000 t	2,2	10	25,4	22,5	12,6	72,7
Stahl	1.000 t	0,4	0,5	1,5	1,7	1,2	5,2
Edelstahl	1.000 t	0,2					0,2
Kunststoff (GFK)	1.000 t	0,06					0,06
Gesamt	1.000 t	2,8	10,5	26,9	24,1	13,8	78,1

Quelle: Eigene Berechnungen

Sanierung

Grundsätzlich besteht für Wasserspeicher ein hoher Pflege- und Reinigungsaufwand, insbesondere auf den benetzten Flächen. Es gibt verschiedene Möglichkeiten zur Sanierung der Behälter, um die Dichtheit und Oberflächenstruktur der Wasserkammern (Wände und Sohle) wiederherzustellen: beschichten, verputzen, auskleiden. In den

⁴⁰ Die Neubaurate ist in Anlehnung an die Erweiterung des Versorgungsnetzes geschätzt und somit nicht durch Quellen gestützt.

meisten Fällen wird eine Zementmörtelbeschichtung auf die Flächen der Wasserkammer aufgetragen. Ein Ersatzneubau wird selten vorgenommen. Folgende Annahmen werden getroffen:

- Die Sanierung von Wasserspeichern (Beton) erfolgt durch das Auftragen einer Zementmörtelbeschichtung.
- Basierend auf der durchschnittlichen Lebensdauer von Betonbauwerken von 30 bis 40 Jahren (tel. Auskunft Herr Roth / Ingenieurbüro Osterhammel) wird eine jährliche Sanierungsrate von 2,5 % zugrunde gelegt.
- Auf der Grundlage von Sanierungsbeispielen wird geschätzt, dass die zu sanierende Fläche jeweils der Hälfte des Speichervolumen-Wertes entspricht.
- Es wird eine Mindestschichtdicke von 10 mm empfohlen (Gerdes/Wittmann 2003). In der Praxis sind Beschichtungen häufig dicker (z.B. Firma Vandex). Den Berechnungen hier liegt eine Beschichtungsdicke von 15 mm zugrunde. Damit ergibt sich eine Masse von 30 kg Zementmörtel / m².

Tab. 73: Jährliche Materialzunahme Trinkwasserspeicher durch Sanierung

Größenklasse	m ³	0-500	>500 - 1.000	> 1.000 - 4.000	> 4.000 - 10.000	> 10.000	Gesamt
durchschn. Speichervolumen	m ³	250	750	2.500	7.000	20.000	
Anzahl		64	59	69	32	12	235
Zementmörtel	1.000 t	0,2	0,7	2,6	3,3	3,7	10,5

Quelle: Eigene Berechnungen

Auf Grundlage der getroffenen Annahmen ergibt sich somit für Trinkwasserspeicher ein recht geringer jährlicher Input von insgesamt knapp 90.000 Tonnen, unterschieden in Neubau (knapp 80.000 Tonnen, s. Tab. 72) und Sanierung (Zementmörtelbeschichtung, rund 10.000 Tonnen jährlich, s. Tab. 73). Der Neubau von kleinen Trinkwasserspeichern neuer Materialien (Edelstahl, GFK) fällt dabei so gut wie gar nicht ins Gewicht: Nach wie vor dominieren mineralische Baustoffe in dem Bereich.

4.1.7 Pumpwerke

Kann Wasser nicht mit natürlichem Gefälle der Verwendungsstelle zufließen, so muss es mittels „Wasserförderanlagen“ so weiter transportiert werden, dass es im gesamten Versorgungsgebiet mit ausreichendem Druck und in ausreichender Menge zur Verfügung steht. Man unterscheidet Hauptpumpwerke, Zwischenpumpwerke und Druckerhöhungsanlagen (Mutschmann/Stimmelmayer 2007). Pumpwerke bestehen in der Regel aus mehreren Räumen mit mehreren Pumpen, den dazugehörigen Antrieben und allen zum Betrieb erforderlichen Nebeneinrichtungen (hydraulische Einrichtungen, Energieversorgung etc.).

Der Regelfall in der Trinkwasserversorgung sind Kreiselpumpen, welche nach dem Fliehkraftprinzip arbeiten (Merkl 2008). In Pumpwerken sind Kreiselpumpen mit liegender Welle üblich, in gleicher Flucht aufgestellt mit dem angekuppelten Elektromotor. Kreiselpumpen werden kostengünstig und serienmäßig erstellt. Die Bauarten von Kreiselpumpen werden nach Stufenzahl, Wellenlage und Zahl der Laufradströme (ein- oder zweiflutig) unterschieden (Mutschmann/Stimmelmayer 2007). Neben den Elektromotoren werden meist noch Dieselmotoren als Notstromaggregate in Pumpwerken vorgehalten, um bei Netzstromausfall den geregelten Pumpenbetrieb aufrechtzuerhalten. Des Weiteren gibt es in Pumpwerken zur Energieverteilung Schaltgeräte, Leitungen und Transformatoren (Mutschmann/Stimmelmayer 2007) sowie umfangreiche Mess- und Anzeigeinstrumente.

Aufgrund der Heterogenität und der nicht ausreichenden Datenbasis (über die Gesamtzahl an Pumpwerken in Deutschland liegen keine Angaben vor) haben wir von einer weiteren Bearbeitung der Pumpwerke im Rahmen der vorliegenden Studie abgesehen.

4.2 Materialbestände und –flüsse der Infrastrukturen der Abwasserentsorgung

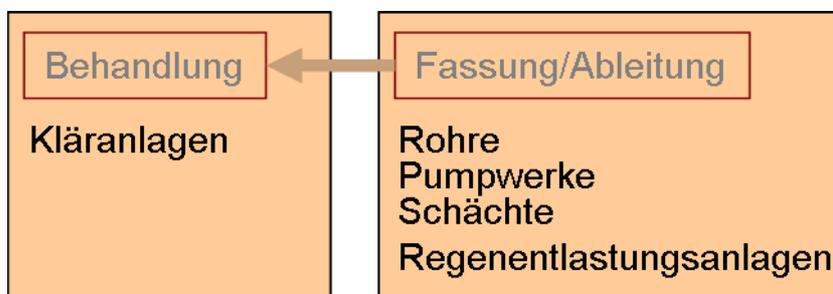
Die öffentliche Abwasserentsorgung in Deutschland ist eine hoheitliche Pflichtaufgabe, von Gemeinden und Städten in kommunaler Trägerschaft wahrgenommen. Die Durchführung der Abwasserentsorgung kann durch den Träger der Abwasserentsorgungsaufgabe selbst gewährleistet oder auf Dritte übertragen werden. Mit mehr als 6.900 vorwiegend öffentlich-rechtlichen Abwasserbeseitigungsbetrieben (Destatis 2009) ist die Abwasserwirtschaft in Deutschland sehr kleinteilig organisiert.

Mitte des 19. Jahrhunderts begann Deutschland mit der Einführung einer geordneten Wasserversorgung und Abwasserentsorgung in größeren Städten, motiviert durch katastrophale hygienische Bedingungen. Mittlerweile ist die kommunale Abwasserentsorgung Deutschlands im europäischen Vergleich führend (BMU 2006). 1991 waren 90 % der Bevölkerung, im Jahr 2007 96 % direkt an die öffentliche Kanalisation angeschlossen (Destatis 2009). Der Anschlussgrad an öffentliche Abwassersysteme hat damit die Grenze des ökonomisch Sinnvollen erreicht (BMU 2006). Der nicht angeschlossene Teil der Bevölkerung lebt überwiegend in geografisch abgelegenen Gebieten und entsorgt sein Abwasser über dezentrale (Klein-)Anlagen oder Fäkalienabfuhr.

Die Abwassernetze in den städtischen Regionen bedürfen mittlerweile großer Sanierungs- und Instandhaltungsmaßnahmen. Darüber hinaus führen geänderte Rahmenbedingungen (demographischer Wandel, Klimawandel) zu modifizierten Anforderungen an die Netze und Kläranlagen, welche sich diesen anpassen müssen.

Zur Sicherstellung einer flächendeckenden Abwasserentsorgung ist eine aufwändige Infrastruktur mit hohen Erschließungskosten erforderlich. Vielfältige technische Anlagen zur Abwassersammlung, -ableitung und -behandlung sind notwendig. Den einzelnen Prozessschritten in der Wasserversorgung lassen sich folgende Anlagen zuordnen:

Abb. 6: Anlagen der Wasserentsorgung



Quelle: Eigene Darstellung

Nach einer kurzen Einführung in den jeweiligen Infrastrukturtyp werden die jeweiligen Materialbestände und –flüsse detailliert hergeleitet.

4.2.1 Kanalisation

Die Abwassersammlung und der Transport erfolgen im Kanalnetz. Darunter fallen sämtliche Anlagen zur Sammlung und Ableitung von Niederschlagswasser und Abwasser, d.h. Kanäle, Abwasserdruckleitungen und zugehörige Bauwerke⁴¹ in einem Entwässerungsgebiet (öffentlicher Zuständigkeitsbereich) nach DIN 4045. Die Anschlusskanäle, d.h. die Kanäle zwischen dem öffentlichen Abwasserkanal und der Grundstücksgrenze bzw. der ersten Reinigungsöffnung auf dem Grundstück, gehören gemäß dem Deutschen Normenwerk ebenfalls zum öffentlichen Zuständigkeitsbereich der Kanalisation. Jedoch werden diese bspw. vom Statistischen Bundesamt nicht mit erfasst (Destatis 2009, Tabelle 7) und sind nicht Gegenstand der weiteren Berechnungen. Des Weiteren werden Abwasserdruckleitungen, welche einen geringen Anteil am Kanalnetz haben (3,8 % in NRW nach Harting 2006), vernachlässigt.

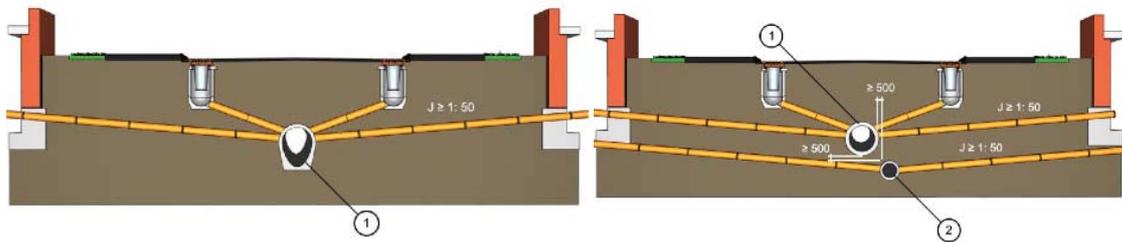
Neben dem o.g. Kanalnetz (Entwässerungsnetz) besteht die Gesamtkanalisation noch aus der Grundstücksentwässerung. Grundstücksentwässerungsleitungen liegen im privaten Zuständigkeitsbereich, der sich in Abhängigkeit von der jeweils gültigen Abwasserbeseitigungssatzung der Kommune bis zur Einbindung in den Abwasserkanal erstrecken kann. Auch Liegenschaften des Bundes u.a. Gebietskörperschaften sind Teil der Grundstücksentwässerung und somit nicht Gegenstand der vorliegenden Betrachtung (Stein 2004).

Abwasserkanäle nach DIN 4045 sind offene oder geschlossene Gerinne, in denen Abwasser i.d.R mit freiem Gefälle abgeleitet wird. Anschlusskanäle münden in Straßenkanäle, welche zu Neben- und Hauptsammlern zusammengeführt werden. Die Hauptsammler leiten die Abwässer einer Kläranlage zu (Tietz 2006).

Man unterscheidet Mischkanalisation (Schmutzwasser und Niederschlagswasser werden gemeinsam abgeführt) und Trennkanalisation (Schmutzwasser und Niederschlagswasser werden in zwei getrennten Kanälen abgeführt) (Abb. 7).

⁴¹ Schächte und Regenentlastungsanlagen sind gesondert ausgewiesen.

Abb. 7: Misch- und Trennkanalisation



1: Mischkanal

1: Regenkanal, 2: Schmutzwasserkanal

Quelle: Stein (2004)

Durch die erheblichen Schwankungen des Regenwasserabflusses (welcher mehr als das 100-fache des Schmutzwasserabflusses betragen kann) sind die Kanäle in Mischsystemen häufig sehr groß dimensioniert. Schmutzwasserkanäle sind dagegen selten größer als DN500 (= 50 cm Durchmesser) (Stein 2004). Beim Neubau von Anlagen gibt es allerdings einen Trend zur Trennkanalisation sowie zur dezentralen Regenwasserversickerung, z.B. über Mulden-Systeme.

Darüber hinaus werden Kanäle unterschieden nach Freispiegel-, Druck- und Unterdruckleitungen. In ersteren liegt der Wasserstand im Rohr unter dem Rohrscheitel und die Kanäle sind nur in Ausnahmefällen komplett mit Abwässern gefüllt, bspw. bei starken Regenereignissen in der Misch- oder Regenwasserkanalisation (Tietz 2006). Der Abfluss erfolgt durch Schwerkraft.

Kanalgrößen

Abwasserkanäle haben im Vergleich zu Trinkwasserleitungen große Querschnitte. Hauptabwassersammler in Ballungsräumen können begeh- und tlw. sogar mit Booten befahrbar sein. Mindestnennweiten sollen die Abführung auch gröberer und sperriger Stoffe sowie ggf. die Begehbarkeit gewährleisten. Heute gelten für Schmutzwasserkanäle Mindestweiten von DN200, für Regen- und Mischwasserkanäle jeweils DN250, es werden jedoch größere Mindestnennweiten ausdrücklich empfohlen (DN250, bzw. DN300) (Stein 2004). Die Hauptsammler, durch die das Abwasser zu den Kläranlagen geleitet wird, können auch Größen bis zu DN4000 (4 m) oder in Ausnahmefällen mehr besitzen.

In der Vergangenheit kamen Kanäle mit unterschiedlichsten Querschnittsformen und -abmessungen in Abhängigkeit vom Werkstoff, Hydraulik etc zum Einsatz und werden entsprechend teilweise noch heute verwendet. Die wichtigsten Querschnittsformen (Kanalprofile) sind der Kreis-, der normale Ei- und der normale Maulquerschnitt, genormt nach DIN 4263. Rechteckquerschnitte finden nur in Sonderfällen Verwendung. Eine Reihe weiterer Querschnittsformen werden heute noch in Einzelfällen eingesetzt (vgl. Stein 2004).

Verwendete Materialien

Ältere Kanäle bestehen meist aus Ziegeln oder Ton- bzw. Steinzeug⁴². Begehbare Kanäle wurden früher meist aus hartgebrannten Ziegeln (Backsteine, Kanalklinker) aufgemauert und seit Beginn des 20. Jahrhunderts aus Kosten- und Arbeitszeitgründen in Ortbeton hergestellt. Heute besteht der überwiegende Teil der Kanalisationen aus vorgefertigten Rohren unterschiedlicher Werkstoffe. Vorherrschend sind Beton und Stahlbeton oder Steinzeug. In jüngerer Zeit werden – je nach Größe und Belastung - Kunststoffrohre sowie Rohre aus duktilem Gusseisen, Stahl, Faserzement und Polymerbetonrohre verwendet (Stein 2004). Daten zur Materialverteilung nach Kanalnetzlänge in bestehenden Netzen und bei Neubauten sind vorhanden (Stein 2004; Berger/Lohaus 2005; Frank et al. 2006).

- *Kanalklinker*: Eiquerschnitt, häufig ältere, große Abwassersammler.
- *Steinzeug*: Ältester Kanalwerkstoff, Kreisquerschnitt, meist kleinere Nennweiten (meist DN100 bis DN600), jedoch erhältlich von DN100 bis DN1200, auch als Vortriebsrohre (für geschlossene Bauweise) erhältlich; teurer, aber längere Lebensdauer und widersteht sicher chemischen und mechanischen Anfressungen.
- *Kunststoffe*: Man unterscheidet zwischen Vollwandrohren und Systemen mit profilierter Wandung aus den Kunststoffen PVC-U, PE-HD, PVC, PE oder PP. Systeme mit profilierter Wandung können aufgrund der Profilverstärkung mit geringerer Wanddicke hergestellt werden, wodurch sich bei gleicher Rohrsteifigkeit eine wesentliche Gewichtseinsparung ergibt (Stein 2004). Tw. Einarbeiten von Glasfasern oder Stahldrähten; Kreisquerschnitt.
- *Stahl*: Spielt als Werkstoff für Freispiegelleitungen keine wesentliche Rolle, nur bei besonderen Anforderungen (vgl. Stein 2004). Innen wird der Stahl mit einem Korrosionsschutz in Form einer Plastomerbeschichtung versehen.
- *Gusseisen*: Seit 1956 werden in Deutschland Rohre aus duktilem Gusseisen⁴³ hergestellt. Ein äußerer und innerer Korrosionsschutz ist notwendig. Einsatz für Freispiegelleitungen und bevorzugt Druckleitungen sowie in (hydro-)geologisch schwierigem Gelände. Nennweiten von DN100 bis DN1400, auch in geschlossener Bauweise (DN250 bis DN400).
- *Beton*: Großtechnischer Einsatz von Betonrohren in der Kanalisation in Deutschland seit den 1880er Jahren, alle Querschnittsformen und –maße möglich, Sonderformen, teilweise integrierter Korrosionsschutz (Steinzeug, Kunststoff), teilweise Ausführung in Ortbeton (gebräuchlich bei DN>800).

⁴² Steinzeug ist die Bezeichnung für Tonrohre, die durch Brennen bei einer Temperatur von 1.200-1.300°C (je nach Zusammensetzung und Masse) verglast (Tietz 2006: 258).

⁴³ Duktiler Gusseisen enthält im Gegensatz zu Grauguss Kugelgraphit. Die Graphitform prägt im Wesentlichen die mechanischen Eigenschaften. Im Falle von duktilem Gusseisen sind dies eine hohe Zugfestigkeit und Verformbarkeit, sowie die Möglichkeit, geschweißt zu werden (Stein 2004).

- *Stahlbeton*: Einsatz seit den 1880er Jahren, geringeres Gewicht durch relativ geringe Wanddicke, daher bereits frühe Verwendung in großen Nennweiten (bis DN2500), besondere Eignung für hohe Belastungen sowie dynamische Beanspruchung infolge Verkehrsschwankungen und geringer Scheitelüberdeckung.
- *Spannbeton*: Vorwiegend Kreisquerschnitt, Nennweiten DN500 bis DN4000 und größer, Baulängen bis 8m.

Umfrageergebnisse lassen für die nächsten 5 Jahre klare Trends bezüglich der Materialwahl erkennen: Demnach werden die Anteile von Beton und Steinzeug als weitgehend stabil eingeschätzt, wohingegen für Mauerwerk, Stahl und Guss überwiegend sinkende Anteile erwartet werden. Steigende Anteile können nach Einschätzung der Befragten vor allem Kunststoffe als Werkstoff im Abwasserbereich verzeichnen, was insbesondere von PE getragen wird (Frank et al. 2006).

Material nach Rohrgröße

Rohrwerkstoffe werden in starker Anhängigkeit vom Rohrdurchmesser eingesetzt. Wichtig sind bei der Auswahl der Werkstoffe insbesondere eine hohe Lebensdauer, Korrosionsbeständigkeit sowie Beständigkeit gegen Hochdruck-Reinigung (IKT 2006; Frank et al. 2006). Kleine und mittelgroße Leitungen werden aus Beton- oder Steinzeugrohren zusammengesetzt (Imhoff/Imhoff 2007). Bei Abwassertransportleitungen größer DN800 kommen vorwiegend Beton oder Stahlbetonrohre zum Einsatz, früher Kanalklinker (Tietz 2006).

Daten zur Werkstoffverteilung in Abhängigkeit vom Kanalquerschnitt sind von einzelnen Städten vorhanden (Stein 2004). Auf gesamtdeutscher Ebene liegen lediglich Daten zur Werkstoffverteilung differenziert in Nennweitenschritten von DN400 (Frank et al. 2006) sowie differenzierte Daten für den Neubau vor (Waniek 2008; Frank et al. 2006).

Rohreinbettung

Früher, und in Ausnahmefällen bis in die heutige Zeit, wurden Betonummantelungen (Teil- und Vollummantelung) um Abwasserkanäle großer Nennweiten vorgeschrieben, so dass ein starres Bauwerk im Baugrund errichtet wurde (Stein 2004). Alternativ werden Sand, Kies oder Beton als Rohraufleger in die Bettung verfüllt. Darüber hinaus wird der Rohrgraben in der Regel bis 30 cm über Scheitel mit Sand und feinem Kies verfüllt. Jedoch wird mittlerweile die offene Bauweise vermehrt aufgrund ökologischer Überlegungen von geschlossener Bauweise (Schildvortrieb, Rohrvortrieb) abgelöst.

Ermittelter Gesamtmaterialbestand

Das Kanalnetz in Deutschland ist vergleichsweise gut dokumentiert. Nach Angaben des Statistischen Bundesamtes beträgt die Gesamtlänge der öffentlichen Kanalisation (ohne Anschlusskanäle) in Deutschland 2007 540.723 km. Davon entfallen 239.086 km auf Mischwasserkanäle, 114.373 km auf Regenwasserkanäle und

187.264 km auf die kleiner dimensionierten (bis DN 500) Schmutzwasserkanäle (Destatis 2009, Tabelle 7).

Abwasserkanäle haben im Vergleich zu Trinkwasserleitungen größere Querschnitte mit empfohlenen Mindestnennweiten von DN250 für Schmutzwasserkanäle und DN300 für Misch- und Regenwasserkanäle (Stein 2004). Da es keine Daten zur gesamtdeutschen Größenverteilung der Kanalisation gibt, greifen wir auf die Arbeit von Reckerzügl (1997) zurück. Jeder Größenklasse wird eine durchschnittliche Nennweite in einer spezifischen Querschnittsform zugeordnet (Tab. 74).

Tab. 74: Größenverteilung und Querschnittsformen Kanalnetz (geschätzt)

Größenklasse	Anteil	Länge (km)	durchschnittliche Nennweite DN	Querschnittsformen
bis DN300	50 %	270.362	250	Kreisquerschnitt
> DN300 bis DN400	30 %	135.181	350	Kreisquerschnitt
> DN400 bis DN600	13 %	70.294	500	Kreisquerschnitt
> DN600 bis DN800	5 %	43.258	700	Beton 75% Kreis, 25% Ei, Mauerwerk 100% Ei
> DN800 bis DN1200	2 %	21.629	1000	Beton 50% Kreis, 50% Ei, Mauerwerk 100% Ei
Gesamt	100 %	540.723		

Quelle: Eigene Schätzungen auf der Grundlage von Reckerzügl (1997) und Stein (2004)

Die Materialverteilung des deutschen Kanalnetzes ist gut dokumentiert, bis hin zu Materialien nach Kanalgröße (Berger / Lohaus 2004; Frank et al. 2006). Beton und Steinzeug dominieren die Materialverteilung im deutschen Kanalnetz mit 46 % bzw. 40 %, gefolgt von Kunststoff (6 %, hauptsächlich PVC-Hart und PE-HD), Mauerwerk (3 %), Faserzement (2,5 %) und Guss bzw. Stahl (1,5 %) (Berger/Lohaus 2004). Letztere zwei Werkstoffe sind vom Bestand her vernachlässigbar und werden in den Berechnungen nicht berücksichtigt⁴⁴.

Rohrwerkstoffe werden in starker Abhängigkeit vom Rohrdurchmesser eingesetzt. Kleine Nennweiten bestehen größtenteils aus Steinzeug, Beton oder Kunststoff. Bei großen Durchmessern kommen vorwiegend Beton, früher Kanalklinker, zum Einsatz (Imhoff/Imhoff 2007; Stein 2004). Entsprechend wurden die Werkstoffe nach Nennweiten geschätzt:

⁴⁴ Da Kanäle aus Mauerwerk noch eine große Rolle in großen Nennweiten spielen, werden diese in die Berechnung einbezogen.

Tab. 75: Materialverteilung Kanalnetz nach Größe geschätzt

Nennweite	bis DN300	> DN300 bis DN400	> DN400 bis DN600	> DN600 bis DN800	> DN800	Gesamt- länge	Anteil Ge- samtnetz
Kanalnetzlänge (km)	270.362	135.181	70.294	43.258	21.629	540.723	
Material							
Beton	30 %	60 %	78 %	78 %	70 %	265.928	49,2 %
Steinzeug	60 %	36 %	20 %	5 %	5 %	228.185	42,2 %
Mauerwerk	0 %	0 %	0 %	15 %	24 %	11.680	2,2 %
Kunststoff	10 %	4 %	2 %	2 %	1 %	34.931	6,5 %
Gesamt	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	540.723	100,0 %

Quelle: Geschätzt auf Basis von Berger/Lohaus (2004), Frank et al. (2006)

Aus Herstellerangaben lassen sich die spezifischen Rohrgewichte der verschiedenen Materialien⁴⁵ und Rohrgrößen ermitteln. Der derzeitige Materialstock von insgesamt fast 150 Millionen Tonnen Baustoffen⁴⁶ (Tab. 76) ist entsprechend ein Resultat der über die vergangenen Jahrzehnte eingebauten Rohrmaterialien und Dimensionen.

Tab. 76: Materialbestand Kanalnetz in Deutschland 2007

Nennweite	bis DN300	> DN300 bis DN400	> DN400 bis DN600	> DN600 bis DN800	> DN800	Gesamt
Kanalnetzlänge (km)	270.362	135.181	70.294	43.258	21.629	540.723
Material (1.000t)						
Beton / Stahlbeton	9.679	24.199	22.574	28.967	27.028	112.448
Bewehrungsstahl BSt 500	248	620	579	474	277	2.199
Steinzeug	8.769	5.013	2.495	1.032	987	18.298
Kanalklinker	0	0	0	4.939	6.824	11.763
Zementmörtel	0	0	0	1.373	1.897	3.270
Kunststoff	291	148	75	20	8	543
Sand/Kies	272.207	166.621	111.578	109.456	75.035	734.897
Gesamt	291.443	197.222	137.881	146.737	112.334	883.418

Quelle: Eigene Berechnungen auf Grundlage von Reckerzügl (1997), Berger/Lohaus (2004), Frank et al. (2006), Sachverständigenbüro Fischer (2009), verschiedene Herstellerangaben für 50 % der Betonrohre im Kreisprofil wird ein Stahl-Anteil von 5 % Bewehrungsstahl angenommen. inkl. 2 % Materialaufschlag durch Überlappungen (Hillenbrand 2009)

Insgesamt dominieren im Kanalnetz die mineralischen Baustoffe mit einem überragenden Anteil an Sand und Kies, bedingt durch die Rohrbettung. Von den Rohrmaterialien hat im Kanalnetz – im Gegensatz zum Leitungsnetz – Beton eine herausragende Rolle. Dieser resultiert hauptsächlich aus dem großen Anteil von Betonrohren größerer Dimension mit einem hohen spezifischen Rohrgewicht.

⁴⁵ Die Massenangaben zu den Kanälen aus Mauerwerk beruhen auf Schätzungen, da keine Herstellerangaben verfügbar sind.

⁴⁶ Ohne Rohrbettung

Jährliche Materialflüsse durch Neubau / Rückbau

Der Aufbau der Kanalisationen in Deutschlands begann mit der industriellen Entwicklung zu Beginn des 19. Jahrhunderts in den großen Städten und wurde in den letzten Jahrzehnten fortlaufend erweitert. Seit 1842 werden in Deutschland planmäßig Kanalisationen errichtet und stellen heute große Vermögensanlagen von Kommunen dar (Stein 2004). Mittlerweile steht jedoch die Instandhaltung und Erneuerung im Vordergrund. Alte, brüchige Kanäle sind potenzielle Emissionsquellen von umweltgefährdenden Flüssigkeiten und müssen entsprechend sorgfältig überwacht und ggf. saniert werden.

Durchschnittlich wuchs die Kanalisation in Deutschland in den letzten neun Jahren um 10.530 km jährlich (Bruttozunahme, Destatis 2009, Tab.7), das entspricht einer Zuwachsrate von knapp 2 %.

Folgende Annahmen werden hinsichtlich der Netz-Erweiterung getroffen:

- Die Größenverteilung im Neubau ist gleich der Größenverteilung im Bestand
- Die Materialverteilung spiegelt die aktuellen Präferenzen der Netzbetreiber: Es dominieren weiterhin Beton und Steinzeug, die Rolle von Kunststoff wächst und wird sich zukünftig im Stock widerspiegeln.
- Nach Angaben der IKT-Marktumfrage von 2007 werden etwa 80 % der neuen Kanäle in offener Bauweise verlegt (Waniek 2008), was Auswirkungen auf die Materialflüsse von Sand und Kies im Rahmen der Rohrbettung hat.

Damit ergibt sich ein jährlicher Zuwachs durch Neubau wie folgt:

Tab. 77: Jährlicher Materialbedarf im Kanalnetz durch Neubau in Deutschland

Nennweite	bis	> DN300 bis	> DN400 bis	> DN600 bis	Gesamt	
	DN300	DN400	DN600	DN800 > DN800		
Kanalnetzlänge (km)	5.265	2.633	1.369	842	421	10.530
Material (1.000t)						
Beton	0	197	368	511	601	1.677
Steinzeug	126	106	36	39	19	326
Kunststoff	28	21	11	3	2	65
Stahl	7	5	5	5	0	21
...Zementmörtel	3	2	2	2	0	9
...PE	0	0	0	0	0	1
Sand/Kies	4.241	2.596	1.738	1.705	1.169	11.449
Gesamt	4.405	2.929	2.160	2.265	1.791	13.550

Quelle: Eigene Berechnungen

Durchschnittlich nimmt der Materialstock aktuell jährlich um rund 13,5 Millionen Tonnen Material zu. Da der Anschlussgrad sich einer Sättigung nähert, ist damit zu rechnen, dass diese Werte künftig sinken.

Jährliche Materialflüsse durch Erneuerung und Sanierung

Trinkwasser- und Abwassernetze haben eine Lebensdauer von bis zu 100 Jahren. Daher sind die kontinuierliche Instandhaltung und Erneuerung der Netze eine Daueraufgabe. Nach Angaben der Deutschen Wasserverbände sind ungefähr 20 % der öffentlichen Kanalisation kurz- bzw. mittelfristig sanierungsbedürftig. Weitere 21,5 % weisen geringfügige Schäden auf und müssen langfristig saniert werden (ATT et al. 2008; Berger/Lohaus 2004).

Umfragen des IKT – Institut für Unterirdische Infrastruktur zeigen, dass die jährlichen Investitionen der Netzbetreiber in ihre Kanalisation steigen: von 2005 auf 2006 um 8 %, von 2005 auf 2007 um 10 % (Waniek 2008). Dies betrifft vorrangig Sanierungen, wohingegen der Bereich Kanalneubau/-erschließung eine rückläufige Tendenz aufweist. Offenbar werden nun nach langjährig rückläufigen Investitionsraten Investitionen in die Sanierung der Kanalnetze angegangen, welche, wenngleich notwendig, häufig aus Haushaltsgründen zurückgestellt wurden (IKT 2006).

Bei der Sanierung unterscheidet man zwischen Reparatur, Renovierung und Erneuerung.⁴⁷ Erstere umfasst lediglich die Behebung örtlich begrenzter Schäden durch Ausbesserung, Injektion und Abdichtung und wird bei einem Viertel der beobachteten Kanalschäden angewendet (Tab. 78). Es ist zu berücksichtigen, dass Beton- und Steinzeugrohre häufiger Schäden aufweisen als Kunststoffrohre (Stein 2004).

Tab. 78: Anteile der unterschiedlichen Sanierungsverfahren im deutschen Kanalnetz

			2001	2004
Reparatur	Behebung örtlich begrenzter Schäden	Ausbesserung	18 %	9 %
		Injektion	7 %	7 %
		Abdichtung	5 %	9 %
Renovierung	Verbesserung der aktuellen Funktionsfähigkeit von Abwasserleitungen und –kanälen unter vollständiger oder teilweiser Einbeziehung ihrer ursprünglichen Substanz	Beschichtung	1 %	3 %
		Relining	15 %	21 %
		Montage	1 %	2 %
Erneuerung	Herstellung neuer Abwasserleitungen und –kanäle in der bisherigen oder einer anderen Linienführung, wobei die neuen Anlagen die Funktion der ursprünglichen Abwasserleitungen und –kanäle einbeziehen	Offene Bauweise	48 %	40 %
		Geschlossene Bauweise	5 %	9 %

Quelle: Berger/Lohaus (2004)

Prinzipiell lässt sich ein Trend zur Renovation und – bei der Erneuerung – zur geschlossenen Bauweise feststellen. Bei der Renovation dominiert das so genannte Relining – in den vorhandenen Kanal wird über unterschiedliche Verfahren ein neues,

⁴⁷ Einen Überblick über den aktuellen Stand der Sanierungsverfahren bietet Zesch 2009, detailliertere Informationen finden sich z.B. bei Stein 2004.

kleiner dimensioniertes Profil, in den meisten Fällen aus Kunststoff (PVC, PE, GFK, Synthefaser), eingezogen.

Nach Angaben von Koziol et al. (2006) wäre eine „normale“ Erneuerungsrate bei 1,5 % pro Jahr anzusetzen. Zur Verringerung des Sanierungsstaus seien sogar ca. 3 % des vorhandenen Abwassernetzes zu erneuern (ebd.). Jedoch fällt die Erneuerungsrate in der Realität meist geringer aus. Die Stadtwerke Essen haben bspw. eine Netzerneuerungsrate von 1 % (Reineck 2007). Für Oslo haben Venkatesh et al. (2009) eine Netzerneuerungsrate von lediglich 0,4 % bestimmt.

Ermittelt man die sanierte Kanallänge über die tatsächlichen Investitionen der Netzbetreiber, so ergibt sich ein differenziertes Bild: Im Jahr 2003 wurden für die Sanierungsmaßnahmen durchschnittlich 20,34 € pro angeschlossenem Einwohner ausgegeben. Hochgerechnet auf das gesamte Bundesgebiet und 82,5 Mio. Bundesbürger können die Ausgaben für die Kanalsanierung in 2003 mit rund 1,6 Mrd. Euro abgeschätzt werden (ATT et al. 2008). Schätzungen für die mittleren Kosten einer Kanalsanierung schwanken zwischen 300 und 540 Euro / Meter – mit geringeren Kosten für eine Reparatur und entsprechend hohen Kosten für eine Leitungserneuerung (ATT et al. 2008, Berger/Lohaus 2004, Koziol et al. 2006). Mit zugrunde gelegten Kosten von 420 Euro / Meter sanierter Kanal betrug in 2003 die sanierte Kanallänge lediglich rund 3.800 km – das entspricht rund 0,7 % des Gesamtkanalnetzes und liegt somit deutlich unter empfohlenen Netzerneuerungsraten.

Vor diesem Hintergrund werden hinsichtlich der Kanalsanierung folgende Annahmen getroffen:

- Insgesamt wird eine jährliche Sanierungsrate von etwa 1 % zugrunde gelegt (5.000 km). Diese beinhaltet Reparatur, Renovation und Erneuerung und trägt den geschätzten geringeren tatsächlichen Investitionen Rechnung. Die höhere angenommene Sanierungsrate (im Vergleich zu 0,7 %) wird dadurch ausgeglichen, dass die Materialflüsse für Reparaturen nicht in die Gesamtbetrachtung einfließen⁴⁸.
- 20 % der zu sanierenden Kanalisation werden durch Relining renoviert, 40 % in offener und 10 % in geschlossener Bauweise erneuert⁴⁹.
- Die Größenverteilung bei der Sanierung ist gleich der Größenverteilung im Bestand (und bei Neubau).
- Das Relining erfolgt durch das Einziehen eines zusätzlichen Kunststoffschlauches unterschiedlicher Ausführung. Dabei erfolgt keine Unterscheidung hinsichtlich verschiedener Verfahren.

⁴⁸ D.h. die Berechnungen umfassen lediglich jene 3.500 km, welche durch Renovierung und Erneuerung saniert werden.

⁴⁹ 30 % der Sanierungsmaßnahmen umfassen lokale Reparaturen, welche hier nicht weiter betrachtet werden.

- Bei der offenen Erneuerung (80 %) erfolgt die Materialverteilung wie beim Neubau (s.o.), die alten Rohre (vorw. Beton, Mauerwerk und Steinzeug) werden abgebaut.
- Bei der geschlossenen Erneuerung (20 %) erfolgt die Materialverteilung wie beim Neubau, die alten Rohre (vorw. Beton und Steinzeug) verbleiben im Boden.

Damit ergeben sich folgende jährliche Materialflüsse durch Sanierung der Kanalisation (Renovierung, Erneuerung):

Tab. 79: Jährlicher Materialbedarf im Kanalnetz durch Sanierung (Renovierung und Erneuerung)

Nennweite	> DN300 bis		> DN400 bis		> DN600 bis		Gesamt
	bis DN300	DN400	DN600	DN800	> DN800		
Kanalnetzlänge (km)	1.250	625	325	200	100		3.500
Material (1.000t)							
Beton	0	47	87	121	143		398
Zementmörtel	1	1	0	0	0		2
Steinzeug	30	25	8	9	4		77
Kunststoff	12	12	9	3	2		38
Stahl	2	1	1	1	0		5
Gesamt	45	86	107	135	149		521

Quelle: Eigene Berechnungen

Insgesamt werden durch Renovierung und Netzerneuerung jährlich über 500.000 Tonnen Baustoffe in das Kanalnetz verbaut⁵⁰ – zum überwiegenden Teil Beton, gefolgt von Steinzeug und Kunststoff. Die relativ geringe Menge im Vergleich zum Bestand (0,35 %) resultiert aus sehr geringen Investitionen in die Kanalsanierung – welche weit unter empfohlenen Netzerneuerungsraten liegen – sowie daran, dass sich neue Rohrmaterialien etablieren, welche ein erheblich geringeres Gewicht als ältere Baumaterialien aufweisen.

Unter der Prämisse, dass die Altröhre bei offener Erneuerung abgebaut werden, ergibt sich darüber hinaus folgender jährlicher Abbruch:

⁵⁰ Setzt man die „normale“ Erneuerungsrate von 1,5 % an (Kozioł et al. 2006), so erhöht sich der jährliche Materialinput durch Erneuerung auf etwa 1,5 Mio. Tonnen.

Tab. 80: Jährlicher Abbruch Kanalnetz in Deutschland durch offene Erneuerung

Nennweite	bis DN300	> DN300 bis DN400	> DN400 bis DN600	> DN600 bis DN800	> DN800	Gesamt
Kanalnetzlänge (km)	1.000	500	260	160	80	2.000
Material (1.000t)						
Beton	36	90	84	108	100	418
Steinzeug	32	18	9	4	4	66
Kanalklinker				18	25	44
Zementmörtel				5	7	12
Kunststoff	1	1	0	0	0	2
Gesamt	69	109	93	135	136	542

Quelle: Eigene Berechnungen

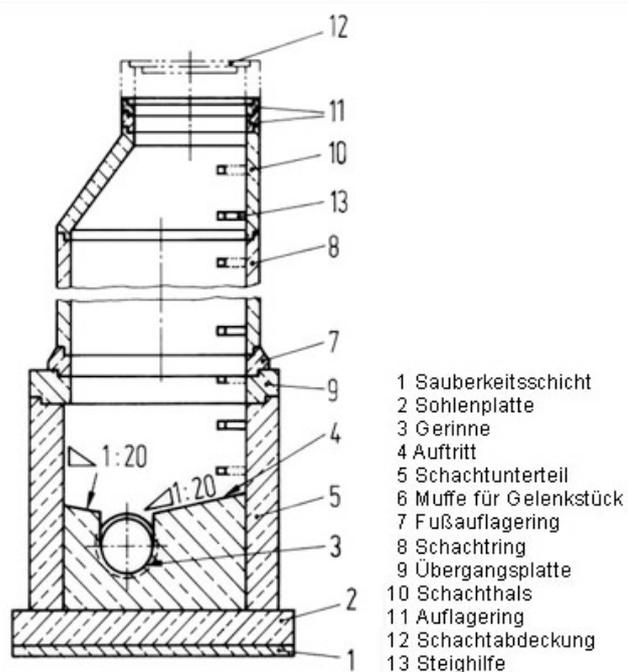
Wenngleich nur ein Teil der Altröhre bei der Sanierung ausgebaut wird, wird in etwa so viel Bauschutt gehoben, wie bei den gesamten Sanierungsaktivitäten eingebaut wird. Auch hier macht sich die Entwicklung hin zu leichteren Rohrmaterialien bemerkbar. Bei der geschlossenen Erneuerung verbleiben die Altröhre im Boden – etwa 135.000 Tonnen jährlich.

4.2.2 Schächte

Schächte für erdverlegte Abwasserkanäle und –leitungen nehmen den größten Anteil an den Bauwerken der Ortsentwässerung (Bauwerke zur Überwindung von Höhenunterschieden, Inspektionsöffnungen, Kreuzungsbauwerke, Regenüberlaufbauwerke, Einlaufbauwerke (Straßenabläufe), Auslauf- sowie Schieberbauwerke, Schächte) ein. Der Schacht ist gemäß der Vornorm DIN V 4034, Teil 1, als ein Bauwerk für einen erdverlegten Abwasserkanal oder eine erdverlegte Abwasserleitung definiert. Er dient der Be- und Entlüftung, der Kontrolle, Wartung und Reinigung sowie der Zusammenführung, Richtungs-, Neigungs- und Querschnittsveränderung von Kanälen und Leitungen (Puhl 2007). Man unterscheidet nach DIN EN 476 Einsteigschächte mit Zugang für Personal sowie Einsteigschächte zum Einbringen von Reinigungsgerät, Inspektions- und Prüfausrüstungen mit gelegentlicher Zugangsmöglichkeit für eine angegurte Person“ sowie Kontrollschächte, welche sich in ihren Mindestgrößen unterscheiden (Stein/Falk 2004).

Diese Schächte können bis zu mehreren Metern im Durchmesser sein und je nach Lage der Kanäle Tiefen bis zu 20 oder mehr Metern haben. Schächte setzen sich zusammen aus dem Schachtunterteil mit Gerinne, Auftritt und Anschlussstück, dem Schachtkörper aus Schachtringen und Schachthals, dem Schachtkopf, den Steighilfen, dem Auflagering sowie der Schachtabdeckung (Abb. 8).

Abb. 8: Schematischer Aufbau eines Einstiegsschachtes



Quelle: Stein (2004)

In den bestehenden öffentlichen Kanalnetzen sind Fertigteilschächte aus Beton und Stahlbeton weit verbreitet. Daneben finden seit einigen Jahren Fertigteilschächte aus den Materialien Polymerbeton und Steinzeug, Kunststoffen wie Polyethylen hoher Dichte (PE-HD), Polyurethan (PUR), Polyvinylchlorid (PVC) oder Polypropylen (PP) sowie aus glasfaserverstärkten Reaktionsharzen (GfK) Verwendung (Puhl 2007). Die früher aus Kanalklinkersteinen vor Ort gemauerten Abwasserschächte sind seltener zu finden. Neben den werkstoffeinheitlichen Ausführungen finden sich auch Schächte, die aus zwei oder mehreren Werkstoffen bestehen: Das Schachtunterteil wird gemauert oder mit Ortbeton gegossen und der weitere Aufbau aus Betonfertigteilen erstellt. Bei der Erneuerung von älteren, nicht mehr standsicheren Schächten aus Mauerwerk wird beispielsweise zum Teil der Schachtkörper bis auf das Schachtunterteil durch Betonfertigteile ersetzt (Puhl 2007).

Für den Ein- und Ausstieg sind Abwasserschächte mit *Steighilfen* ausgerüstet, Steigleitern sind seltener. In der Regel werden ein- oder zweiläufige Steigeisengänge eingesetzt, welche zumeist bereits werksseitig eingebaut werden. Es gibt sie in beschichteter und unbeschichteter Ausführung, der Abstand zwischen den einzelnen Steighilfen muss 250 – 330 mm betragen, bei gemauerten Schächten jeweils in der dritten Klinkerschicht. Jedoch haben einige Kanalnetzbetreiber die ortsfesten Steighilfen aus den Abwasserschächten entfernen lassen und verwenden ausschließlich portable Einstiegshilfen (Puhl 2007).

Schachtabdeckungen setzen sich zusammen aus dem Rahmen, dem Rost und dem Deckel. Sie bestehen in der Regel aus Gusseisen, Stahlguss, Walzstahl, einer Werkstoffkombination mit Beton oder aus Stahlbeton. Neuerdings können für die Herstellung von Schachtabdeckungen zusätzlich rostfreier Stahl, Aluminium, faserverstärkter Kunststoffverbund und Polypropylen verwendet werden, wohingegen der Einsatz von Stahlguss nicht mehr vorgesehen ist. In den letzten Jahren werden vermehrt Schachtabdeckungen aus duktilem Gusseisen (Gusseisen mit Kugelgraphit) angeboten, welche ein geringeres Gesamtgewicht aufweisen können als andere Werkstoffe (Puhl 2007).

Im Schachtunterteil befindet sich ein Auftritt (Berme), der bei einem Durchmesser des abgehenden Kanals bis DN500 beidseitig in Höhe des Scheitels liegen soll. Der Arbeitsraum über dem Auftritt sollte möglichst zwei Meter hoch sein (Puhl 2007).

Ermittelter Gesamtmaterialbestand

Angaben zur Anzahl von Schächten in Deutschland variieren. Das IKT Institut für Unterirdische Infrastruktur Gelsenkirchen spricht von rund zehn Millionen Abwasser-schächten (Puhl 2007; Gillar 2008). Die DWA hingegen hat in einer Umfrage von 2004 12 Mio. Schächte und Bauwerke genannt (Wagner 2007). Reckerzügl gibt in seiner Arbeit (Reckerzügl 1997) an, dass etwa alle 45 m ein Schacht im Kanalnetz liegt. Der Schachtabstand sollte bei Kanälen aller Dimensionen in der Regel 100 m nicht überschreiten.

Der Minstdurchmesser für viereckige oder runde Schächte sollte im Bereich der öffentlichen Kanalisation einen Meter betragen. Der Schacht sollte so geräumig sein und die Einstiegsöffnung so angeordnet werden, dass das Reinigen der Kanäle vom Schacht aus möglich ist (Puhl 2007). Unsere Berechnungen basieren daher auf einem Schacht-Durchmesser von einem Meter.

Die Schachttiefe ist abhängig von der Überdeckungshöhe (früher Tiefenlage) der Kanalisation. Abwasserkanäle haben nach DVGW W400 eine Mindestüberdeckungshöhe⁵¹ von 2 Metern (DVGW 2004). Die Mindestüberdeckungshöhe ist im Allgemeinen abhängig von der Tiefe der zu entwässernden Kellersohlen und variiert stark in Abhängigkeit von der Topographie. Kanalnetze werden unterhalb von Versorgungsleitungen verlegt. Die mittlere Überdeckungshöhe für Kanäle beträgt in städtischen Entwässerungsgebieten in der Regel 3,0 bis 4,0 m, in Vorortsiedlungen kann sie auch geringer sein (Stein 2004). Dabei ist davon auszugehen, dass Kunststoffschächte im Schnitt kürzer sind als Betonschächte, da sie im Verteilungsnetz vorgelagert und damit in geringerer Tiefe liegen als Betonschächte. Daher wird für Betonschächte (in Anlehnung an Jekel 2006) eine Durchschnittstiefe von 3 m zugrunde gelegt (über Rohrauslass), für Kunststoffschächte eine Durchschnittstiefe von 2,5 m.

Die Werkstoffverteilung wurde von Puhl (2007) übernommen (siehe Tab. 81). Massenbeispiele für Schächte aus verschiedenen Werkstoffen (Beton, Mauerwerk, Kunst-

⁵¹ Die Überdeckungshöhe bezeichnet die lotrechte Entfernung von der Oberkante des Rohrschaftes bis zur Oberfläche nach DIN EN 1610.

stoff) beruhen auf Herstellerangaben⁵² und erlauben eine Hochrechnung auf die Gesamtmaterialmenge.

Tab. 81: Werkstoffverteilung der Schachtsysteme in % des gesamten Abwasserschachtbestandes

Baustoff	Anteil	Schächte
Beton	69,80 %	6.980.000
Mauerwerk	28,80 %	2.880.000
Kunststoff	0,30 %	30.000
Sonstiges	1,10 %	110.000
Gesamt	100,00 %	10.000.000

Quelle: Eigene Berechnungen auf der Grundlage von Puhl (2007)

Eine weitere Differenzierung nach Beton / Stahlbeton und verschiedenen Kunststoffen ist auf Grundlage der vorhandenen Datenbasis nicht möglich. Die Materialarten Klinker und Zementmörtel beruhen auf einer Schätzung der Massen und Massenanteile in Mauerwerksschächten, da keine Daten vorliegen. Der Bestand an Gusseisen resultiert aus den Schachtabdeckungen, für die ein Beton-Gusseisen-Deckel (BeGu-Deckel) als Referenzobjekt vorliegt. Der genaue Gusseisenanteil in der BeGu-Abdeckung konnte jedoch nicht ermittelt werden und beruht auf einer Schätzung.

Tab. 82: Materialbestand Schächte in Deutschland 2007⁵³

Materialbestand Schächte in Deutschland				Masse Gesamt
	Beton-Schacht	Ziegel-Schacht	Kunststoff-schacht	
Anzahl in D	6.980.000	2.880.000	30.000	9.890.000
	Masse/ Schacht (t)	Masse / Schacht (t)	Masse / Schacht (t)	1.000t
Beton	4,508	0,143	0,263	31.886
Gusseisen	0,035	0,035	0,035	346
Klinker		2,732		7.868
Zementmörtel		0,76		2.189
Kunststoff (PE-HD, PUR, PVC, PP)			0,196	6
Gesamtmasse (t)	4,543	3,67	0,494	42.295

Quelle: Eigene Berechnungen auf Grundlage von Puhl (2007) und Herstellerangaben

⁵² Die Massenangaben zum Schacht aus Mauerwerk beruhen auf Schätzungen, da keine Herstellerangaben verfügbar sind.

⁵³ Die Daten wurden an geänderte Annahmen angepasst. Unter anderem wurde in Anlehnung an Jekel et al. 2006 die Durchschnittstiefe der Betonschächte auf 3m reduziert, was einen entsprechend geringeren Materialeinsatz nach sich zieht.

Entsprechend dominieren mineralische Baustoffe den Gesamt-Materialstock in Höhe von über 40 Millionen Tonnen: Dieser wird dominiert von Beton oder Stahlbeton, gefolgt von Klinker und Zementmörtel (siehe Tab. 82).

Ermittlung der jährlichen Materialflüsse

Neubau / Rückbau

Der Neubau von Schächten erfolgt analog zur Erweiterung des Kanalnetzes. Bei einer jährlichen Zunahme der Kanalisation um 10.530 km kann man von ca. 200.000 neuen Schächten jährlich ausgehen. Im Neubau werden so gut wie keine Schächte aus Mauerwerk gebaut, daher basieren die Berechnungen für den Neubau auf einer Werkstoffverteilung von geschätzten 90 % Beton und 10 % Kunststoff. Insgesamt ergibt sich durch die Erweiterung des Kanalnetzes ein Zugang zum Materialstock der Schächte in Höhe von rund 800.000 Tonnen jährlich, fast ausschließlich Beton (Tab. 83). Wie beim Kanalnetz handelt es sich hier um eine Bruttozunahme, in der ein eventueller Rückbau schon enthalten ist. Zahlen hierzu fehlen jedoch.

Sanierung

Angesichts der großen Bedeutung von Abwasserschächten im Kanalnetz wird besonderes Augenmerk auf deren baulichen und betrieblichen Zustand geworfen (Puhl 2007, 39). Nach Angaben der DWA sind 18 % der 12 Mio. Schächte und Bauwerke in Deutschland schadhaft und erfordern auf kurze oder mittlere Frist eine Sanierung (Wagner 2007). Das IKT schätzt, dass 1 Mio. Schächte sanierungsbedürftig sind, was einem Gesamt-sanierungsbedarf von 3,5 Mrd. Euro entspräche (Gillar 2008).

Je nach Schadensbild des Schachtes kommen bei Sanierungsmaßnahmen Reparatur-, Renovierungs- oder Erneuerungsverfahren zum Einsatz. Reparaturen umfassen Maßnahmen zur Behebung örtlich begrenzter Schäden, unter dem Begriff Renovierung sind Maßnahmen zur Verbesserung der aktuellen Funktionsfähigkeit von Schächten unter vollständiger Einbeziehung ihrer ursprünglichen Substanz zu verstehen (Puhl 2007, 61). Die Erneuerung bedeutet die Herstellung eines neuen Schachtes an gleicher Position.

Es liegen vom IKT einige Zahlen vor zu verwendeten bzw. potenziell möglichen Sanierungsverfahren. Bspw. liegen Schätzungen vor, nach denen sich 12 % aller Schächte grundsätzlich für den Einsatz von Beschichtungsverfahren eignen (Puhl 2007).

Nach Angaben des IKT sind ca. 10 %, das heißt eine Million Schächte, sanierungsbedürftig⁵⁴ (Gillar 2008). Wenn man davon ausgeht, dass Schächte im Zuge der Netzerneuerung in offener Bauweise erneuert werden, so werden bei 2.000 km erneuertem Kanalnetz 40.000 Schächte (mit-)erneuert (20 Schächte / Kilometer Kanalnetz). Das entspricht einer Erneuerungsrate von 0,4 %. Renovierungs- und Reparaturverfahren

⁵⁴ Andere Quellen nennen 1,2 Millionen Schächte sanierungsbedürftig (Koziol et al. 2006: 82).

werden aufgrund mangelnder Datengrundlage nicht betrachtet. Unter der Prämisse, dass bei offener Erneuerung die alten Schächte abgebrochen werden, steht dem jährlichen Material-Input von rund 160.000 Tonnen ein leicht erhöhter Output durch den jährlichen Abbruch gegenüber. Dies resultiert daraus, dass gemauerte (30 %) und Beton-Schächte (70 %) abgebrochen werden, wohingegen vermehrt leichte Kunststoffschächte bei der Erneuerung eingesetzt werden (Annahme wie bei Neubau: 90 % Beton, 10 % Kunststoff).

Tab. 83: Jährliche Zu- und Abgänge Kanalschächte durch Neubau und Sanierung

	Neubau (in 1.000 t)	Erneuerung (in 1.000 t)	Abbruch (in 1.000 t)
Beton	817	163	128
Klinker			33
Zementmörtel			9
Kunststoff	4	1	
Gusseisen	7	1	1
Gesamt	828	166	171

Quelle: Eigene Berechnungen

4.2.3 Pumpwerke

Bei zu geringem Gefälle, Steigungen oder um die Rohrdurchmesser kleiner zu halten, müssen auch in Kanalisationen Pumpenanlagen eingesetzt werden. Der Einsatz einer Pumpe hängt wesentlich vom Gefälle des Kanals – also auch von den örtlichen Gegebenheiten – ab und kann nicht pauschal z.B. über die Länge des Netzes ermittelt werden. Außerdem können der Aufbau und die Größe der Pumpen sehr unterschiedlich sein. Zumeist erfolgt die Förderung im Kanalnetz mit Kreiselpumpen, bei Pumpwerken vor der Kläranlage häufig mit Kreiselschnecken (Imhoff/Imhoff 2007).

Nach aktuellem Kenntnisstand ist die Anzahl an Pumpwerken im Kanalnetz in Deutschland nicht bekannt. Nach Angaben des IKT summieren sich die in den Händen der öffentlichen Netzbetreiber befindlichen Pumpwerke in Nord-Rhein-Westfalen jedoch nach einer Umfrage in 2001 auf rd. 6.300 Anlagen (IKT 2004). Der Lagebericht 2005 des Landeswasserverbandstag Brandenburg e.V. listet für 2005 1.515 Pumpwerke und 2.897 Hauspumpstationen alleine in seinen Mitgliedsverbänden (LWT 2005).

Hauptbestandteile eines Pumpwerkes sind Pumpen-, Motoren- und Schaltraum, Pumpensumpf, Traforaum und die Betriebsräume. An Anlagen sind neben den erforderlichen Pumpen der Zulaufkanal, Rechen (teilweise), Sandfang (teilweise), Saugrohr, Druckrohr, Auslaufschacht des Druckrohres sowie Vorflutkanal des Druckrohres zu nennen (Hosang/Bischof 1998). Daneben sind diverse Mess- und Steuereinrichtungen erforderlich. Abwasserpumpen erfordern meist einen größeren Durchgangsquerschnitt

für das Laufrad als Reinwasserpumpen (Kapitel 4.2.7) aufgrund möglicher Sperrstoffe im Abwasser (Hosang/Bischof 1998).

Erste Schätzungen ließen auf eine mittlere stoffliche Relevanz der Pumpwerke in der Kanalisation schließen. Da sie jedoch ausgesprochen heterogen sind, und eine ausreichende Datenbasis bisher nicht vorliegt, sahen wir von einer weiteren Betrachtung der Pumpwerke im Kanalnetz ab.

4.2.4 Regentlastungsanlagen

Da Kläranlagen bei Regen eine begrenzte Kapazität aufweisen, muss Regenwasser aus Mischwasserkanälen unmittelbar in die Gewässer entlastet werden. Ziel der Regenwasserbehandlung ist die weitestmögliche Reduzierung der Gesamtemissionen aus Regentlastungen und Kläranlagen durch eine sinnvolle Begrenzung des Regenabflusses zur Kläranlage (Imhoff/Imhoff 2006; Bayer et al. 2004). Das kann mit verschiedenen Ansätzen erreicht werden: von der Abflussvermeidung bis zum Stoffrückhalt.

Folgende Entlastungsbauwerke sind zu unterscheiden (nach Imhoff/Imhoff 2006):

- *Regenüberlauf (RÜ)*: Bei stärkerem Regen wird ein Teil des Mischwassers in die Gewässer entlastet.
- *Regenüberlaufbecken (RÜB)*: sind Entlastungsbauwerke für Mischsysteme mit vorgeschaltetem Speichervolumen mit Rückhalte- und Klärfunktion. Wesentliche Bestandteile sind der Überlauf in das Gewässer und der Ablauf zur Kläranlage. Das gespeicherte Regenwasser wird zeitverzögert in die Kläranlage abgegeben; ist die Beckenkapazität ausgelastet, erfolgt ein Überlauf in den Vorfluter. Man unterscheidet Fangbecken, Durchlaufbecken, Stauraumkanäle und Verbundbecken.
- *Regenrückhaltebecken (RRB)*: werden in Misch- und Trennkanalisation zur Entlastung der weiterführenden Kanäle im Netz angeordnet. Sie sammeln das Wasser bei starken Regengüssen und geben es verzögert wieder ab, um allzu große Abflussspitzen zu verhindern. Hierzu zählen auch Kanalstauräume.
- *Regenklärbecken (RKB)*: sind Absetzbecken für verschmutztes Regenwasser im Trennverfahren.

Der überwiegende Teil der Anlagen besteht aus Stahlbeton, abgesehen von den Regenrückhaltebecken, welche häufig in Erdbauweise errichtet werden. In letzter Zeit setzen sich vermehrt Stauraumkanäle (fungierend als RÜB oder RRB) durch, welche aus PE oder GFK bestehen.

Neben dem Becken selber gibt es jeweils noch einen Zulaufkanal sowie eine – meist mechanische oder elektrische – Drosseleinrichtung (Wirbelventil, Wirbeldrossel, Hydroslide o.a.). Wasserwirtschaftlich bedeutsame Regentlastungsanlagen werden mit Messeinrichtungen zur Erfassung des Entlastungs- und Betriebsverhaltens ausgestattet.

Ermittelter Gesamtmaterialbestand

Nach Angaben des Statistischen Bundesamtes gab es in Deutschland im Jahr 2007 66.224 Regenentlastungsanlagen unterschiedlicher Bauart (Destatis 2009), davon 23.772 Regenüberlaufbecken (RÜB), 3.194 Regenklärbecken (RKB) und 20.767 Regenüberläufe (RÜ). Regenüberlaufbecken sind die am häufigsten vorkommenden Bauwerke zur Mischwasserbehandlung. Ihre Größe reicht von 50 m³ (Mindestgröße bei Fangbecken) bis zu über 10.000 m³. Daten zur Material- und Größenverteilung liegen nicht vor.

Aufgrund unzureichender Datenlage werden Regenrückhaltebecken aus der Betrachtung ausgeklammert. Vereinfachend wird 100 % Betonbauweise (davon 50 % in Stahlbeton) für die untersuchten Regenüberlaufbecken und Regenklärbecken sowie eine ähnliche Konstruktion und Materialverbrauch unterstellt.

Sämtliche Berechnungen basieren auf der Arbeit von Reckerzügl 1997 für 4 Regenüberlaufbecken à 400 m³ (Tab. 84). Ergänzend wurden die Betonmengen anhand von Massenbeispielen auf ihre Plausibilität geprüft. Es muss jedoch betont werden, dass aufgrund der mangelhaften Datensituation insgesamt lediglich Größenordnungen angegeben werden können.

Tab. 84: Materialbestand Regenentlastungsanlagen nach Speichervolumen (geschätzt)

Stahlbeton	m ³ /m ³	0,7
Steinzeug	t/m ³	0,003725
Keramik	t/m ³	0,0000125
Grauguss	t/m ³	0,00005
Edelstahl	t/m ³	0,0015
Aluminium	t/m ³	0,00000625
Kupfer	t/m ³	0,000125
PE-Rohr	t/m ³	0,0000125

Quelle: Berechnet nach Reckerzügl (1997)

Es ergibt sich somit für Regenentlastungsanlagen (Regenüberlaufbecken, Regenklärbecken und Regenüberläufe) ein Materialbestand von knapp 34 Millionen Tonnen, davon zum überwiegenden Teil Beton:

Tab. 85: Materialbestand Regenentlastungsanlagen in Deutschland 2007

	RÜB + RKB	RÜ	Masse gesamt
Anzahl	26.966	20.767	
Speichervolumen (m ³)	17.877.000		
Material (1.000t)			
Beton	28.206	4.585	32.791
Betonstahl	576	191	767
Steinzeug	67		67
Grauguss	1		1
Stahl V4A (12%Ni, 17% Cr)	27		27
Kupfer 60:40	2		2
Gesamt	28.879	4.967	33.655

Quelle: Eigene Berechnungen auf Basis von Destatis (2009), Reckerzügl (1997) und Angaben von Bau-firmen

Neubau / Rückbau

Vor dem Hintergrund zunehmender Starkregenereignisse hat die Regenwasserbewirtschaftung eine wichtige Rolle inne. Entsprechend hat die Menge an Regenentlastungsbauwerken in den letzten neun Jahren zugenommen. Durchschnittlich wurden 590 Regenüberlaufbecken und Regenklärbecken im Jahr gebaut mit einem Gesamtspeichervolumen von 322.444 m³.⁵⁵ Der Materialinput erfolgt, wie im Bestand, in Abhängigkeit vom Speichervolumen (Tab. 84). Damit werden jährlich durch den Neubau von Regenüberlauf- und Regenklärbecken über 500.000 Tonnen Beton verbaut (Tab. 86). Ein Rückbau von Regenüberlaufbecken erfolgt nur in Einzelfällen und ist somit nicht relevant.

⁵⁵ Wie bereits bei der Berechnung des Materialbestandes werden RRB aufgrund der schlechten Datenlage nicht berücksichtigt. Des Weiteren entfallen im Neubau die Regenüberläufe ohne Speicherbecken, da hier kein eindeutiger Trend über die letzten neun Jahre erkennbar ist und die Mengen vernachlässigbar sind.

Tab. 86: Jährlicher Materialbedarf für Regenüberlaufbecken (RÜB) und Regenklärbecken (RKB) durch Neubau

	RÜB + RKB
Anzahl	590
Speichervolumen (m ³)	322.444
Material (1.000t)	
Beton	509
Betonstahl	10
Steinzeug	1
Gesamt	521

Quelle: Eigene Berechnungen

Sanierung

Betonbauwerke haben eine Nutzungsdauer von 30 bis 40 Jahren. Regenentlastungsbauwerke werden in der Regel durch eine umfassende Betonsanierung wieder hergestellt. Eine vollständige Erneuerung wird eher selten vorgenommen. Aufgrund der unzureichenden Datenlage wird die Sanierung hier nicht berücksichtigt.

4.2.5 Kläranlagen

Der Großteil des Abwassers in Deutschland wird über zentrale Kläranlagen aufbereitet. Diese wurden insbesondere in den letzten Jahrzehnten ausgebaut und die Anschlussgrade an kommunale mechanisch-biologische Anlagen und Anlagen mit gezielter Stickstoff und Phosphatelimination erhöht. Mittlerweile werden 95 % der behandelten Abwassermenge in biologischen Kläranlagen mit gezielter Nährstoffelimination behandelt (BMU 2006).

Kläranlagen bestehen hauptsächlich aus unterschiedlichen Klärbecken, einigen Gebäuden und technischen Anlagen (Pumpen, Überwachungsgeräte u.a.). Für eine Ressourcenermittlung sind die Massen der Becken sowie die technischen Einrichtungen relevant. Die Bauwerke einer konventionellen Kläranlage (überwiegend kommunales Abwasser) können ihrem Zweck nach in 4 Gruppen unterschieden werden (Tab. 87):

Tab. 87: Kläranlagenbauwerke nach ihrem Zweck

Mechanische Reinigung	Einlauf, Rechen, Siebe, Sandfang, Vorklärbecken
Biologische Reinigung	Biologische Stufe, Nachklärbecken, Filtration, Auslauf
Chemische Reinigung	Phosphor-Elimination, Fällungsstufen, Denitrifizierungen
Schlamm- und Gasbehandlung	Faulbehälter, Betriebsgebäude, Eindicker, Gasbehälter, Schlamm-trockenbeete, thermische Schlammbehandlung, künstliche Trocknung, Schlamm-zwischenlager, Schlammverbrennung

Quelle: Nach Hosang/Bischof (1998)

Dazu kommt das umfangreiche unterirdische Netz von Druckrohren, Düken, Schlamm-, Luft- und Gasleitungen und Kanälen. Größere Kläranlagen haben darüber hinaus feste Straßen.

Ermittelter Gesamtmaterialbestand

Nach Angaben des Statistischen Bundesamtes gab es in 2007 in Deutschland 9.933 Abwasserbehandlungsanlagen, davon 9.740 mechanisch-biologische Anlagen (Destatis 2009, Tabelle 10). DIN 19569 unterscheidet 5 Größenstufen (Tab. 88). Kleine Anlagen dominieren in Deutschland hinsichtlich Anzahl, jedoch wird der Großteil des Abwassers in großen Anlagen (Klasse IV und V) behandelt. Die durchschnittliche Ausbaugröße betrug in Deutschland 2007 15.228 EW (Einwohnerwerte⁵⁶).

Tab. 88: Kläranlagen in Deutschland nach Größenklassen und Kapazität 2007

Größenstufen nach DIN 19569	Anzahl Anlagen	Ausbaugröße (1.000 EW)	durchschn. Ausbaugröße (EW)
I < 1.000 EW	4.329 44 %	1.533 1 %	354
II >1.000-5.000 EW	2.504 25 %	6.158 4 %	2.459
III >5.000-10.000 EW	867 9 %	6.195 4 %	7.145
IV >10.000-100.000 EW	1.981 20 %	60.356 40 %	30.467
V > 100.000 EW	252 3 %	77.022 51 %	305.643
Total	9.933	151.264	15.228

Quelle: Eigene Berechnungen nach Destatis (2009, Tabelle 10.2)

Da keine Massenbeispiele differenziert nach Art und Anzahl der Verfahrensstufen vorliegen, werden diese im Rahmen der Hochrechnung vernachlässigt. Aufgrund der mittlerweile generell fast flächendeckenden, und insbesondere in großen Anlagen vorliegenden Ausstattung mit mechanisch-biologisch-chemischen Verfahrensstufen inklusive Schlammbehandlung, ist eine Vereinfachung zwar gegeben, jedoch nach unserer Auffassung zulässig.

⁵⁶ Einwohnerwerte dienen der Bemessung von Abwasserbehandlungsanlagen. Sie ergeben sich aus der Summe der angeschlossenen Einwohner und dem Referenzwert für die Schmutzfracht aus Industrie, Landwirtschaft, Gewerbe (Einwohnergleichwert) (Destatis 2009).

Studien geben in den meisten Fällen lediglich die verbauten Massen an Beton und Stahl für verschiedene, zumeist große, Kläranlagen an (Rendchen 1995; Doka 2007; Reckerzügl 1997).

Tab. 89: Materialeinsatz für die Errichtung ausgewählter Kläranlagen in Deutschland und der Schweiz

Standort		Twann (CH)	Marien- heide	Ergolz (CH)	Gotha	Witten- berg	Du- Kasslerfeld	Bottrop
Kapazität	EW	1.600	20.000	25.000	150.000	180.000	450.000	1.340.000
Größenklasse		II	IV	IV	V	V	V	V
Beton	m ³	1.410	13.386	21.307	21.300	28.000	52.000	240.000
Stahl	t	105	566	1.588	2.100		6.000	35.000
Beton pro EW	m ³	0,88	0,669	0,85	0,14	0,16	0,12	0,18
Stahl pro EW	t	0,066	0,028	0,064	0,014	0,000	0,013	0,026

Quellen: Eigene Berechnung nach Rendchen (1995), Modernbau GmbH, Doka (2007), Reckerzügl (1997)

Dabei nimmt die Masse an verbautem Beton mit steigender Ausbaugröße pro Einwohnerwert ab, die Masse an verbautem Stahl nimmt weniger stark ab. Ein linearer Zusammenhang ist jedoch, abweichend von den Ecoinvent-Daten (Doka 2007), mit den uns vorliegenden Daten nicht feststellbar. Ausgehend von den vorliegenden Massenbeispielen wurden die Beton- und Stahlmassen für verschiedene Größenklassen pro Einwohnerwert geschätzt (Tab. 90).

Tab. 90: Materialeinsatz-Faktoren Beton und Stahl für Kläranlagen

		bis 5.000 EW	> 5.000 EW - 100.000 EW	> 100.000 EW
Beton / Ausbaugröße	m ³ /EW	0,9	0,7	0,15
Stahl / Ausbaugröße	t/EW	0,07	0,04	0,02
Faktor weitere Stoffe		1,75	1	0,5

Quelle: Eigene Schätzung

Reckerzügl (1997) hat in seiner Arbeit eine differenzierte Material-Intensitäts-Analyse (MAIA) für eine Beispielkläranlage (20.000 EW) durchgeführt, für die daher detailliertere Materialbestände angegeben sind (Tab. 91).

Tab. 91: Materialeinsatz Kläranlage nach Reckerzügl 1997

Baustoff	Menge (t)	t/EW
Beton B25	30540,62	1,527031
Stahlbeton (4 % Stahl)	269,1	0,013455
Stahl	498,02	0,024901
Edelstahl	57,39	0,0028695
Betonstahl	10,764	0,0005382
Kalksandstein	602,58	0,030129
Steinzeug	19,96	0,000998
Aluminium	3,09	0,0001545
Kupfer	13,31	0,0006655
Flachglas	1,13	0,0000565
Glaswolle	14,94	0,000747
PE Rohr	12,26	0,000613
PVC Rohr	16,56	0,000828
Gesamtmaterialeinsatz	32.060	1,6029862

Quelle: Berechnet nach Reckerzügl (1997); Beispiel-Kläranlage Marienheide (20.000 EW), repräsentativ für Gemeindegrößenklassen 10.000 – 20.000 Einwohner, 3 Reinigungsstufen

Um diese Massen auf andere Größenklassen zu extrapolieren, wurden die Änderungsfaktoren von Stahl für kleinere bzw. größere Anlagen angewandt und ebenso auf die durchschnittliche Ausbaugröße hochgerechnet. Insgesamt ergibt sich ein geschätzter Materialbestand in deutschen Kläranlagen wie folgt:

Tab. 92: Materialbestand Kläranlagen in Deutschland

Größenklasse	> 1.000 -		> 5.000 -	> 10.000 -	> 100.000	Gesamt
	< 1.000 EW	5.000 EW	10.000 EW	100.000 EW	EW	
Anzahl	4.329	2.504	867	1.981	252	9.933
Ausbaugröße (1.000EW)	1.533	6.158	6.195	60.356	77.022	151.264
Material (1.000t)						
Beton	3.173	12.747	9.974	97.173	26.573	149.640
Stahl, nicht diff.	107	431	248	2.414	1.540	4.741
Kalksandstein	81	325	187	1.818	1.160	3.571
Steinzeug	3	11	6	60	38	118
Aluminium	0	2	1	9	6	18
Kupfer	2	7	4	40	26	79
Flachglas	0	1	0	3	2	7
Glaswolle	2	8	5	45	29	89
PE Rohr	2	7	4	37	24	73
PVC Rohr	2	9	5	50	32	98
Gesamt	3.372	13.547	10.434	101.651	29.430	158.433

Quelle: Eigene Berechnungen

Der Gesamtmaterialbestand, welcher im Jahr 2007 in deutschen Kläranlagen gebunden war, beläuft sich nach unseren Berechnungen hochgerechnet auf knapp 160 Millionen Tonnen – davon zum überwiegenden Teil (knapp 150 Mio. Tonnen) Beton.

Es ist anzumerken, dass sich die hier errechneten Werte teilweise von den Ecolinvent-Daten unterscheiden. Doka (2007) gibt insbesondere für Beton und Stahl erheblich höhere Werte an. Damit ergibt sich hochgerechnet nach Anlagenzahl über die einzelnen Größenklassen ein dreifacher Materialbestand in Höhe von rund 450 Mio. Tonnen. Dies liegt nach Hillenbrand (2009) daran, dass bei Doka im Vergleich zu Reckerzügl (1997) eine vollständigere Erfassung zugrunde liegt und daher die Bedarfswerte entsprechend höher sind. Allerdings liegen die Werte von Doka auch über den uns vorliegenden Massenbeispielen (vgl. Tab. 89), so dass wir uns hier auf die Angaben von Reckerzügl stützen.

Jährliche Materialflüsse

Ein Neubau von Kläranlagen ist, nach erfolgter Angleichung in Ost- und Westdeutschland, in Zukunft nur noch in Maßen zu erwarten. Vor dem Hintergrund geänderter Rahmenbedingungen sind vielmehr Anpassungsmaßnahmen zu erwarten. Anlagen, die noch nicht den geltenden Anforderungen der Abwasserverordnung entsprechen, müssen nachgerüstet werden. Daneben finden vermehrt dezentrale Abwasser-Konzepte Einsatz, welche in Zukunft voraussichtlich eine große Rolle spielen werden.

Der offiziellen Statistik lassen sich die Bestandszahlen an Kläranlagen der verschiedenen Größenklassen von 2001, 2004 und 2005 entnehmen (Destatis 2009). Daraus kann die durchschnittliche jährliche Zu- bzw. Abnahme an Kläranlagen über die letzten sechs Jahre ermittelt werden. Über den durchschnittlichen Materialbestand jeder Größenklasse (Tab. 93) lässt sich somit der gesamte jährliche Materialabbau durch den Abbruch von Kläranlagen ermitteln.

Tab. 93: Materialbestand pro Kläranlage 2007 nach Größenklasse

Größenklasse	< 1.000 EW	> 1.000 - 5.000 EW	> 5.000 - 10.000 EW	> 10.000 - 100.000 EW	> 100.000 EW
durchschn. Ausbaugröße	354	2.459	7.145	30.467	305.643
Material (t)					
Beton	733,04	5.090,68	11.503,98	49.052,58	105.446,79
Stahl, nicht diff.	24,79	172,15	285,81	1.218,70	6.112,86
Kalksandstein	18,67	129,67	215,28	917,95	4.604,36
Steinzeug	0,62	4,30	7,13	30,41	152,52
Aluminium	0,10	0,66	1,10	4,71	23,61
Kupfer	0,41	2,86	4,76	20,28	101,70
Flachglas	0,04	0,24	0,40	1,72	8,63
Glaswolle	0,46	3,21	5,34	22,76	114,16
PE Rohr	0,38	2,64	4,38	18,68	93,68
PVC Rohr	0,51	3,56	5,92	25,23	126,54
Gesamt	779,01	5.409,98	12.034,10	51.313,00	116.784,84

Quelle: Eigene Berechnungen

Tab. 94: Jährliche Materialflüsse durch Neu- und Rückbau von Kläranlagen

Größenklasse	< 1.000 EW	> 1.000 - 5.000 EW	> 5.000 - 10.000 EW	> 10.000 - 100.000 EW	> 100.000 EW	Gesamt
Anzahl 2007 - 2001	24	-238	-46	21	-16	-255
Ausbaugröße (EW) 2007 - 2001	-50	-351	-207	1.510	-6.873	-5.971
jährl. Änd. Anzahl 07-01	4	-40	-8	4	-3	-43
jährl. Änd. Ausb. 07-01 (EW)	-8	-59	-35	252	-1146	-996
Material (1.000t)						
Beton	3	-204	-92	196	-316	-413
Stahl, nicht diff.	0	-7	-2	5	-18	-23
Kalksandstein	0	-5	-2	4	-14	-17
Gesamt	3	-216	-96	205	-350	-455

Quelle: Eigene Berechnungen auf Basis von Destatis (2009)

Über 650.000 Tonnen Material, zum Großteil Beton, werden durch den Rückbau von kleinen Anlagen (1.000 bis 10.000 EW) und vereinzelt sehr großen Anlagen (>100.000 EW) abgebrochen. Dem steht ein Material-Input von jährlich rund 200.000 Tonnen Material gegenüber.

Sanierung

Erneuert werden vorwiegend technische Einrichtungen wie Pumpen, Kompressoren, Steuerungseinheiten und Filtermaterialien. Bei Betonbecken wird in den meisten Fällen eine Betonsanierung durchgeführt, welche mengenmäßig nicht ins Gewicht fällt. Daher werden die jährlichen Flüsse durch Sanierung (Erneuerung und Renovation) im Bereich der Kläranlagen nicht berücksichtigt.

4.3 Kumulierter Materialaufwand

Durch den hohen Anteil an mineralischen Baustoffen in der Wasser- und Abwasserinfrastruktur (bedingt vor allem durch die Rohrbettung) liegt der kumulierte Materialaufwand in der gleichen Größenordnung wie der direkte Materialeinsatz.

Für die untersuchte Wasserinfrastruktur (Talsperren, Wasserwerke, Leitungsnetz, Wasserspeicher) ergibt sich folgender kumulierter Materialaufwand:

Tab. 95: Kumulierter Materialaufwand der Wasserinfrastruktur

in 1.000t		MIT-Koeff. in t/t	MA für Bestand	kum. MA Bestand	jährl. MA Neu- und Ausbau	kum. MA Neu- und Ausbau	jährl. MA Inst.	kum. MA Inst.
mineralische Rohstoffe	Kies/Sand	1,18	423.642	499.898	1.525	1.800		
	Naturstein	1,42	55.458	78.750	144	204		
	Beton	1,33	148.747	197.834	73	97		
	Faserzement	3,22	1.106	3.561				
	Zementmörtel**	1,50	688	1.032	5	8	32	48
	Quarzsand	1,42	893	1.268				
	gesch. Vermiculit*	1,00	62	62				
	Ziegel	2,11	577	1.217				
metallische Rohstoffe	Guss-/ Roheisen**	7,63	8.215	62.680	13	99	24	183
	Stahl un-/niedriglegiert	1,47	2.141	3.147	5	7		
	Stahl hoch-legiert	9,42	1.640	15.449	6	57	42	396
	Kupfer	179,07	12	2.149				
	Zink	21,76	13	283				
Kunststoffe / Sonstige	PVC	3,47	641	2.224				
	PELD	2,49	50	125			3	7
	PEHD	2,52	243	612	5	13	9	23
Summe gesamt			644.128	870.292	1.776	2.284	110	657

Quelle: Eigene Berechnungen auf Basis von Wuppertal Institut 2003, *= kein MIT-Koeffizient vorhanden, **= MIT-Koeffizient geschätzt

Die MIT-Koeffizienten wurden der Datenbank des Wuppertal Instituts (Wuppertal Institut 2003) entnommen. In einigen Fällen musste der MIT-Wert gesondert berechnet oder geschätzt werden. So wurde zur Ermittlung des MIT-Wertes für die Zementmörtel-Auskleidungen der Trinkwasser-Rohre ein Gemisch aus drei Teilen Sand und einem Teil Hochofenzement zugrunde gelegt und der entsprechende Durchschnittswert von 1,5 angewendet. Für Faserzement (Asbestzementrohre im Leitungsnetz) wird wiederum in der Regel Portlandzement verwendet. Der MIT-Wert für die Gusseisen-Rohre wurde über den Wert für primäres Roheisen abgeschätzt.

Insgesamt liegt der kumulierte Materialaufwand für Neubau und Erweiterung um ein Drittel über dem direkten Materialeinsatz, wohingegen die indirekten Ressourcenflüsse

für Erneuerung und Instandhaltung den Gesamtaufwand um mehr als das Fünffache erhöhen, bedingt durch den Einbau von Stahl- und Gusseisenrohren im Leitungsnetz.

Im Gegensatz zur Abwasser-Infrastruktur gibt es in der Trinkwasserversorgung einen vergleichsweise hohen Bestand an hoch-legiertem Stahl in den Leitungsnetzen, welcher durch die Herstellung in der Hochofenroute einen hohen MIT-Koeffizienten von 9,42 hat. Ebenso erhöht sich der Anteil von Kupfer an den metallischen Rohstoffen im Bestand von 0,1 % auf immerhin 2,7 %. Insgesamt erhöht sich der Anteil der metallischen Rohstoffe am Gesamtmaterialbestand in der untersuchten Wasserinfrastruktur damit von 1,9 % auf 9,3 %. Kunststoffrohre, welche in direkter Konkurrenz vor allem zu Gusseisen-Rohren stehen, haben einen erheblich geringeren MIT-Koeffizienten.

Für die untersuchte Abwasserinfrastruktur (Kanalnetz, Schächte, Regenentlastung, Kläranlagen) ergibt sich folgender kumulierter Materialaufwand:

Tab. 96: Kumulierter Materialaufwand der Abwasserinfrastruktur

in 1.000 t		MIT-Koeff. in t/t	MA für Bestand	kum. MA Bestand	jährl. MA Neu- und Ausbau	kum. MA Neu- und Ausbau	jährl. MA Inst.	kum. MA Inst.
mineralische Rohstoffe	Kies/Sand	1,18	734.897	867.178	11.449	13.510		0
	Kalksandstein	1,28	3.571	4.571	4	5		0
	Beton	1,33	326.765	434.597	3.202	4.259	561	746
	Kanalklinker**	2,11	19.631	41.421		0		0
	Zementmörtel**	1,40	5.459	7.643	9	13	2	3
	Glaswolle	4,66	89	415		0		0
	Steinzeug	2,88	18.483	53.231	327	942	77	222
	Flachglas	2,95	7	21		0		0
metallische Rohstoffe	Guss-/ Roheisen	7,34	347	2.648	7	53	1	8
	Stahl	1,47	7.707	11.329	36	53	5	7
	Stahl V4A	17,94	27	484		0		0
	Kupfer	179,07	81	14.505		0		0
	Aluminium	18,98	18	342		0		0
Kunststoffe / Sonstige	PELD	2,49		0	1	2		0
	PEHD	2,52	349	879	37	93	20	50
	PVC-U	3,47	371	1.287	32	111	19	66
Summe gesamt			1.117.802	1.440.552	15.104	19.041	685	1.102

Quelle: Eigene Berechnungen auf Basis von Wuppertal Institut 2003, **= MIT-Koeffizient geschätzt

Hier wurde für den Zementmörtel ein etwas geringerer MIT-Wert von 1,4 ermittelt, da der Zementmörtel in den gemauerten Schächten und Kanälen in der Regel aus vier Teilen Sand und einem Teil Zement besteht. Da insbesondere für die Kläranlagen keine Differenzierung der eingesetzten Stähle vorlag, wurde der geringere MIT-Koeffizient für die Elektrolichtbogenroute gewählt. Für Kupfer und Aluminium wurden jeweils die Werte für den Produktionsmix zugrunde gelegt. Des Weiteren lagen keine Differenzierungen nach der Art der Kunststoffe insbesondere in der Kanalisation

vor. Hier wurde auf der Grundlage von Frank et al. (2006) ein Verhältnis von 1:1 von PEHD und PVC-U angesetzt.

Insgesamt erhöhen die indirekten Ressourcenflüsse den Gesamtaufwand im Vergleich zu den direkten Materialflüssen im Bestand und für Neubau und Erweiterung um ein Drittel, für Erneuerung und Instandhaltung um knapp zwei Drittel, bedingt insbesondere durch den Einbau von Steinzeug- und Kunststoffrohren.

4.4 Zusammenfassung Wasserinfrastruktur

Für die Ermittlung der Materialbestände und jährlichen Materialflüsse konnte zum Teil auf bestehende Materialkoeffizienten aus anderen Untersuchungen zurückgegriffen werden, welche teilweise im Hinblick auf die deutschen Verhältnisse modifiziert wurden. Ergänzt wurden diese Daten um umfangreiche Recherchen in technischen Regelwerken, Produkthandbüchern, Fachliteratur und Expertengesprächen. Damit konnte insgesamt in den meisten Fällen eine belastbare Datengrundlage geschaffen werden. Jedoch konnten gerade die jährlichen Flüsse für Erneuerung und Instandhaltung häufig nicht belastbar ermittelt werden. Damit ist eine Vergleichbarkeit der ermittelten jährlichen Flüsse gerade mit anderen Infrastruktursystemen schwierig.

Bezüglich der in der Wasser- und Abwasserinfrastruktur gebundenen Materialien ist auch hier die herausragende Bedeutung der mineralischen Baustoffe hervorzuheben, welche knapp 99 % der insgesamt knapp 1,8 Mrd. Tonnen Baustoffe ausmachen. Dies liegt vorwiegend an der Rohrbettung der Leitungsnetze. Auch Beton (und hier vorwiegend Stahlbeton) spielt mit knapp 500 Mio. Tonnen bei der Konstruktion vieler Anlagen der Wasser- und Abwasserinfrastruktur eine große Rolle. Im Gegensatz dazu spielen Metalle (rund 20 Mio. Tonnen, davon überwiegend Stahl und Eisen) und Kunststoffe (< 2 Mio. Tonnen) nur eine untergeordnete Rolle. Als Hauptwerkstoffe im Leitungsbau sind sie zudem meist unterirdisch verbaut und damit schlecht zugänglich.

Tab. 97 gibt einen Überblick über die in Wasserinfrastrukturen gebundenen Materialmengen:

Tab. 97: Übersicht Materialbestand der Wasser- und Abwasserinfrastrukturen

in 1.000 t		Wasser	Abwasser	Gesamt
mineralische Rohstoffe	Kies/Sand	423.642	734.897	1.158.539
	Quarzsand	893		893
	Naturstein	55.458		55.458
	Kalksandstein		3.571	3.571
	gesch. Vermiculit	62		62
	Beton	148.747	326.765	475.512
	Kanalklinker		19.631	19.631
	Ziegel	577		577
	Faserzement	1.106		1.106
	Zementmörtel	688	5.459	6.147
	Steinzeug		18.483	18.483
	Flachglas		7	7
	Glaswolle		89	89
metallische Rohstoffe	Guss-/ Roheisen	8.215	347	8.562
	Stahl	3.781	7.734	11.515
	Kupfer	12	81	93
	Zink	13		13
	Aluminium		18	18
Kunststoffe / Sonstige	PVC / PE	934	720	1.654
Summe mineralische Rohstoffe		631.173	1.108.902	1.740.075
Summe metallische Rohstoffe		12.021	8.180	20.201
Summe Kunststoffe / sonstige		934	720	1.654
Summe gesamt		644.128	1.117.802	1.761.930

Quelle: Eigene Berechnungen, Details in den vorangegangenen Tabellen

Die Veränderung des aktuellen Materialbestandes (Tab. 98) resultiert im Wesentlichen aus Neubau- bzw. Rückbauaktivitäten und zu einem geringeren Maße aus unterschiedlichen Sanierungsverfahren.⁵⁷ Angesichts der lückenhaften Datengrundlagen sind die ermittelten jährlichen Materialflüsse mit etwa 1 % des Gesamtmaterialbestandes wahrscheinlich unterschätzt. Dies gilt insbesondere für durch Instandhaltung induzierte Materialflüsse. Durch den Einsatz neuer Materialien (verstärkte Verwendung von Kunststoff) liegt der Materialinput bei Erneuerungs-Aktivitäten im Kanal- und Leitungsnetz sogar unter dem Material-Output. Bei der Interpretation der Ergebnisse ist zu berücksichtigen, dass eine Annäherung an tatsächliche Erneuerungsraten (statt erforderlicher Erneuerungsraten) die Grundlage für die Berechnungen stellt. Gerade im Bereich der Wasser- und Abwasserinfrastruktur wird der Investitionsbedarf in die Instandhaltung als sehr hoch eingeschätzt, was steigende jährliche Materialflüsse nach sich ziehen würde. Die Angaben über den Investitionsbedarf schwanken allerdings stark. Während Kluge et al. (2003) von 150 bis 250 Mrd. Euro sprechen, kommen Rei-

⁵⁷ In der Sanierung unterscheiden wir Reparatur, Instandhaltung und Erneuerung.

denbach et al. (2008) nur auf einen kommunalen Investitionsbedarf von 65 Mrd. Euro für Ersatzinvestitionen im Wasser- und Abwasserbereich.

Tab. 98: Jährliche Flüsse der Wasser- und Abwasserinfrastrukturen

		Neubau / Erweiterung			Gesamt Neubau	Erneuerung / Instandhaltung				Gesamt Inst.
		Wa In	Abw In Out			Wa In	Out	Abw In Out		
in 1.000t										
mineralische Rohstoffe	Kies/Sand	1.525	11.449		12.974					0
	Quarzsand				0					0
	Naturstein	144			144					0
	Kalksandstein		4	21	4					0
	gesch. Vermiculit				0					0
	Beton	73	3.202	612	3.275		6	561	650	561
	Kanalklinker				0				88	0
	Ziegel				0					0
	Fasermörtel				0		12			0
	Zementmörtel	5	9		14	32	7	2	24	34
	Steinzeug		327		327			77	83	77
	Flachglas				0					0
	Glaswolle				0					0
metallische Rohstoffe	Guss-/ Roheisen	13	7		20	24	80	1	1	25
	Stahl	11	36	28	47	42	16	5		47
	Kupfer				0					0
	Zink				0					0
	Aluminium				0					0
Kunststoffe	PVC / PE	5	70		75	12	7	39	2	51
Summe mineralische Rohstoffe		1.747	14.991	633	16.738	32	25	640	845	672
Summe metallische Rohstoffe		24	43	28	67	66	96	6	1	72
Summe Kunststoffe / sonstige		5	70	0	75	12	7	39	2	51
Summe gesamt		1.776	15.104	661	16.880	110	128	685	848	795

Quelle: Eigene Berechnungen

5 Energieinfrastruktur

Der Bereich Energieinfrastrukturen teilt sich auf in Infrastrukturen zur Erzeugung von Energie und zu deren Verteilung. Als Verteilnetze werden in dieser Studie die Strom-, Gas- und Wärmenetze betrachtet. Energieerzeugungsinfrastrukturen sind in erster Linie Stromerzeugungsinfrastrukturen. Auf Grund ihrer relativ geringen Bedeutung werden die norddeutschen Einrichtungen zur Förderung und Aufbereitung von Erdgas nicht mit in die Untersuchung aufgenommen. Weiterhin können Energieerzeugungseinrichtungen danach unterschieden werden, ob sie Energie aus erneuerbaren oder nicht erneuerbaren Energiequellen erzeugen. Für Infrastrukturen, die auf nichterneuerbaren Energiequellen basieren, werden für die Abschätzungen der gespeicherten Materialmengen im Bestand und der jährlichen Materialflüsse für Ausbau, Erneuerung und Instandhaltung a) konventionelle Kraftwerke mit fossilen Energiequellen und b) Kernkraftwerke untersucht. Für erneuerbare Energiequellen werden Wasserkraft-, Windkraft- und Biogasanlagen in die Abschätzung der Materialbedarfe und jährlichen Materialflüsse einbezogen. Photovoltaik, Geothermie und andere Anlagen mit erneuerbaren Energiequellen werden auf Grund ihrer geringen Bedeutung für die deutsche Energieerzeugung nicht mit untersucht.

Die Infrastrukturbestandteile unterscheiden sich dabei deutlich hinsichtlich ihrer Wachstumsdynamik, ihrer Altersstruktur und der zur Abschätzung notwendigen Datengrundlage. Während erneuerbare Energiesysteme wie Biogas und Windkraft in ihren jährlichen Flüssen stark durch Neubau und Erweiterung bestimmt sind, sind konventionelle Kraftwerke durch unregelmäßige Modernisierung oder Stilllegung (Kernkraftwerke) oder auf Grund ihrer Altersstruktur gerade am Anfang eines neuen Investitionszyklus stehend geprägt. Die Neubauten konventioneller Kraftwerke und Freileitungen sind zudem mehrjährige Bauprojekte, die durch langfristige Genehmigungsverfahren und lokale Widerstände mitunter jahrelanger Verzögerung unterliegen. Für das Leitungsnetz werden zwar höhere regelmäßige Aufwendungen für Erneuerung und Instandhaltung erwartet. Es liegen jedoch nur sehr wenige Daten vor, die eine konkrete Abschätzung der unterschiedlichen Investitionsmaßnahmen und ihrer stofflichen Ausprägung ermöglichen. Zumeist liegen nur monetäre Investitionszahlen vor, die unter bestimmten Annahmen (siehe weiter unten im Text) als Grundlage einer vorläufigen Abschätzung verwendet wurden.

Der geringe Zuwachs der Fern- und Nahwärmenetze, die generell sehr schlechte Datenlage in diesem Bereich und fehlende grundlegende Informationen wie Investitionen oder Aufwendungen für Instandhaltung führen dazu, dass für die Wärmenetze keine jährlichen Flüsse für Ausbau, Erneuerung und Instandhaltung abgeschätzt werden.

Aufgrund der umfangreicheren und belastbareren Datenlage wird zunächst die Infrastruktur der Energienetze und anschließend die der Energieerzeugung dargestellt.

5.1 Energieverteilung

5.1.1 Elektrizitätsnetz

Laut Bundesnetzagentur (BNA) (2009) hatte das Stromnetz in Deutschland im Jahr 2008 eine Gesamtlänge von 1,72 Mio. km. Davon waren 1,11 Mio. km Niederspannungs- (NS), 499.000 km Mittelspannungs- (MS) und 113.000 km Hochspannungsnetz (HS). Nach verschiedenen Veröffentlichungen ist der Kabelanteil im Hochspannungsbereich etwas über 5.000 km lang. Laut Steinbrich (2005) betrug der Kabelanteil im MS- und NS-Netz insgesamt für das Jahr 2002 71 %, davon 65 % im Bereich MS und 81 % im Bereich NS. Durch Übertragen dieser Verhältnisse auf die Daten des Jahres 2008 konnten die Anteile an Freileitung bzw. Kabel an den verschiedenen Netzebenen in Deutschland abgeschätzt werden. Diese Daten unterscheiden sich von den Schweizer Netzdaten in Frischknecht et al. (2007), deren Anteil an Freileitung im MS-Bereich deutlich höher liegt.

Tab. 99: Stromnetz in Deutschland im Jahr 2008

	Kabel in km	Freileitungen in km	Kabel in %	Freileitungen in %	Netz insgesamt
Niederspannung	888.046	222.011	80,00	20,00	1.110.057
Mittelspannung	344.541	154.794	69,00	31,00	499.335
Hochspannung	5.000	70.000	6,50	91,03	76.900
Höchstspannung	100	40.000	0,28	113,02	35.391
Total Höchstspannung	5.100	110.000	4,54	97,96	112.291
Insgesamt	1.237.687	486.805	71,89	28,27	1.721.683

Quelle: Eigene Berechnung auf Grundlagen von BNA (2004) und Steinbrich (2005)

5.1.1.1 Die Netzstruktur des deutschen Stromnetzes

Höchstspannungsnetz

Das Höchstspannungsnetz in Deutschland umfasst 35.391 km Stromkreislänge (VDN 2007). Es wird von den vier Betreibern Transpower (ehemals E.ON), EnBW, Amprion (ehemals RWE) und 50Hertz Transmission (ehemals Vattenfall) betrieben. Zum Höchstspannungsnetz zählen sowohl die 380 kV- als auch die 220 kV-Leitungen. Die 220 kV-Leitungen werden mittlerweile häufig zu 380 kV-Leitungen ausgebaut. Neben Freileitungen gibt es in einigen Großstädten Deutschlands noch zusammen rund 100 km Erdkabel im Höchstspannungsnetz.

In der Regel werden auf einer Höchstspannungsleitung zwei Drehstromkreise pro Mast geführt, mitunter auch bis zu 6 Stromkreise pro Freileitungsstrecke. Zu jedem Stromkreis gehören drei Phasen, die im Spannungsbereich 380 kV als 3er oder 4er Bündel mit Aluminium/Stahl (Al/St)-Verbundseil geführt werden. 220 kV-Freileitungen werden häufig als 2er Bündel geführt. Zur Bestimmung der Anzahl der Masten findet man in der Literatur verschiedene Angaben. Die Spannweite im Höchstspannungsnetz wird je nach Masthöhe und Spannungsebene im Höchst- und Hochspannungsnetz mit 300 bis 450 m angegeben (Oswald 2005). Auch bei den Masten ist zwischen verschiedenen Funktionstypen zu unterscheiden. Es gibt vor allem Tragmasten und Abspannmasten, aber auch noch End- und Abzweigmas-

te. Jeder fünfte bis fünfzehnte Mast ist ein Abspannmast (Oswald 2005) und dieser ist um etwa 40 % schwerer als ein Tragmast (Tryfonidou, 2006). Die häufigste in Deutschland anzutreffende Mastart ist der Donaumast: Die Mastart verteilt die Leitungen über zwei Ebenen, um eine geringere Trassenbreite zu erwirken.

Neben dem Mast gibt es als weitere Bauteile Isolatoren und ein Erdseil. Die Isolatoren im Höchstspannungsnetz sind Langstabilisatoren aus Porzellan, Ketten aus Glas oder Porzellanlankappe. 220 kV-Netze sind häufig durch zwei Langstabilisatoren und das 380 kV-Netz durch drei Langstabilisatoren gekennzeichnet. Das Erdseil, welches als Blitzableiter dient, ist wie die Leitungen selbst ein Al/St-Verbundseil und weist einen ähnlichen Querschnitt auf. Des Weiteren steht der Mast auf einem Betonfundament, das zumeist als ein so genanntes Stufenfundament ausgeführt wurde.

Das Kabelnetz im Höchstspannungsnetz umfasst 100 km und ist vornehmlich an den Orten zu finden, an denen Freileitungen baulich schwierig umzusetzen sind, z.B. in Innenstädten. Kabeltrassen in diesem Spannungsbereich gelten als zu aufwändig und teuer und sind daher nur in Ausnahmefällen vorzufinden. Darüber hinaus ist die Wärmeentwicklung bei Erdkabeln problematisch. Neben dem eigentlichen Kabel müssen hier immer wieder Verbindungsmuffen gesetzt werden, da aufgrund der Stärke des Kabels nur eine bestimmte Kabellänge am Stück transportiert werden kann. Teilweise werden Kabel in begehbaren Kanälen unter der Erde verlegt (z.B. in Berlin), wofür ein hoher stofflicher Aufwand erforderlich ist.

Hochspannungsnetz

Das Hochspannungsnetz (HS-Netz) umfasst alle Leitungen und Kabel im Bereich 60 kV bis 220 kV. In Deutschland hat das Hochspannungsnetz eine Länge von 76.900 Stromkreiskilometern. Es umfasst sowohl Freileitungen als auch Kabelnetze. Überwiegend findet man aber auch in dieser Spannungsebene Freileitungen. Der Aufbau der Freileitungen im Hochspannungsnetz ist vergleichbar mit der des Höchstspannungsnetzes. Allerdings sind die Masten im 110 kV-Netz deutlich kleiner als im Bereich der Höchstspannung. Zusätzlich bestehen 110 kV-Freileitungen zumeist nur aus einem Al/St-Seil und nicht aus Bündeln.

Mittelspannungs- und Niederspannungsnetz

Das Mittelspannungsnetz (MS-Netz) in Deutschland hat eine Gesamtlänge von 499.335 km. Es umfasst die Spannungsstufen von 0,5 kV bis unter 60 kV und dient zur ländlichen und städtischen Verteilung und zum Anschluss von Unternehmen mit hohem Strombedarf. Weiterhin werden auch Windenergieanlage zum Teil über MS-Leitungen an das Netz angeschlossen. Es kann sowohl als Freileitung als auch in Kabelbauweise verlegt sein. Die genaue Verteilung zwischen Freileitung und Kabel hängt zum Teil von regionalen und topographischen Gegebenheiten ab. Wir schätzen den Anteil an Freileitungen im MS-Netz auf 31 % (Tab. 99).

Das Niederspannungsnetz mit einer Spannungsebene $<0,5$ kV weist die größte Netzlänge in Deutschland auf: die 1.110.057 km NS-Leitungen sind zu großen Teilen als Kabelleitungen ausgeführt. Im ländlichen Bereich kann es aber immer noch NS-Kabel in Form von Freileitungen an Holz- oder Betonmasten geben. In unseren Abschätzungen zum Materialbedarf im NS-Netz gehen wir von 20 % Freileitungen aus. In den nächsten Jahren wird dieser Anteil vermutlich weiter sinken.

5.1.1.2 Materialbestand der Stromnetze

Von Frischknecht et al. (2007) wurde der spezifische Materialverbrauch für Kabelleitungen zu großen Teilen übernommen (Tab. 100). Allerdings gehen Frischknecht et al. davon aus, dass alle Erdkabel zu 100 % aus Kupferleitern bestehen. Es liegen zwar keine genauen Zahlen über den Anteil von Aluminiumkabeln im NS- und MS-Netz vor. Nach Konsultation von Experten bei verschiedenen Netzbetreibern wird in dieser Studie im NS-Netz mit einem Anteil von 65 % Aluminium-Leitern und 35 % Kupfer-Leitern, sowie im Kabelnetz des MS-Netzes mit einem Anteil von 20 % Aluminiumleiter und 80 % Kupferleiter gerechnet. Hochspannungskabel sind dagegen zu 100 % aus Kupfer-Leitern gefertigt. Weiterhin wurde der Kupferbedarf pro km NS-Netz von 1,5 auf 2,2 t/km erhöht.⁵⁸ Da NS-Kabel häufig 4-adrig geführt werden, ist der Kupferanteil pro km laut Herstellerangaben (z.B. Helukabel) mit 1.350 bis 5.760 kg/km je nach Leiterdurchmesser deutlich höher als bei Frischknecht et al. (2007) angegeben. Für MS- und HS-Kabel ist zu beachten, dass jede Phase als eigenes Kabel verlegt wird, so dass pro Stromkreis drei Kabel notwendig sind.

Erdkabel werden, um Schäden zu vermeiden, in der Regel in ein Sandbett verlegt. Für die Abschätzung des Bedarfs an Sand wird im NS-Netz ein Sandbett mit 35 cm Höhe und Breite angenommen. Dies ergibt rund 0,123 m³ pro Meter Kabellänge, multipliziert mit einem Schüttgewicht von 1.900 kg/m³ ergibt dies 235 kg/m. Ausgehend von diesem Wert wurde der spezifische Materialkoeffizient für die Sandbettung im MS-Netz auf 300 kg/m und im HS-Netz auf 600 kg/m hochgerechnet.

Tab. 100: Spezifischer Materialbedarf Erdkabel in t/km

	NS-Netz	MS-Netz	HS-Netz
	35 % Haftmasse- und 65 % Kunststoffkabel	80 % Haftmasse- und 20 % Kunststoffkabel	50 % Haftmasse-, 40 % Kunststoff- und 10 % Gaskabel
	t/km	t/km	t/km
Kupfer	2,2	2	6,8
Aluminium	1,7	0,4	
Isolieröl/Haftmasse	0,1	0,15	1
PVC	0,9	0,6	1
PE	0,1	0,6	1
Stahlblech	0,1	0,1	
Stahlrohr*	0,3	1	2
Blei	0,3	0,8	2
Sand	235	300	600

Quelle: Überwiegend Frischknecht et al. (2007), Sand sowie Materialbedarf für Kupfer im NS-Netz: eigene Abschätzung. *Annahme: 80 % der Kabel sind erdverlegt, 20 % stahlrohrverlegt

Für Freileitungen wird zu großen Teilen ebenfalls der spezifische Materialbedarf aus Frischknecht et al. (2007) genutzt. Allerdings wird davon ausgegangen, dass ein Teil der Freileitungen nicht mehr blank geführt wird, sondern häufig als Kabel am Mast angebracht ist. Es wird daher für 30 % der Freileitungen im NS- und MS-Netz ein Materialbedarf für PE-Mantel angenommen. Zusätzlich wird angenommen, dass auch im NS-Freileitungsnetz der Aluminiumanteil höher ist als bei Frischknecht et al. (2007). Analog zum MS-Netz wird für das NS-

⁵⁸ Als typisches NS-Kabel mit Kupferleiter wird ein NYCWY-J 0,6/1kV 4x50 sm/25 verwendet, für Kabel mit Aluminiumleiter werden die Werte eines NS NAYY-J 4X150 se verwendet.

Netz der Materialbedarf mit einer 50/50-Verteilung zwischen Kupfer- und Aluminiumleiter hoch gerechnet.

Tab. 101: Spezifischer Materialbedarf Freileitungsdraht

	Annahme	Leiterlänge in km	Kupfer in t/km	Al-Legierung in t/km	Stahl in t/km	PE in t/km
NS	50 % Kupfer und 50 % Al-Leiter	888.046	0,5	0,193		0,1
MS	50 % Kupfer und 50 % Al/St-Leiter	464.382	1,5	0,260	0,123	0,1
HS	100 % Al/St-Leiter)	780.000		0,727	0,271	
Erdungsleiter HS-Mast	100 % Al/St-Leiter)	55.000		0,727	0,271	

Quelle: Eigene Berechnung bzw. Frischknecht et al. (2007)

Die enormen Leiterlängen ergeben sich aus der Multiplikation der Stromkreis-Kilometer mit Annahmen bezüglich der Leiter pro Stromkreis bzw. Bündelungen. Für NS-Freileitungen werden vier Leiter pro Stromkreis und für MS- und HS-Freileitungen drei Leiter pro Stromkreis verwendet. Für den Materialbedarf des HS-Leiters wird ein Al/St-Seil mit der Konfiguration AL/St-Seil 265/35 angenommen (Aluminium-Durchmesser 265 mm und Stahl-Durchmesser 35 mm). Für 110 kV- und 220 kV-Freileitungen wird eine Zweier-Bündelung unterstellt, bei 380 kV-Freileitungen eine 4er-Bündelung. Im Jahr 2000 bestand das Höchstspannungsnetz zu rund der Hälfte jeweils aus 220 kV- und 380 kV-Freileitungen. Es werden also 20.000 km als 380 kV- und 20.000 km als 220 kV-Netz gerechnet. Für MS-Freileitungen wird ein typisches Aluminium/Stahl-Seil mit den Maßen 95/15 angenommen, bzw. ein Kupfer-Seil mit 100 mm Durchmesser. Für NS-Freileitungen wird ein Al-Seil mit 70 mm Durchmesser bzw. ein Kupfer-Seil mit 35 mm Durchmesser zur Berechnung des Materialbedarfs verwendet.

Angaben zur Verteilung von Mastarten nach Materialgruppe liegen nicht vor. Die schweizerischen Daten von Frischknecht et al. (2007) mit ihrem hohen Anteil an Holzmasten können nicht auf Deutschland übertragen werden, da der hohe Holzanteil topographisch begründet ist.⁵⁹ Die Abschätzung des Materialbedarfs für Freileitungsmasten wurde über die Spannweite der einzelnen Mastkategorien je Netzebene, das Gewicht der einzelnen Mastarten sowie über Annahmen hinsichtlich der Verteilung einzelner Bauweise vorgenommen. Zunächst wurde über die Spannweite die Anzahl der Masten pro km Freileitungsstrecke abgeschätzt (Tab. 102).

⁵⁹ In bergigen Regionen wie der Schweiz werden zum einen mehr Freileitungen verwendet als in Deutschland und zum anderen werden in topographisch anspruchsvollen Regionen mehr Holzmaste im NS- und MS-Netz verwendet, da dieser einfacher zu erstellen sind.

Tab. 102: Dimensionierung und Anzahl an Freileitungsmasten

		Masthöhe in m	Spannbreite in m	Masten pro km
HS (Stahlfachwerk)	380 kV	70	450	2
	220 kV	45	350	3
	110 kV	35	250	4
MS+NS	Beton	10-20	150	7
	Holz	10-20	60	17
	Stahlrohr	10-20	150	7

Quelle: Eigene Berechnung

In einem weiteren Schritt wurden die Massen der einzelnen Mastarten pro Spannungsebene ermittelt. Dazu wurden Herstellerangaben (persönliche Kommunikation mit Eurocoles und Wiegel Parey Productions) verwendet. Aus der Anzahl der Masten pro km und dem Gewicht pro Mast kann der spezifische Materialkoeffizient für einen km Freileitungsmasten ermittelt werden. Freileitungsmasten im Hochspannungsnetz sind über Betonfundamente im Boden verankert. Es wird üblicherweise ein unbewehrtes Stufenfundamente verwendet, bei dem jeder Fuß des Stahlfachmastes einzeln durch ein Fundament gesichert ist. Nur in Ausnahmen kommen Plattenfundamente oder Pfahlfundamente mit Stahlbewehrung zum Einsatz. In der Dissertation von Tryfonidou (2006) wird für einen 380 kV-Freileitungsmast ein Fundament mit 60 m³ Beton angegeben. Dies wäre je 380 kV-Mast eine Betonmenge von 144 Tonnen. Ravenmark/Normark (2005) geben für das Betonfundament eines Hochspannungsmasts sogar einen Wert von 376 Tonnen an. Diese Werte scheinen für die Mehrzahl der Freileitungsmasten deutlich zu hoch. Nach eigenen Abschätzungen hat jedes Stufenfundament einen Durchmesser von ca. 1,50 m und einen Tiefe von 4 m. Dafür würden pro Fundament ca. 7 m³ Beton benötigt, an allen vier Mastfüßen zusammen also 28 m³. Berücksichtigt man ein Betongewicht von 2.400 kg/m³, ergibt sich ein Gesamtgewicht eines Mastfundaments von rund 67,2 Tonnen. Wir haben den Wert für die Abschätzung auf 70 Tonnen aufgerundet.

Tab. 103: Gewicht pro Freileitungsmast

		Masthöhe in m	Mastgewicht in t
HS (Stahlfachwerk)	380 kV	70	15
	220 kV	45	10
	110 kV	35	5
MS	Beton	20	3
	Holz	20	0,5
	Stahlrohr	20	4
NS	Beton	12	1,5
	Holz	12	0,24
	Stahlrohr	12	0,8
Fundament (in t)			70

Quelle: Eigene Berechnung zum Teil basierend auf Herstellerangaben

Im MS-Netz wird von einer Verteilung von 20 % Beton-, 20 % Holz- und 60 % Stahlrohrmasten ausgegangen. Im NS-Netz lautet die Annahme: 40 % Beton-, 40 % Holz- und 20 % Stahlrohrmasten. Hochspannungs-Freileitungen werden komplett an Stahlgittermasten montiert. Zudem sind an HS-Masten meist zwei bis drei Stromkreise gleichzeitig je Freileitungstrecke installiert. Für die Abschätzung des Materialbedarfs wird daher mit jeweils zwei

Stromkreisen pro Freileitungsstrecke HS-Netz gerechnet. Die Daten für die Betonfundamente sind unterschätzt, da nur Fundamente für Hochspannungsmasten eingerechnet wurden und keine Angaben über die Betonmengen bei NS- und MS-Freileitungen vorliegen.

Tab. 104: Materialbedarf für den Bestand an Freileitungsmasten

	Mastart	Gewicht pro Mast in t	Freileitungslänge in km	Anzahl Masten pro km	Anzahl der hochgerechneten Masten Stück	gesamter Materialbedarf in t
HS	Stahl-Fachwerk	10	110.000	3	165.000	1.650.000
MS	Beton	3	30.959	7	216.711	650.134
	Holz	0,5	30.959	17	526.299	263.150
	Stahlrohr	4	92.876	7	650.134	2.600.537
NS	Beton	1,5	88.805	7	621.632	932.448
	Holz	0,24	88.805	17	1.509.678	362.323
	Stahlrohr	0,8	44.402	7	310.816	248.653
Betonfundament (nur Stahl-Fachwerk im HS)		70			165.000	11.550.000
Summe					4.309.858	

Quelle: Eigene Berechnungen zum Teil basierend auf Herstellerangaben

Schließlich wurde noch der Materialbedarf für die rund 560.000 Transformatoren hochgerechnet. Für die Studie werden die Werte aus Frischknecht et al. (2007) verwendet und auf die Anzahl der deutschen Transformatoren angewandt. Weitere Bereiche wie z.B. der Materialbedarf für gasisolierte Schaltanlagen oder der Gebäudeaufwand für Transformatoren, Verteil- und Schaltanlagen wurden nicht abgeschätzt. Überschlägige Zahlen zum Schweizer Netz finden sich dazu bei Frischknecht et al. (2007).

Tab. 105: Spezifischer Materialbedarf Transformatoren

	Anzahl an Transformatoren	Öl pro Anlage und total in t	Kupfer pro Anlage und Total in t	Stahl pro Anlage und Total in t	Stahlblech pro Anlage und Total in t
Leistung < 2,5 MVA	557.700	1	0,6	1,5	0,8
Gesamt NS-Netz		557.700	334.620	836.550	446.160
Leistung 2,5 - 50 MVA	7.500	10	6	15	9
Leistung > 50 MVA	1.100	20	15	30	20
Gesamt MS-Netz		97.000	61.500	145.500	89.500

Quelle: Eigene Berechnung auf Grundlage von Frischknecht et al. (2007)

Der gesamte Materialbestand im Bereich Stromnetz kann Tab. 106 entnommen werden.

Tab. 106: Materialbestand Stromnetz

		NS in 1.000 t	MS in 1.000 t	HS in 1.000 t	Insgesamt in 1.000 t
Kabel	Kupfer	684	1.654	104	2.442
	Aluminium	981	83		1.064
	Isolieröl/Haftmasse	89	155	15	259
	PVC	799	620	15	1.435
	PE	89	620	15	724
	Stahlblech	89	103		192
	Stahlrohr	53	276	31	360
	Blei	266	827	31	1.124
	Sand	166.953	82.690	2.448	252.090
Freileitungen	Kupfer	222	348		570
	Aluminium	86	60	607	753
	Stahl		29	226	255
	PE	27	14		41
Freileitungsmasten	Stahl-Fachwerk			1.650	1.650
	Stahlrohr	249	2.601		2.849
	Beton	932	932		1.865
	Holz	362	362		725
Fundament	Beton			11.550	11.550
Transformatoren	paraffinbasierte Mineralöl bzw. Silikonöl	558	97		655
	Kupfer	335	62		396
	Stahl	837	146		982
	Stahlblech	446	90		536

Quelle: Eigene Berechnung

5.1.1.3 Jährlicher Materialbedarf für Ausbau und Erneuerung des Stromnetzes

Die Datensituation zum Zustand des Stromnetzes sowie zu Ausbau bzw. Instandsetzungsmaßnahmen ist unzureichend. Die wenigen belastbaren Daten, die vorhanden sind, beziehen sich auf den Anstieg der Netzlängen sowie die Investitionen in das Stromnetz. So belaufen sich die Investitionen der Stromwirtschaft in das Stromnetz laut BDEW (2008b) im Zeitraum 1999 bis 2007 auf durchschnittlich 2,38 Mrd. Euro pro Jahr. Die Bundesnetzagentur kommt in ihrem Monitoringbericht von 2009 auf Investitionszahlen für Neubau/Ausbau/Erweiterung sowie Erhalt/Erneuerung für 2007 von 2,63 Mrd. Euro und für 2008 auf 3,134 Mrd. Euro. Diese Zahlen decken die vier großen überregionalen Netzbetreiber (ÜNB) und 691 der 862 registrierten Verteilernetzbetreiber (VNB)⁶⁰ ab. Zusätzlich wurden von den ÜNBs und den VNBs rund 3,36 Mrd. Euro (2007) bzw. 3,43 Mrd. Euro (2008) an Aufwendungen in die drei Kategorien Neubau/Ausbau/Erweiterung, Erhalt/Erneuerung und Wartung/Instandhaltung der Stromnetze investiert (Tab. 108).

⁶⁰ Von 862 Verteilernetzbetreibern haben sich 691 am Monitoring beteiligt. Die beteiligten Unternehmen decken 97 % des Marktes ab.

Tab. 107: Investitionen der Netzbetreiber in das Stromnetz 2007 und 2008

	2007					2008				
	Investitionen		Aufwendungen			Investitionen		Aufwendungen		
in Mio. Euro	Neubau Ausbau Erweiterung	Erhalt Erneuerung	Neubau Ausbau Erweiterung	Erhalt Erneuerung	Wartung Instandhaltung	Neubau Ausbau Erweiterung	Erhalt Erneuerung	Neubau Ausbau Erweiterung	Erhalt Erneuerung	Wartung Instandhaltung
ÜNB*	398	105	39	93	248	595	146	6	74	173
VNB*	1.179	948	202	1.101	1.678	1.260	1.133	177	1.093	1.911

Quelle: Eigene Berechnungen; *ÜNB: Überegonale Netzbetreiber, VNB: Verteilernetzbetreiber

Es liegen keine Angaben über die Art der Investitionen vor. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass das Hochspannungsnetz (HS-Netz) immer noch als Freileitungssystem ausgebaut wird. Allerdings gibt es Bestrebungen der Politik, lokaler Initiativen sowie betroffener Gemeinden, die Netzbetreiber zu motivieren, zumindest im 110 kV-Bereich Erdkabel einzusetzen. Dies wird von Netzbetreibern mit dem Hinweis auf deutlich höhere Investitionskosten in der Regel abgelehnt. Aus diesem Grund wird hier davon ausgegangen, dass Investitionen im Hochspannungs-Netz ausschließlich in Form von Freileitungen erfolgt sind. Weiterhin wird angenommen, dass Investitionen in Erneuerungen und Erhalt in der Regel mit einem Komplettaustausch der Masten und Leiterseile verbunden sind. So werden z.B. vermehrt 220 kV-Freileitungen durch 380 kV-Leitungen ersetzt und die alten Trassen in diesem Kontext komplett erneuert. Zudem sind als Folge der Mastbrüche im Winter 2005 alle Netzbetreiber von der Bundesnetzagentur (BNA) aufgefordert worden, bis 2015 alle alten Masten aus so genanntem Thomasstahl auszuwechseln, da eine Materialermüdung als Mitursache der Mastbrüche nicht ausgeschlossen werden kann (BNA 2006). Im Bereich des Netzbetreibers Amprion (ehemals RWE Transportnetz) sollen im Jahr 2005 von 42.000 Masten immerhin zwei Drittel aus Thomasstahl bestanden haben. Die drei anderen ÜNB sind davon offenbar weniger betroffen.

Der Abschätzung liegt die Annahme zugrunde, dass die Zuwächse des Hoch- und Höchstspannungsnetzes überwiegend durch die vier ÜNBs erfolgten. Die Investitionen der VNBs wurden jeweils anteilig der Netzlängen der einzelnen Ebenen der VNB-Netze verteilt. Danach werden 3 % der Investitionen der VNBs in HS-Netzen, 28 % in den Mittelspannungsnetzen (MS-Netz) und 69 % in den Niederspannungs-Netzen (NS-Netz) getätigt. Weiterhin erfolgen alle Investitionen im HS-Netz als Freileitungen. Im Bereich des MS-Netzes wird geschätzt, dass Investitionen in den Neubau zu 75 % als Erdkabel ausgeführt werden. Investitionen in den Erhalt und die Erneuerung des MS-Netzes betreffen aufgrund des höheren Wartungsaufwandes wiederum vermehrt Freileitungstrassen. Es wird angenommen, dass die Hälfte der erneuerten Trassen in diesem Zusammenhang von Freileitung auf Erdkabel umgestellt wird. Die Investitionen im Bereich der NS-Netze erfolgen nach unserer Schätzung komplett als Erdverkabelung, sowohl hinsichtlich des Aus- und Neubaus als auch der Erneuerung- und Erhaltungsinvestitionen.

Aus den Zuwachsraten der Netzlängen und den Investitionen in Neu- und Ausbau können für jede Netzebene durchschnittliche Kosten pro km abgeleitet werden. Unter der Annahme, dass Erneuerungs- und Erhaltungsinvestitionen ähnliche Kostenrelationen aufweisen, kann so die Länge der erneuerten Netzlängen ermittelt werden. Die Aufwendungen für Wartung

und Instandsetzung werden hier nicht weiter verfolgt, da unklar ist, wie hoch der eigentliche Anteil für Ersatzmaterialien (z.B. Korrosionsfarbe der Freileitungsmaste) an diesen Aufwendungen ist. In ihrer Größenordnung sollten diese Materialflüsse im Vergleich zu den Materialflüssen durch Neu- und Ausbau sowie Erneuerung und Erhalt zudem eine geringe Bedeutung haben.

Die Netzlängen wurden mit zwei verschiedenen Datensätzen abgeschätzt, die sich allerdings zum Teil deutlich unterscheiden. Mit der ersten Berechnungsmethode wird der Zuwachs der Stromkreis-Kilometer von 2007 auf 2008 aus den Monitoringberichten der BNA als Ausgangslage abgeleitet. Hier besteht allerdings das Problem, dass die Zahl der teilnehmenden Unternehmen am Monitoring nicht in jedem Jahr identisch ist. Während die teilnehmenden VBN im Bericht für das Jahr 2007 (BNA 2008) 92,3 % des gesamten Netto-Elektrizitätsverbrauchs transportierten, entsprach die Teilnehmerzahl im Monitoringbericht 2008 97 % (BNA 2009). Die Zuwächse der Stromkreis-Kilometer werden mit den Daten der Bundesnetzagentur also tendenziell leicht überschätzt. Werden dagegen die durchschnittlichen Zuwächse der Stromkreis-Kilometer der Jahre 1998 – 2008 verwendet (BDEW 2009), sind die Zuwächse im Vergleich zu den Investitionszahlen der Jahre 2007 und 2008 eher zu gering geschätzt. Der Grund liegt in den niedrigeren Investitionszahlen der Jahre 2000 bis 2005, die sich auch in geringeren Zuwachsraten der Stromkreis-Kilometer in diesen Jahren niederschlagen müssten. Die tatsächlichen Zahlen sollten zwischen diesen beiden Rändern liegen.

Tab. 108: Jährlicher Neubau und Erneuerung des Stromnetzes in km

nach Daten der BNA	HS-Netz	MS-Netz	NS-Netz	nach Daten des BDEW	HS-Netz	MS-Netz	NS-Netz
Veränderung 2007 auf 2008 in km	746	7.078	34.874	jährl. Veränderung zw. 1998 und 2008 in km	1.416	2.588	18.194
Investitionen in Ausbau/Neubau/Erweiterung in Mio. Euro	637	378	840	Investitionen in Ausbau/Neubau/Erweiterung in Mio. Euro	637	378	840
Kosten pro km Ausbau/Neubau	853.620	53.400	24.094	Kosten pro km Ausbau/Neubau	449.718	146.044	46.182
Erhalt/ Erneuerung in km	215	6.365	31.359	Erhalt/ Erneuerung in km	408	2.327	16.360

Quelle: Eigene Berechnungen auf Grundlage der Zuwächse der Stromkreiskilometer in BNA (2009 und 2008) bzw. BDEW (2009) sowie Investitionszahlen entnommen dem Monitoringbericht der BNA (2009)

Aus der obigen Tabelle wird ersichtlich, dass sich mit den unterschiedlichen Zuwachsraten der Netzlängen sehr unterschiedliche Kosten für den Ausbau der verschiedenen Netzebenen ergeben. Diese wiederum beeinflussen nach unserer Methode die geschätzte Länge der erneuerten Netzlängen.

Die 850.000 Euro Investitionskosten für einen Kilometer Hochspannungs-Freileitungen (Tab. 108, 2. Spalte, 4. Zeile) entsprechen in etwa den angegebenen Kosten für den Bau einer 380 kV-Freileitung pro km in Paul (2007). Brakelmann (2004) kommt dagegen nur auf Kosten zwischen 300.000 (110 kV) und 450.000 Euro (380 kV) pro Kilometer Freileitung. Die grundsätzliche Übereinstimmung der hier geschätzten Kosten des Ausbaus des HS-Netzes mit den Kostenangaben bei Paul (2007) und Brakelmann (2004) lässt darauf schließen, dass

auch die geschätzten Kosten pro ausgebautem Kilometer MS- und NS-Netz realistische Werte darstellen. Für diese Studie werden die Kostendaten verwendet, die sich aus den durchschnittlichen Netzzuwächsen der Jahre 1998 bis 2008 ergeben (rechte Tabellenhälfte der Tab. 108).

Um die Materialflüsse für Aus- und Neubau und Erneuerung und Erhalt abschätzen zu können, müssen einige Annahmen getroffen werden. Diese orientieren sich an den Verhältnissen der Bestandsschätzung. So wird angenommen, dass die Investitionen im Hochspannungsnetz komplett für Freileitung erfolgten. Weiterhin wird unterstellt, dass der Aus- und Neubau im Mittelspannungsbereich zu 75 % in Kabelbauweise erfolgt. Dementsprechend sind 25 % der Ausbauinvestitionen im MS-Netz als Freileitungen abgeschätzt.

Weitere Annahmen lauten: Bei Erdkabeln sowie MS-Freileitungen bestehen die Leiter je zur Hälfte aus Kupfer und Aluminium. HS-Freileitungen bestehen aus Al/St-Seilen. Es werden typische Leiterquerschnitte je Netzebene verwendet. Die Freileitungsmasten im HS-Netz bestehen zu 100 % aus Stahlfachwerk und wiegen 15 t pro Mast, da unterstellt wird, dass überwiegend in 380 kV-Freileitungen investiert wird. Die Masten im MS-Netz bestehen je zur Hälfte aus Beton und Stahlfachwerk und wiegen 3 t (Beton) bzw. 4 t (Stahl). An HS-Masten werden immer zwei Stromkreissysteme geführt, die als 4er Bündel ausgeführt werden. MS-Freileitungen führen dagegen nur einen Stromkreis ohne Bündelung. MS-Kabel werden als Kabel mit einem Leiter verbaut, in NS-Kabel sind alle Leiter in einem Kabel integriert.

Aus dem jährlichen Ausbau des Stromnetzes um 22.200 km ergeben sich unter Beachtung der oben genannten Annahmen folgende Materialbedarfe für den Aus- und Neubau des Stromnetzes:

Tab. 109: Jährlicher Materialbedarfe für den Aus- und Neubau des Stromnetzes abgeleitet aus den Daten von 1998-2008

		NS in t	MS in t	HS in t	Insgesamt in t
Kabel	Kupfer	20.013	5.840		25.854
	Aluminium	15.465	1.267		16.731
	PE	16.375	3.578		19.953
	Sand	4.275.590	1.746.900		6.022.490
Freileitungen	Kupfer		2.912		2.912
	Aluminium		505	12.868	13.373
	Stahl		239	4.797	5.035
	PE		194		194
Freileitungsmasten	Stahl-		20.381	21.240	41.621
	Beton		27.174		27.174
Fundament	Beton			99.120	99.120

Quelle: Eigene Berechnungen

Die über die Kostenrelationen abgeleiteten Daten der Investitionen in Erneuerung ergeben nach unserer Hochrechnung eine jährliche Instandsetzung von 19.000 km Stromnetz mit Schwerpunkt im NS-Netz (siehe Tab. 110). Bei Investitionen in Erneuerung wird zusätzlich angenommen, dass im HS-Netz zu je 50 % ein Austausch von 220 kV-Freileitungen durch 380 kV sowie ein 1:1-Tausch von 110 kV erfolgt. Hinsichtlich der Erneuerung alter MS-Netze wird geschätzt, dass 50 % der Erneuerung als Austausch Freileitung vs. Kabelleitung erfolgt und 50 % alte Kabelleitungen gegen Neue ersetzt werden. Der Austausch von Freileitungen gegen Kabelleitungen wird vor allem bei regionalen Netzbetreibern vorgenommen, da Ka-

belnetze deutlich weniger wartungsintensiv sind als Freileitungen. Aufgrund der geringen Anteile an Freileitungen im Bestand der NS-Netze bestehen die Erneuerungsinvestitionen geschätzt zu 20 % aus einem Wechsel von Freileitungen zu Kabelleitungen (im ländlichen Raum) und zu 80 % aus der Erneuerung alter Kabelbereiche. In der Erneuerung der MS- und NS-Netze werden also keine neuen Freileitungen mehr erstellt.

Tab. 110: Jährlicher Materialbedarf für die Erneuerung des Stromnetzes, abgeleitet aus den Daten von 1998-2008

		NS in t	MS in t	HS in t	Insgesamt in t
Kabel	Kupfer	18.021	7.002		25.023
	Aluminium	13.906	1.518		15.425
	PE	0	4.290		4.290
	Sand	768.928	1.047.216		1.816.143
Freileitungen	Kupfer				
	Aluminium			2.819	2.819
	Stahl			1.051	1.051
	PE				
Freileitungsmasten	Stahl-			5.103	5.103
	Beton				
Fundament	Beton			14.288	14.288

Quelle: Eigene Berechnungen auf Grundlage der getroffenen Annahmen

Da ein Teil der Freileitungen im NS- und MS-Netz im Rahmen der Erneuerung gegen Kabelleitungen getauscht wird, fällt auch ein Materialbedarf für Sand an. Für Erneuerungen alter Kabelleitungen wird jedoch angenommen, dass die alte Sandbettung wiederverwendet wird.

Durch den Abbruch alter Kabel- und Freileitungen stehen größere Materialflüsse einer Wiederverwertung grundsätzlich zur Verfügung. Während Freileitungen zurückgebaut werden, ist es unklar ob alte Kabelleitungen bei Erneuerungen, die in optimierter Trassenführung erfolgen⁶¹, einfach nur abgeschaltet werden und im Erdreich verbleiben. Über den Umfang solcher abgeschalteten Erdkabel liegen jedoch keine Informationen vor. Würde von einem vollständigen Rückbau der Frei- und Kabelleitungen ausgegangen werden, beliefen sich die Abbruchmengen der Frei- und Kabelleitungen des deutschen Stromnetzes auf folgende Mengen:

⁶¹ Optimierte Trassenführung bedeutet, dass die neue Kabelleitung nicht ausschließlich entlang der vorhandenen Trassenführung erfolgt, sondern Teilbereiche komplett neu verlegt werden.

Tab. 111: Jährliche Menge an Abbruchmaterial aus Frei- und Kabelleitungen im Stromnetz, abgeleitet aus den Daten von 1998-2008

		NS in t	MS in t	HS in t	Insgesamt in t
Kabel	Kupfer	14.397	34.907		49.304
	Aluminium	11.125	698		11.823
	PE	1.309	2.094		3.403
	PVC	11.779	2.094		13.874
	Isolieröl/Haftmasse	1.309	524		
	Blei	3.926	2.793		
Freileitungen	Kupfer		5.236		5.236
	Aluminium		908	1.929	2.837
	Stahl		429	719	1.148
	PE		349		349
Freileitungs- Masten	Stahl-Fachwerk		36.653	3.062	39.714
	Beton		48.870		48.870
Fundament	Beton			115.120	115.120

Quelle: Eigene Berechnungen

5.1.2 Erdgasnetz

Nach Mineralöl ist Erdgas in Deutschland der wichtigste Energieträger. 2006 wurden rund 88,3 Mrd. m³ Erdgas verbraucht und damit fast 23 % des deutschen Primärenergieverbrauchs (E.ON Ruhrgas 2007) und deutlich mehr als Kernenergie (13 %) oder Steinkohle (13 %). Knapp die Hälfte des Wohnungsbestandes in Deutschland wird mit Erdgas beheizt und 11 % der erzeugten Nettostrommenge stammt aus erdgasbetriebenen Kraftwerken, häufig KWK-Anlagen (Kraft-Wärme-Kopplung).

Von den 88 Mrd. m³ Erdgas, die 2006 verbraucht wurden, stammten rund 15 % aus einheimischen Lagerstätten, der Rest wurde importiert. Die drei wichtigsten Importländer für Erdgas sind Russland (35 %), Norwegen (27 %) und die Niederlande (19 %). Weitere wichtige Importländer sind Dänemark und Großbritannien (zusammen 4 %). Das importierte Erdgas wird an 13 Übergabestationen in das deutsche Erdgasnetz eingespeist. Da die in Deutschland geförderten Mengen mit 15 % des Gesamtverbrauches eher gering sind und der Anteil zukünftig wohl noch sinken dürfte, wird in diesem Projekt die Infrastruktur der Erdgasförderung (Gaslagerstätte, Sondenplatz, Gasaufbereitungsanlage etc.) nicht mit erfasst.

5.1.2.1 Struktur des Erdgasnetzes in Deutschland

Innerhalb Deutschlands wird das Erdgas über überregionale Ferngasleitungen verteilt und in die nachgeordneten regionalen Netze, an lokale Versorger bzw. industrielle Großkunden weitergeleitet. Mit der Novellierung des Energiewirtschaftsgesetzes (EnWG) wurden 19 Marktgebiete geschaffen, in denen überregionale Netzbetreiber als Marktverantwortliche fungieren und denen die 768 Netzbetreiber mit ihren 1.007 Gasnetzen und Teilnetzen zugeordnet sind (Drenckhan et al. 2006). Die überregionalen Netzbetreiber sind zudem verpflichtet, wichtige Strukturdaten ihrer Netze zu veröffentlichen. Anhand dieser Daten kann das Netz an Hochdruckgasleitungen differenziert nach Durchmesser-kategorien unterschieden werden.

Im Fernleitungsnetz wird Gas normalerweise mit einem (Hoch-)Druck⁶² von 60 bis 100 bar in Stahlrohren transportiert⁶³. Die Rohre haben einen Rohrdurchmesser zwischen 110 mm und 1.400 mm. Die Rohrwandstärke differenziert je nach Druck, Durchmesser und Stahlqualität zwischen 12 und 35 mm. Als äußerer Korrosionsschutz sind die Stahlrohre mit einer Kunststoffschicht (z.B. Polyethylen) umhüllt, sowie mit einem kathodischen Korrosionsschutz versehen. Häufig werden die Rohrwandinnenwände zudem noch mit einer dünnen Schicht aus Epoxidharz beschichtet.⁶⁴

Durch Reibung der Gasmoleküle untereinander und entlang der Rohrwand sinkt mit jedem Transportkilometer der Rohrdruck um ungefähr 0,1 bar. Deshalb muss in regelmäßigen Abständen (ca. alle 150 km) der Gasdruck mittels einer Kompressorstation wieder auf das alte Niveau erhöht werden. In Kompressorstationen wird mit einer Gasturbine (manchmal auch Elektromotor) ein Verdichter betrieben, der das Erdgas wieder auf den alten Transportdruck konzentriert. Unterwegs gibt es zudem noch verschiedene Regelstationen, die einen gleichmäßigen Gasdruck im gesamten System gewährleisten sowie ungefähr alle 2 km Messeinrichtungen, um die Schutzstromstärke des kathodischen Korrosionsschutzes messen zu können.

Aus Sicherheitsgründen müssen in bestimmten Abständen (alle 20 km) Absperrarmaturen (Kugelhahn oder Schieberanlagen) installiert werden, die es ermöglichen, dass bei Havarien oder für Reparaturmaßnahmen bestimmte Abschnitte der Erdgasleitung vom System abgetrennt werden können. Zudem ist am Anfang und Ende jeder Pipeline eine so genannte Molchschleuse einzubauen, über die Molche⁶⁵ in die Erdgasleitung eingesetzt werden können.

Zum Ausgleich saisonaler Schwankungen werden in Deutschland 44 Untergrundgasspeicher mit einem Speichervolumen von 19,3 Mrd. m³ betrieben. Untergrundgasspeicher sind entweder Kavernenspeicher (35 % der deutschen Speicherkapazitäten) oder Porenspeicher (65 % der deutschen Speicherkapazitäten). Als Kavernenspeicher werden Speicheranlagen bezeichnet, die künstliche Hohlräume in ehemaligen Salzstöcken nutzen, während Porenspeicher geologisch zweckmäßige Gesteinsformationen nutzen, die sich durch eine poröse Form auszeichnen. Häufig werden dafür alte Erdgaslagerstätten verwendet. Um das Gas in den Speicher zu pressen, sind auch hier Kompressorstationen notwendig. Gleichzeitig muss es vor einer erneuten Einspeisung in das Fernleitungssystem in Aufbereitungsanlagen getrocknet und mit Hilfe von Druckreduktionsanlagen auf den entsprechenden Leitungsdruck reduziert werden. Dabei muss das Gas vorgewärmt werden, da sich Erdgas bei Reduzierung des Drucks abkühlt und die Gefahr der Vereisung von Ventilen und Reglern besteht.

An etlichen Ausgabepunkten der überregionalen Fernleitungsnetze wird das Erdgas an Großkunden übergeben oder in die regionalen Netze der lokalen Gasversorger eingespeist.

⁶² Als Hochdruck gilt jeder Druck über 1 bar, als Mitteldruck wird ein Druck zwischen 100 mbar und 1 bar bezeichnet. Alle Drücke unter 100 mbar sind Niederdruck.

⁶³ Die Nordstream-Pipeline, die quer durch die Ostsee Erdgas aus Russland nach Deutschland liefern soll, wird später sogar mit einem Druck von 220 bar betrieben werden. Die Gasrohre haben einen Durchmesser von 1,2 m und eine Wandstärke von 27 bis 41 mm. Zusätzlich werden diese Rohre mit einer 60 bis 110 mm starken Betonschicht ummantelt (<http://www.nord-stream.com/de/project/technical-concept.html>).

⁶⁴ Viele der hier genannten Informationen und Zahlen sind u.a. zu finden auf der Internetseite http://www.erdgaszuerich.ch/fileadmin/media/erdgas/basis-informationen/erdgas_transport.pdf.

⁶⁵ Molche sind Reinigungs- bzw. Prüfgeräte, die durch die Erdgasleitung mittels Druckluft transportiert werden und entweder Verunreinigungen in den Rohren beseitigen oder mit magnetfeldsensiblen Sensoren den Rohrwandzustand untersuchen.

Die lokalen Verteilernetze werden im Normalfall mit einem Druck von 6 bis 9 bar betrieben. Daher sind an allen Übergabestationen auch Druckreduziereinrichtungen mit einer Gasvorwärmung notwendig.

Um ausströmendes Gas rechtzeitig zu bemerken, wird das nahezu geruchslose Erdgas im lokalen Erdgasnetz (oder auch zentral im Hochdrucknetz) mit schwefelhaltigen Verbindungen (meist Tetra-Hydro-Thiophen, THT, bzw. Mercaptanmischungen) odoriert.

Um Tagesschwankungen im Gasverbrauch ausgleichen zu können, verfügen einige lokale Erdgasversorger⁶⁶ über Speichermöglichkeiten in Form von oberirdischen Kugelspeichern oder unterirdisch verlegten Röhrenspeichern, in denen Gas mit hohem Druck eingepresst werden kann (bis 20 bar bei Kugelgasbehälter und bis zu 70 bar bei Röhrenspeicher). Die früher eingesetzten Niederdruckgasbehälter (häufig umgangssprachlich Gasometer genannt) spielen heute in der Gasversorgung keine Rolle mehr. Der größte Kugelspeicher Deutschlands wird von den Wuppertaler Stadtwerken betrieben und hat einen Durchmesser von 47 m und ein Speichervolumen von 272.000 m³. Die Kugel ist aus 30 mm dickem Stahlblech gefertigt. Die Möglichkeit, mit höherem Druck größere Mengen an Erdgas zwischen zu speichern und ihre „Unsichtbarkeit“ führt mittlerweile zu einer vermehrten Errichtung von Röhrenspeichern. Röhrenspeicher sind bis zu 2,5 m Durchmesser starke, 200 m lange und 23 mm dicke Stahlrohre, die unterirdisch verlegt sind.

Bevor das Erdgas schließlich zum Verbraucher kommt und damit in die Hausanschlussleitungen eingespeist werden kann, muss das Erdgas häufig noch weiter im Druck entspannt werden. Ortsnetze werden im Normalfall mit einem Druck von ca. 20 mbar betrieben. Zum Teil sind auch höhere Drücke bis 500 mbar möglich. Zur Druckreduzierung sind weitere Druckregelungsanlagen notwendig.

Das gesamte Netzsystem ist mit umfangreicher Regelungstechnik ausgestattet, so dass eine genaue Überwachung der Gasmenge, eine Überprüfung der Gasqualität, sowie die Bedienung der Schieber, Druckregelungsanlagen, Übergabestationen aus zentralen Leitstationen erfolgen kann.

Hochdruckleitungen bis 16 bar sind ausschließlich aus Stahl gefertigt. Die früheren örtlichen Gasnetze bestanden überwiegend aus Grauguss mit Stemmmuffen aus Hanf. Das feuchte Stadtgas hat die Hanfdichtungen angefeuchtet und so abgedichtet. Das heute verwendete Erdgas ist trockener und ließ die Hanfdichtungen austrocknen und dadurch undicht werden. Später wurden Stahlrohre und ab den 1960er Jahren duktile Gussrohre mit Schraubmuffen als Gasleitungen bis 16 bar eingesetzt, meist in einem Durchmesser von 80 mm bis 600 mm. Im Niederdruckbereich sowie im Druckbereich bis 5 bar werden in den letzten Jahren allerdings fast vollständig PE-Rohre (häufig High Density Polyethylen - HDPE) verwendet. Die Durchmesser variieren zwischen 50 und 200 mm.

Im Bereich Erdgasnetz wird mit konkreten Netzdaten verschiedener Regional- und Ortsnetzbetreiber über den Anteil der verbauten Materialien und der verlegten Nenndurchmessern der Rohre gearbeitet. Diese Angaben werden dann hochgerechnet auf das Gesamtnetz der regionalen und örtlichen Erdgasverteilung. Damit sind wir in der Lage, die Abschätzung des Materialverbrauches deutlich konkreter durchführen zu können als dies Faist-Emmenegger

⁶⁶ Laut <http://www.gaswerk-augsburg.de/deutschland.htm> sind in Deutschland noch acht Kugelspeicher in Betrieb, sowie 36 Teleskop-, Scheiben- oder Schraubengasbehälter, die jedoch nahezu ausschließlich in Großbetrieben wie der BASF für den Schwankungsausgleich zum Einsatz kommen.

et al. (2007) möglich war, die in ihrer Abschätzung nur mit einem Nenndurchmesser pro Gasdruckebenen gerechnet haben.

5.1.2.2 Materialbestand des deutschen Erdgasnetzes

Das Erdgasnetz lässt sich grundsätzlich in drei Druckbereiche (Niederdruck (ND), Mittel- druck (MD), Hochdruck (HD)) unterteilen und ebenso auf drei Verteilnetzebenen (Fernlei- tungsnetz, Regionalversorgungsnetz und Ortsnetz). Erdgasunternehmen sind häufig sowohl als Regional- als auch als Ortsnetzbetreiber aktiv, zudem gibt es in ihrem Netzbereich so- wohl HD-, MD- und ND-Netzbereiche. Es wird daher für diese Studie nur der Fernleitungsbe- reich getrennt abgeschätzt, während das Regional- und Ortsnetz als Einheit behandelt wird.

Fernleitungsnetz

Das Fernleitungsnetz ist laut Bundesnetzagentur (2008) 56.476 km lang. Auf Grundlage der von den Gasunternehmen veröffentlichten Netzdaten ist es möglich, das Fernleitungsnetz konkret nach Nenndurchmessern zu erfassen. Die EcoInvent-Daten (Faist-Emmenegger et al. 2007) beziehen sich dagegen im Fernleitungsbereich nur auf einen Nenndurchmesser, der nach unseren Daten den Materialbedarf überschätzt. Andere spezifische Materialdaten werden von Faist-Emmenegger et al. (2007) übernommen und an geringere Nenndurch- messer angepasst.

Tab. 112: Spezifischer Materialbedarf des Gasfernleitungsnetzes

Leitungsdurchmesser	Anteil in %*	Anteil in km	durch. Nenn- durchmesser in mm	durch. Wand- dicke in mm	Spezifischer Stahlbedarf in kg/m	PE(LD) für Rohrumhül- lung in kg/m	Bitumen für Rohrumhül- lung in kg/m
Klasse A: $x > 1000$ mm	13,89	7.846	1200	18	525	6,2	9,3
Klasse B: $700 < x < 1000$ mm	18,55	10.478	900	16	349	6,2	9,3
Klasse C: $500 < x < 700$ mm	21,83	12.327	600	16	230	5,2	8
Klasse D: $350 < x < 500$ mm	12,87	7.270	400	12	115	4,5	7,2
Klasse E: $225 < x < 350$ mm	16,27	9.190	300	10	71,5	4	6,5
Klasse F: $110 < x < 225$ mm	14,31	8.079	200	10	47	4	5,5
Klasse G: $x < 110$ mm	2,28	1.285	100	10	22,2	3	5
Gesamtleitungslänge	100,00	56.476					

Quelle: Eigene Berechnung, zum Teil auf Grundlage von Faist-Emmenegger et al. (2007), * Die Anteil der Nenn- durchmesser ergeben sich aus dem Zusammentragen von Leitungsdaten, die 70 % des Gesamt- Fernleitungsnetzes abbildeten.

Für jede Leitungsklasse (A-G) wird ein typischer Nenndurchmesser mit den entsprechenden Wanddicken verwendet und über Herstellerangaben von Druck-Stahlrohren das konkrete Gewicht pro Meter ermittelt. Das Gewicht der PE- bzw. Bitumenhülle wird anhand der Daten in Faist-Emmenegger et al. (2007) an die unterschiedlichen Nenndurchmesser angepasst.

Aus Tab. 113 geht hervor, welche Materialien in welchen Mengen im Gas-Fernleitungsnetz gebunden sind. Es wird dabei die Annahme getroffen, dass 100 % des Fernleitungsnetzes aus Stahlrohren besteht und der Korrosionsschutz bei 75 % der Rohre aus PE-Folie und bei 25 % aus einer Bitumenabdichtung besteht. Weiterhin wird der spezifische Sandbedarf aus Faist-Emmenegger et al. (2007) übernommen und es wird davon ausgegangen, dass 100 % des Fernleitungsnetzes in einem Sandbett verlegt sind.

Tab. 113: Materialbestand des Fernleitungsgasnetzes

in 1.000 t	Anteil in km	Stahl	PE(LD)	Bitumen	Sand
Klasse A: $x > 1000$ mm	7.846	4.119	36	18	17.890
Klasse B: $700 < x < 1000$ mm	10.478	3.657	49	24	23.891
Klasse C: $500 < x < 700$ mm	12.327	2.835	48	25	28.106
Klasse D: $350 < x < 500$ mm	7.270	836	25	13	14.176
Klasse E: $225 < x < 350$ mm	9.190	657	28	15	17.921
Klasse F: $110 < x < 225$ mm	8.079	380	24	11	15.754
Klasse G: $x < 110$ mm	1.285	29	3	2	2.506
Gesamt	56.476	12.513	213	108	120.243

Quelle: Eigene Berechnung, zum Teil auf Grundlage von Faist-Emmenegger et al. (2007)

Regional- und Ortsnetz

Die Gesamtlänge des deutschen Gasnetzes betrug im Jahr 2007 rund 420.000 km, abzüglich der 56.476 km Fernleitungsnetz bleibt ein Netz von 363.524 km. Davon sind 133.000 km ND-Leitungen, 180.000 km MD-Leitungen und 50.524 km HD-Leitungen. Über die Verteilung nach Materialien liegen beim BDEW nur Daten bis 1998 vor. Wir nehmen an, dass der Zuwachs seit 1998 im ND-Netz vollständig mit PE-Rohren erfolgt ist. Im MD-Netz-Bereich wird geschätzt, dass 75 % der Erweiterung in PE-Rohren und 25 % in Stahlrohren erfolgte. Für den Hochdruckbereich wird unterstellt, dass der Neubau seit 1998 zu 75 % in Form von Stahlrohren und zu 25 % mittels PE-Rohren erfolgte. Guss- und PVC-Rohre werden entweder kaum oder überhaupt nicht mehr im Neubau verwendet und sind nur noch im Bestand zu finden.

Über die Daten verschiedener Netzbetreiber kann eine Abschätzung über die verwendeten Nenndurchmesser vorgenommen werden und zudem die Abschätzung der Verteilung nach Rohrmaterialien anhand der BDEW-Daten von 1998 überprüft werden. Aus den Daten wird deutlich, dass in den verschiedenen Netzebenen häufig mit Standard-Nenndurchmessern gearbeitet wird. Firmen wie E.ON, die mehrere Gasnetze betreiben, dürften zudem ihren Materialeinkauf über gleiche Nenndurchmesser in allen Netzen optimieren. Aus Tab. 114 geht der Materialaufwand sowie die geschätzte Verteilung der Nenndurchmesser und Materialarten hervor.

Tab. 114: Materialbestand des regionalen und örtlichen Erdgasnetzes

	Material	Nenndurchmesser in mm	Rohrlänge in km	Wanddicke in mm	Spezi. Materialbedarf (t/km) ^a	Gesamtbestand in 1.000 t	
Hochdruck	Stahl (90 %)	400 (25 %)	11.368	12	126,28	1.436	
		200 (25 %)	11.368	10	51,59	586	
		150 (25 %)	11.368	10	37,95	431	
		100 (25 %)	11.368	10	24,42	278	
	PE (10 %)	200 (100 %)	5.052	18	11,33	57	
	PE-Folie		45.472		1,6	73	
Mitteldruck	Stahl (10 %)	150 (50 %)	9.000	6	23,43	211	
		100 (50 %)	9.000	6	15,29	138	
	PE (80 %)	150 (25 %)	36.000	15	7,337	264	
		100 (50 %)	72.000	10	3,454	249	
		80 (25 %)	36.000	7	1,617	58	
	Grauguss (5 %)	150 (50 %)	4.500	10	29,04	131	
		100 (50 %)	4.500	10	19,91	90	
	Duktiler Guss (5 %)	150 (50 %)	4.500	10	29,04	131	
		100 (50 %)	4.500	10	19,91	90	
		PE-Folie		36.000		1,6	58
Niederdruck	Stahl (50 %)	150 (25 %)	16.625	6	23,43	390	
		100 (50 %)	33.250	6	15,29	508	
		80 (25 %)	16.625	5	10,23	170	
	PE (40 %)	150 (25 %)	13.300	15	7,337	98	
		100 (50 %)	26.600	10	3,454	92	
		80 (25 %)	13.300	7	1,617	22	
	Duktiler Guss (10 %)	150 (50 %)	6.650	10	29,04	193	
		100 (50 %)	6.650	10	19,91	132	
		PE-Folie		79.800		1	80
	Graben- und Rohrbettung	Sandverbrauch	85 %	308.995		600-1000	202.575
Zementverbrauch		15 %	54.529		26	1.418	
Straßen- und Flussquerrungen	Füll-Beton		363.524		1	364	
	Betonmantelrohre		363.524		3	1.091	
	Armierte Beton-Strukturen		363.524		2	727	

Quelle: Eigene Berechnung, auf Grundlage von Angaben von Netzbetreibern, Herstellerangaben und Annahmen aus Faist-Emmenegger et al. (2007); ^a Es werden für Armaturen pauschal 10 % des spez. Materialbedarfs für Rohre eingerechnet. Die ausgewiesenen Zahlen sind inkl. des Materialbedarfs für Armaturen

Die Angaben zu PE-Folie als Korrosionsschutz aus Faist-Emmenegger et al. (2007) wurden den entsprechend niedrigeren Rohrdurchmessern angepasst. Zudem wird davon ausgegangen, dass alle Guss- und Stahlrohre mit einer PE-Folie gegen Korrosion geschützt werden. Aus Faist-Emmenegger et al. (2007) werden weiterhin die Annahmen für Grabenprofile und Rohrbettungsmittel übernommen. Demnach sind 85 % des Leitungsnetzes in Sand eingebettet und 15 % mit Faserzementmörtel ummantelt. Zusätzlich wird aus Faist-Emmenegger et al. (2007) der Materialverbrauch für die Querung spezieller Hindernisse wie Straßenkreuzungen und Flussquerrungen für das Gesamtnetz übernommen. Schließlich wird analog zur Vorgehensweise bei Faist-Emmenegger et al. (2007) 10 % des spezifischen Rohrgewichtes für Armaturen, Molchschleusen, Absperrhähne etc. angesetzt und hinzuaddiert.

5.1.2.3 Jährliche Materialbedarfe für Ausbau und Instandhaltung des Erdgasnetzes

Die Abschätzung des Materialbedarfs für den Ausbau und die Erneuerung der Gasnetze folgt der gleichen Systematik wie die der Stromnetze. Aus Daten des BDEW (2009) ist der jährliche Anstieg des Erdgasnetzes gegliedert nach Druckstufen ermittelbar. Zusätzlich sind Investitionszahlen der Gasnetzbetreiber in der Unterscheidung nach Aus- und Neubau sowie Erneuerung und Erhalt aus den Monitoringberichten der BNA verfügbar. Allerdings schätzt die BNA die Qualität der Investitionszahlen selbst als schlecht ein, da nur ein Teil der Netzbetreiber umfassende Angaben getätigt habe.

Obwohl die Hälfte des Hochdruck-Netzes (HD-Netzes) im Besitz der Betreiber der Verteilnetze (VNB) ist, wird in dieser Studie der Ausbau des HD-Netzes komplett den Fernleitungsnetzbetreibern (FNB) zugerechnet. Die Investitionen der VNB werden anteilig den Zuwächsen der Netzlängen (82 % Mitteldruck (MD) und 18 % Niederdruck (ND)) zugerechnet. Dadurch ergeben sich rein rechnerisch gleiche Kostenrelationen des Neubaus von MD- und ND-Rohren. Diese Annahme ist zulässig, da in beiden Druckebenen die Verwendung von PE-Rohren mit identischen Nenndurchmessern unterstellt wird.

Aus den Daten des BDEW und der BNA ergeben sich unter Anwendung dieser Annahmen folgende Längen des Ausbaus und der Erneuerung des Gasnetzes:

Tab. 115: Ausbau und Erneuerung des Gasnetzes

nach Daten BDEW und BNA	HD-Netz	MD-Netz	ND-Netz
durchschnittlicher jährlicher Zuwachs 1998 - 2008 in km	1.490	6.152	1.390
Investitionen in Ausbau/Neubau/ Erweiterung in Mio. Euro	430	407	89
Kosten pro km Ausbau/Neubau	288.591	66.112	64.230
Erhalt/ Erneuerung in km	128	3.721	841

Quelle: Eigene Berechnungen auf Grundlage von Daten der BNA (2008, 2009) sowie des BDEW (2009)

Für die Abschätzung des Materialbedarfs für Neubau und Erneuerung werden folgende Annahmen getroffen: HD-Leitungen wurden als Fernleitungen als Stahlrohr erbaut. Erneuerungsinvestitionen im HD-Netz waren mit 128 km Streckenlängen eher marginal. Die Erweiterung und der Austausch der MD- und ND-Leitungen erfolgten komplett durch PE-Rohre. Der Zuwachs und Austausch an Gasleitungen wurde entsprechend den Nenndurchmessern des Bestands aufgeteilt. Da PE-Rohre erst seit einigen Jahren im Bereich der MD- und ND-Netze verwendet werden, wird angenommen, dass die ausgetauschten Gasrohre entweder aus Grauguss, duktilem Guss oder Stahl bestanden und gegen PE-Rohre getauscht wurden. Aus den Zuwachsdaten und den benannten Annahmen ergeben sich folgende Materialbedarfe für Neu- und Ausbau im Fernleitungsnetz (Tab. 116) und Verteilnetz (Tab. 117):

Tab. 116: Jährlicher Materialbedarf für Neu- und Ausbau im Ferngasnetz abgeleitet aus den Daten von 1998-2008

in Tonnen	Anteil in km	Stahl	PE(LD)	Bitumen	Sand
Klasse A: $x > 1000$ mm	207	108.680	1.283	1.925	471.980
Klasse B: $700 < x < 1000$ mm	276	96.481	1.714	2.571	630.305
Klasse C: $500 < x < 700$ mm	325	74.802	1.691	2.602	741.519
Klasse D: $350 < x < 500$ mm	192	22.056	863	1.381	373.995
Klasse E: $225 < x < 350$ mm	242	17.336	970	1.576	472.803
Klasse F: $110 < x < 225$ mm	213	10.018	853	1.172	415.642
Klasse G: $x < 110$ mm	34	753	102	170	66.123
Gesamtleitungslänge	1.490	330.126	7.476	11.397	3.172.366

Quelle: Eigene Berechnungen

Tab. 117: Jährlicher Materialbedarf für Neu- und Ausbau im Verteilungsnetz abgeleitet aus den Daten von 1998-2008

	Material	Nenndurchmesser in mm	Rohrlänge in km	Wanddicke in mm	Spezi. Materialbedarf in t/km	Gesamt in Tonnen
Mitteldruck	PE (100 %)	150 (25 %)	1538	15	7,337	11.284
		100 (50 %)	3076	10	3,454	10.625
		80 (25 %)	1538	7	1,617	2.487
Niederdruck	PE (100 %)	150 (25 %)	347,5	15	7,337	2.550
		100 (50 %)	695	10	3,454	2.401
		80 (25 %)	347,5	7	1,617	562
Grabenbettung	Sandverbrauch	100 %	7.542		850	6.410.700
Strassen- und Flussquerrungen	Füll-Beton		7.542		1	7.542
	Betonmantelrohre		7.542		3	22.626
	Armierte Beton-Strukturen		7.542		2	15.084

Quelle: Eigene Berechnungen

Der starke Anstieg des Erdgasnetzes spiegelt sich in den hohen jährlichen Materialströmen wider. Bis auf den Bereich der MD-Netze sind die Materialbedarfe für Erneuerung und Erhaltung deutlich niedriger als für den Neu- und Ausbau.

Tab. 118: Materialverbrauch für die jährliche Erneuerung des Ferngasnetzes in t abgeleitet aus den Daten von 1998-2008

in Tonnen	Anteil in km	Stahl	PE(LD)	Bitumen	Sand
Klasse A: $x > 1000$ mm	18	9.352	110	166	
Klasse B: $700 < x < 1000$ mm	24	8.302	147	221	
Klasse C: $500 < x < 700$ mm	28	6.436	146	224	
Klasse D: $350 < x < 500$ mm	17	1.898	74	119	
Klasse E: $225 < x < 350$ mm	21	1.492	83	136	
Klasse F: $110 < x < 225$ mm	18	862	73	101	
Klasse G: $x < 110$ mm	3	65	9	15	
Gesamt	128	28.406	643	981	0

Quelle: Eigene Berechnungen

Tab. 119: Materialverbrauch für die jährliche Erneuerung des VNB abgeleitet aus den Daten von 1998-2008

	Material	Neandurchmesser in mm	Erneuerung an Rohrlänge in km	Wanddicke in mm	Spezi. Materialbedarf in t/km	Gesamt in t
Mitteldruck	PE (100 %)	150 (25 %)	930	15	7,337	6.825
		100 (50 %)	1.860	10	3,454	6.426
		80 (25 %)	930	7	1,617	1.504
Niederdruck	PE (100 %)	150 (25 %)	210	15	7,337	1.542
		100 (50 %)	420	10	3,454	1.452
		80 (25 %)	210	7	1,617	340
Grabenbettung	Sandverbrauch	100 %			600	0
Straßen- und Flussquerrungen	Füll-Beton		4.562		1	4.562
	Betonmantelrohre		4.562		3	13.685
	Armierter Beton-Strukturen		4.562		2	9.123

Quelle: Eigene Berechnungen

Es wird davon ausgegangen, dass alle Bestandteile der Systeme bei Erneuerungsinvestitionen komplett ausgetauscht werden. Lediglich für die Sandbettung wird eine Weiternutzung nach Auswechslung der Rohre, Armaturen und weiterer Komponenten angenommen.

Neben dem oben genannten Austausch von alten Guss- und Stahlrohren im Bereich der MD- und ND-Netze durch PE-Rohre wird weiter angenommen, dass die Stahlrohre im HD-Netz 1:1 ausgetauscht werden. In der Realität wird im Rahmen der Erneuerung von Fernleitungsrohren auch die Leistungsfähigkeit des Netzes durch Erhöhung der Nenndurchmesser der verbauten Leitungen erhöht. Darüber liegen jedoch keine detaillierten Informationen vor. Deshalb wird sich an der bestehenden Verteilung der Nenndurchmesser orientiert. Aus dem Austausch der Stahlrohre im HD-Netz ergibt sich, dass die Materialmengen, die für Erneuerung und Erhalt in dieser Netzebene aufgebracht werden müssen gleichzeitig als Abfallmengen anfallen und für eine Verwertung zur Verfügung stehen. Die Höhe der tatsächlichen Verwertungsquote der einzelnen Stoffkategorien ist jedoch nicht bekannt. Die Netzbetreiber vergeben diese Arbeiten zumeist an Bau- und Abbruchunternehmen und haben selbst nur sehr eingeschränkte Kenntnisse über die Art der Verwertung. Netzbetreiber unterliegen zudem Rückbauverpflichtungen, so dass es sehr unwahrscheinlich ist, dass alte Rohrsysteme einfach abgeschaltet werden und im Erdreich liegen bleiben. Wenn, dann kommt dies vermutlich nur in städtischen ND-Netzen vor.

Allerdings gibt es vor allem im ND- und MD-Bereich die technische Entwicklung, dass alte Rohre, die früher ausgewechselt wurden, nun mit Hilfe von so genannten Kunststofflinern erneuert werden. Dabei wird im Zugverfahren ein Kunststoffschlauch in die alten sanierungsbedürftigen Erdgasrohre gezogen. Welche Anteile der reparaturbedürftigen Rohre inzwischen mit Liner saniert werden ist nicht bekannt. Diese Verfahren bieten aber enorme Materialeinsparungspotentiale.

5.1.3 Das Fernwärmenetz in Deutschland

Das Fernwärmenetz ist im Gegensatz zum Erdgas- und Stromnetz sehr klein. Es konzentriert sich vor allem auf die städtischen Ballungszentren und da wiederum auf die ostdeut-

schen Ballungsgebiete. Die Wärmeversorgung des Wohnungsbestandes ist – wie schon erwähnt – vor allem durch Erdgasheizungen geprägt. Aktuell werden ca. 10 % der erzeugten Strommenge in KWK-Anlagen produziert (Ernst 2008). Gleichzeitig wird 80 % der Fernwärme mit Kraft-Wärme-Kopplung erzeugt. Es besteht also ein enger Zusammenhang zwischen Stromerzeugung in KWK-Anlagen und Fernwärmeversorgung. Die Bedeutung des Fernwärmenetzes könnte in Zukunft noch deutlich zunehmen, wenn das Ziel der Bundesregierung, den KWK-Stromanteil von heute ca. 10 % bis zum Jahr 2020 auf 25 % zu erhöhen, tatsächlich umgesetzt werden wird. Ernst (2008) kommt vor diesem Hintergrund zu der Einschätzung, dass der Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung nur durch Verdichtung und Ausbau der Nah- und Fernwärmeversorgung⁶⁷ erreicht werden kann. Voß/Blesl (2005) schlussfolgern dagegen, dass zwar langfristig die KWK-Stromerzeugung zunehmen wird, dass dies jedoch ohne nennenswerten Ausbau der Fernwärmeversorgung gelingen kann. Nur wenn einerseits die Preise für Erdöl und Erdgas dauerhaft hoch sind und weiter steigen und gleichzeitig die Verlegungskosten neuer Wärmeinfrastruktur deutlich gesenkt werden können, ist bis zum Jahr 2020 ein Ausbau der Fernwärmeversorgung um 50 % im Vergleich zum Jahr 2005 zu erwarten.

5.1.3.1 Die Struktur des deutschen Wärmenetzes

Die Datensituation im Fernwärmebereich ist sehr unzureichend. Eine der wenigen Datenquellen ist der jährliche Hauptbericht der Fernwärmeversorgung der Arbeitsgemeinschaft für Wärme und Heizkraftwirtschaft e.V. (AGFW) vor. Dieser Hauptbericht wird auf Grundlage einer freiwilligen Befragung der Unternehmen der Fernwärmeversorgung erhoben. Die Freiwilligkeit der Teilnahme an der Befragung hat aber zur Folge, dass in jedem Jahr unterschiedliche Unternehmen an der Befragung teilnehmen und die Daten daher im Zeitverlauf nicht vergleichbar sind. Der Hauptbericht der Fernwärmeversorgung 2006 erfasst eine Trassenlänge von 19.148 km. Der Großteil (18.268 km) sind Heizwassernetze, der Rest (880 km) Dampfnetze (Schmitz 2008). Die AGFW schätzt, dass das gesamte Fernwärmenetz in Deutschland eine Länge von rund 25.000 km umfasst (Besier 2006). Eine aktuelle Abschätzung, die auch die Verkaufszahlen der Hersteller von Fernwärme-Rohrsystemen sowie geschätzte Zahlen zu Nahwärmenetzen berücksichtigt, kommt zu einer Gesamtlänge des deutschen Heizwassernetzes zwischen 90.000 und 100.000 km (Besier 2007).

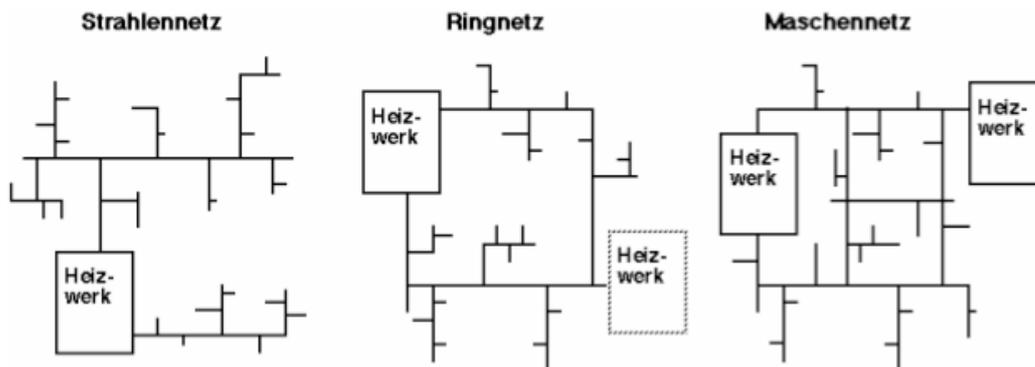
Fernwärme beliefert zu 50 % private Haushalte, zu 44 % öffentliche Einrichtungen und andere Nichtwohngebäude und zu 6 % Industriekunden. Rund 14 % der deutschen Wohngebäude werden mit Nah- oder Fernwärme beheizt. In Großstädten mit mehr als 100.000 Einwohnern liegt der Anteil der Nah- und Fernwärme am Wärmemarkt bei rund 30 % (AGFW 2007). Die im Hauptbericht 2006 erfassten 234 Fernwärmeversorgungsunternehmen (91 % des Wärmemarktes) betreiben dabei 1.523 verschiedene Netze (1.446 Wasser- und 77 Dampfnetze). Die Wärme für diese Netze wird in 3.130 Anlagen erzeugt. Der Großteil der Wärmeerzeugungsanlagen sind keine KWK-Anlagen (2.305), allerdings stammen 80 % der Wärmenetzeinspeisung aus KWK-Anlagen (Schmitz 2008). Neben Fernwärmenetzen gibt es noch einige wenige Kältenetze, die öffentliche Einrichtungen und Kaufhäu-

⁶⁷ Es gibt keine eindeutige Unterscheidung zwischen Nah- und Fernwärme. Als Nahwärme wird überwiegend Wärme aus dezentralen Quellen, wie BHKW, bezeichnet, die mit geringeren Temperaturen übertragen werden und nur wenige Gebäude beheizen. Typische Leistungen von Nahwärmequellen liegen zwischen 50 kW und 1 MW.

ser mit Kälteleistungen versorgen. Aufgrund ihrer geringen Bedeutung wurden Dampfnetze und Kältenetze in diesem Projekt nicht weiter untersucht.

Fernwärmenetze können grundsätzlich als Ein- bis Vierrohrsystem betrieben werden. Üblich ist jedoch ein 2 Rohrsystem, in dem ein Rohr (Vorlaufrohr) die Wärme zum Verbraucher führt und das zweite Rohr (Rücklaufrohr) vom Verbraucher zum Heizwerk wieder zurückgeführt wird. Die Temperatur im Rücklaufrohr (bis 70°C) ist dementsprechend niedriger als im Vorlaufrohr (bis 130°C). Als Netzformen kommen Strahlennetze, Ringnetze und Maschennetze zum Einsatz (Abb. 10).

Abb. 9: Übersicht über Netzformen der Fernwärmeversorgung



Quelle: Fraunhofer Institut UMSICHT / bremer energie institut. 2004

In 2006 wurde das Fernwärmenetz laut der AGFW (AGFW 2007) um rund 2.000 km Trassenlänge ausgebaut. Diese hohe Zahl ergibt sich vermutlich aus der Hochrechnung der Angaben der Hersteller über verkaufte Rohrleitungssysteme. Demnach wurden im Jahr 2006 in Deutschland Mantelrohre in der Länge von 2.500 km verkauft (Besier 2007). Gut die Hälfte (55 %) der verkauften Rohre waren Kunststoffmantelrohre (KMR), die andere Hälfte (45 %) entfiel auf flexible Rohrsysteme. Da ein Großteil der flexiblen Rohrsysteme Kombirohre sind (Vor- und Rückleitung verlaufen in einem Rohr), erhöht sich rein rechnerisch die über die Verkäufe abgeschätzte Erweiterung des Fernwärmesystems auf 3.500 km Rohrlänge.

Es wird geschätzt, dass mittlerweile 80 % des Fernwärmenetzes aus Kunststoffmantelrohren (KMR) bestehen. Stahlmantelrohre und andere Verlegungssysteme sind demnach eher unbedeutend (Besier 2007). Um Wärmeverluste während des Transportes zu minimieren, sind erdverlegte Wärmerohre immer in drei Schichten aufgebaut. In der Mitte befindet sich das so genannte Mediumrohr, das meist aus Stahl, aber zum Teil auch aus Kupfer oder Kunststoff besteht. Um das Mediumrohr liegt eine Schicht aus PUR-Hartschaum und um diese Schicht wiederum ein Polyethylen-Mantelrohr. Teilweise werden auch Mantelrohre verwendet, die sowohl innen wie außen ein Mantelrohr verwenden und dadurch den nachträglichen Einzug des Rohres in das Mantelrohr erlauben. KMR werden bis zu einer Nennweite von 1.200 mm verlegt und können für eine maximale Verlauftemperatur bis 140°C verwendet werden.

Früher wurden Fernwärmenetze auch als Freileitungen oder in Kanalbauweise verlegt. Die äußere Ummantelung mit einem festen Material konnte dabei weggelassen werden, da die

Rohre sowohl in Freileitungen als auch im Kanal auf Sockeln angebracht waren und die Wärmeisolation der Rohre somit von Luft umgeben war.

Stahlmantelrohre werden heute vor allem noch als Dükerleitungen bei Querungen von Gewässern und Querungen von stark befahrenen Straßen mit hoher Belastung verwendet. Flexible Stahlmantelrohre werden in der Regel für Verbindungen zwischen verschiedenen Gebäuden und/oder langen Anschlussleitungen vor allem in geringeren Nenndurchmessern verwendet (Winkens 1994).

Je nach Nenngröße der Rohre kommen noch unterschiedliche Armaturen zum Einsatz, die bestimmte Streckenabsperungen bei Havarie oder Reparaturarbeiten ermöglichen. Im Bereich 40 bis 65 mm werden als Absperrung Ventile oder Kugelhähne eingesetzt. Bei Nennweiten von 80 bis 150 mm zusätzlich auch Schieber, im Bereich 200 bis 350 mm hauptsächlich Schieber und ab Durchmesser > 400 mm werden überwiegend Klappen verwendet. Es liegen aber keine Angaben über die Gesamtzahl der Absperrarmaturen vor oder eine „Damenregel“, in welchen Abständen eine solche Armatur angebracht werden sollte (Winkens 1994).

In fest verschweißten und erdverlegten Mantelrohren verläuft im Isoliermaterial in der Regel ein Messdraht mit, der eine Netzüberwachung mit hoher Genauigkeit (+/- 2 m) ermöglichen soll. Bei Freileitungen und Kanalverlegung wurde die Überwachung über regelmäßige Kontrollgänge durchgeführt.

Einige Fernwärmeversorgungsunternehmen unterhalten Wärmespeicher, um saisonale und tageszeitbedingte Schwankungen auszugleichen. Die Mehrzahl der Unternehmen regelt Schwankungen im Wärmebedarf jedoch über eine Kombination aus Temperatur- und Mengenregelung. Bei längerfristig höherem Bedarf (saisonal) kann die Temperatur des Heizwassers erhöht werden. Bei tageszeitlichen Spitzen haben die Fernwärmeversorgungsunternehmen die Möglichkeit, mit einem höheren Pumpaufwand und dadurch höherem Leitungsdruck verstärkte Nachfrage zu befriedigen (Fraunhofer Institut UMSICHT/bremer energie institut. 2004).

Neben den eigentlichen Rohrleitungen und ihren Armaturen sind für einen einwandfreien Betrieb des Netzes weitere zentrale Einrichtungen notwendig. Zunächst ist sicherzustellen, dass der Netzdruck nicht unter bestimmte Höchst- und Untergrenzen fällt, oder es durch Lecks oder Ausfall der Umwälzpumpe zu Druckstößen kommt und im Fall von Lecks ein Leerlaufen des Systems verhindert wird. Durch die unterschiedliche Temperatur des Fernheizwassers dehnt sich und schrumpft das Volumen des Wassers. Es muss daher je nach Temperatur Wasser zu oder ab geführt werden. Dazu dienen Ausgleichsspeicher und Zu- und Abflusseinrichtungen. Um Korrosion im Fernwärmenetz zu verhindern muss das Heizwasser salzfrei und sauerstoffarm sein. In den Heizkraftwerken ist in der Regel eine Vollentsalzungsanlage vorhanden. Anlagen zur Entsalzung und Sauerstoffbindung sind aber vermutlich auch für Nahwärmesysteme notwendig oder zumindest sinnvoll.

In Heizstationen sind in der Regel Pumpeinrichtungen (Umwälzpumpen) vorhanden. Bei großen Fernwärmenetzen sind jedoch auch Zwischenpumpstationen notwendig. Darüber hinaus sind zur zentralen Steuerung und Überwachung des Gesamtsystems noch Fernleittechnik und eine Leitzentrale mit entsprechender Ausstattung an Technik notwendig.

Wenig bis keine Daten liegen bis jetzt für verwendete Materialien und Nenngrößen für die Rohre der Nahwärmenetze vor, die ihre Wärme durch dezentrale BHKW oder ähnliches bekommen.

Als Problem des Abschneidekriteriums bleibt die Frage zu beantworten, ob Wärmeübergabestationen und Hauszentralen noch im Fokus dieser Studie liegen, oder ob diese nicht schon jenseits der Grundstücksgrenze liegen. Einerseits liegt die Wärmeübergabestation noch in der Verantwortung des Fernwärmeversorgers. Andererseits bildet sie zusammen mit der Hauszentrale die so genannte Hausstation. In dieser Studie werden beide Einrichtungen als Einheit begriffen, die im Verantwortungsbereich der Hausverwaltung und damit außerhalb des Fokus dieser Studie liegt.

5.1.3.2 Der Materialbestand des deutschen Wärmenetzes

Die Datensituation im Fernwärmenetz ist nur unzureichend. Der Materialbestand des Fernwärmenetzes wird anhand der aktuellen Schätzung der Arbeitsgemeinschaft Fernwärme (AGFW) mit 25.000 km veranschlagt.⁶⁸ Allerdings liegen für den Anteil der verschiedenen Rohrmaterialien und Verlegungsarten, sowie der verwendeten Rohrdurchmesser nur Daten aus dem Jahr 1988 vor (Winkens 1994). Diese Daten sind nicht konsistent. So wird einmal der Anteil der Freileitungen mit 11 % und an einer anderen Stelle mit 18 % angegeben. Zusätzlich liegen für 10 bis 15 % des Fernwärmenetzes in Winkens (1994) keine Angaben zur Bauweise oder den Nenndurchmessern vor. Die Daten von Winkens werden in dieser Studie entsprechend den dort angegebenen prozentualen Anteilen auf die vollständige Netzlänge von 9.263 km angepasst.

Tab. 120: Struktur des Fernwärmenetzes 1988

Netzstruktur 1988 (9263 km)	
	in %
Kanalverlegt	40,4
Kunststoffmantelrohr (KMR)	24,3
Stahlmantelrohr (SMR)	8,8
Faserzementmantelrohr	6,6
Freileitung/Hausleitungen	19,9

Quelle: Eigene Abschätzung basierend auf Winkens (1994)

⁶⁸ Die offizielle Länge des Fernwärmenetzes wird mit 19.147 km angegeben (AGFW 2007). Diese Zahlen beruhen aber auf unvollständigen Befragungen der Netzbetreiber. Die AGFW schätzt die tatsächliche Länge des Fernwärmenetzes auf 25.000 km (AGFW 2007). Wir haben diese Schätzung übernommen.

Tab. 121: Verwendete Nenndurchmesser im Fernwärmenetz 1988

Nenndurchmesser	Kanalverlegt	KMR	Faserzement-	SMR	Freileitung
0-65	674	990	280	381	1004
80-125	748	540	255	117	422
150-200	861	405	204	54	160
250-300	599	180	51	20	85
350-500	636	90	25	39	120
600-700	187	23	0	0	30
800 und mehr	37	23	0	0	23
Summe	3742	2251	815	611	1844

Quelle: Eigene Abschätzung basierend auf Winkens (1994), Angaben in km

Es wird davon ausgegangen, dass die Erweiterung von 9.263 km (1988) auf jetzt 25.000 km überwiegend mit Kunststoffmantelrohren (KMR) erfolgte. Mittlerweile werden Fernwärmeleitungen fast ausschließlich als KMR-Rohre verlegt. Kanalverlegung wird aus Kostengründen nur noch in Ausnahmefällen durchgeführt. Freileitungen werden – wenn überhaupt – nur noch in Industriegebieten verlegt. Der Anstieg der Länge des Fernleitungsnetzes seit 1988 um 15.737 km wird anteilig über die Verteilung der durchschnittlichen Netzerweiterung der Jahre 2001 bis 2006 zugeschätzt (Besier 2007). Daher wird in dieser Studie die Annahme getroffen, dass 80 % des Zuwachses seit 1988 als KMR⁶⁹ erfolgte, die restlichen Verlegungsarten mit Ausnahme von Faserzementrohren wuchsen jeweils zwischen 2 - 10 % seit 1988. Daraus ergibt sich für die geschätzten 25.000 km Fernwärmenetz eine Verteilung nach Bauweise nach Tabelle Tab. 122.

Tab. 122: Struktur des Fernwärmenetzes in 2006

	in %	in km
Kanalverlegt	18,1	4.529
Kunststoffmantelrohr (KMR)	59,4	14.841
Stahlmantelrohr (SMR)	4,5	1.130
Faserzementmantelrohr	2,4	611
Freileitung/Hausleitungen	15,6	3.889
Gesamt	100,0	25.000

Quelle: Eigene Abschätzung basierend auf der Verteilung in 1988

Die prozentuale Verteilung nach Nenndurchmessern in 1988 wird auf die Struktur der heutigen Länge des Fernwärmenetzes von 25.000 km angewendet. Die Verteilung in 1988 führt jedoch dazu, dass gerade für die großen Nenndurchmesser, die als Hauptleitungen den Fernwärmetransport vom HKW in die feingliedrigen Netzebenen in Wohngebieten übernehmen, keine Stahlmantelrohre (SMR) Verwendung finden sollen, obwohl sie genau für diesen Zweck prädestiniert sind.

Für den spezifischen Materialbedarf der verschiedenen Verlegungsarten liegen zum Teil gut abgesicherte Daten vor. Für KMR gibt es detaillierte Herstellerangaben, die eine Aufteilung

⁶⁹ Bei geringen Nenndurchmessern werden in den letzten Jahren auch verstärkt sogenannte metallische Mediumrohr-Systemen (MMR) verwendet. Der genaue Marktanteil ist nicht bekannt, weshalb in dieser Studie der Netzzuwachs als herkömmliche KMR-Systeme unterstellt wird.

des Gesamtgewichtes in die Anteile des Mediumrohres aus Stahl⁷⁰, des PE-Mantelrohres und des PUR-Hartschaums ermöglichen. Auch für SMR kann über die Rohr-Durchmesser des Medium- und Mantelrohres, die jeweilige Wanddicke und die Dicke der Isolierschicht sehr genau der jeweilige Gewichtsanteil abgeschätzt werden. Kanalverlegte Wärmeleitungen und Freileitungen werden als SMR minus des Stahlmantels, mit zusätzlicher PE- oder Bitumenabdichtung abgeschätzt. Als Annahme dient – analog zum Erdgasnetz –, dass 85 % der SMR, Freileitungen und kanalverlegten Fernwärmeleitungen mit PE-Ummantelung und 15 % mit einer Bitumenabdichtung gegen Korrosion geschützt sind. Für den Materialverbrauch der Zementmantelrohre wurden die Daten aus dem Erdgasbereich (Betonmantelrohre) übernommen. Für Kanalverlegung liegen keinerlei Daten vor, aus denen hervorginge, welche Materialien verbaut wurden und in welcher Bauweise die Kanäle errichtet sind. Über Herstellerangaben liegen lediglich Daten für einen vollständig begehbaren Betonkanal vor, der verschiedene Rohrsysteme gleichzeitig aufnehmen kann. Diese Daten würden den Bestand mit ihren Altkanälen vermutlich deutlich überschätzen. Aus diesem Grund werden nur 50 % des Gewichtes pro Meter zur Abschätzung des Materialverbrauchs für Kanalbauten herangezogen. Für KMR und SMR wird der Bedarf an Sand aus den Abschätzungen der Gasnetze übernommen. Gleichzeitig wird analog zum Gasnetz mit 10 % zusätzlichem Gewicht für Armaturen wie Absperrhähne, Schieber u.ä. kalkuliert. Das Gewicht für Armaturen wird zu 50 % als Stahl und zu 50 % als Guss geschätzt. Aus diesen Annahmen ergibt sich folgender Materialbedarf für das Fernwärmenetz in Deutschland von 25.000 km Länge:

⁷⁰ Es gibt mittlerweile aus KMR mit einem Kunststoff-Mediumrohr. Wir gehen in diesem Bericht jedoch davon aus, dass für alle KMR ein Stahlmediumrohr verwendet wurde.

Tab. 123: Materialbestand Fernwärmenetz in t

in t	ND	Beton	Zement	Sand	Stahl	Guss- eisen	Mineral- wolle	PUR- Hart- schaum	PE	Bitumen
Kanal- verlegt	0-65	1.805.753			21.586	1.152	1.383		306	204
	80-125	2.006.392			37.093	1.975	2.390		476	340
	150-200	2.307.351			60.583	3.228	4.909		547	391
	250-300	1.605.114			95.769	5.092	8.844		543	399
	350-500	1.705.433			141.277	7.508	13.933		577	423
	600-700	501.598			85.962	4.460	6.659		272	170
	>800	100.320			22.484	1.152	1.503		54	34
Kunststoff- mantelrohr	0-65			3.917.894	24.056	2.057		10.650	8.489	
	80-125			2.137.033	32.860	2.376		8.837	8.192	
	150-200			1.602.775	41.290	2.818		10.680	7.212	
	250-300			949.793	51.767	3.496		14.297	7.361	
	350-500			474.896	38.841	2.530		7.588	6.708	
	600-700			148.405	20.419	1.411		5.894	3.309	
	>800			148.405	27.782	1.727		3.790	4.704	
Stahl- mantelrohr	0-65			423.029	25.408	1.317	1.196		264	176
	80-125			130.163	9.883	521	572		114	81
	150-200			59.658	5.996	318	469		52	37
	250-300			28.925	5.520	289	441		27	20
	350-500			57.850	14.061	743	1.309		54	40
	600-700			0	0	0	0		0	0
	>800			0	0	0	0		0	0
Freileitung/ Gebäude verlegt	0-65				7.828	695	3.592		794	529
	80-125				8.219	597	2.350		468	334
	150-200				5.234	361	1.594		178	127
	250-300				7.758	500	2.179		134	98
	350-500				16.564	1.046	4.591		190	140
	600-700				8.533	508	1.842		75	47
	>800				8.981	514	1.600		58	36
Faser- zement- mörtel	0-65		2.522		708					
	80-125		2.866		1.635					
	150-200		2.293		2.201					
	250-300		764		1.554					
	350-500		382		1.169					
	600-700		0		0					
	>800		0		0					
Gesamt		10.031.96	8.826	10.078.826	833.021	48.392	61.356	61.734	51.159	3.626

Quelle: Eigene Berechnungen auf Grundlage von Herstellerangaben und Annahmen aus Faist-Emmenegger et al. (2007)

Für das Nahwärmenetz stehen noch weniger Informationen zur Verfügung als für das Fernwärmenetz. Die AGFW schätzt das Nahwärmenetz auf rund 75.000 km Länge. Da Großteile dieses Netzes erst in den letzten Jahren aufgebaut wurden, wird in dieser Abschätzung von einem Nahwärmenetz ausgegangen, das zu 100 % aus KMR besteht. Weiterhin wird angenommen, dass nur die drei niedrigsten Nenndurchmesser in Nahwärmenetzen zum Einsatz kommen und die 75.000 km zu je einem Drittel den unteren drei Nenndurchmesserkategorien zugeschlagen werden. Über die Verlegungsart von Nahwärmenetzen liegen keine Informationen vor. Sie werden zum Teil erdverlegt und können dann mit einem entsprechenden Sandbedarf verbunden sein. Gleichzeitig werden sicherlich auch Teile des Nahwärmenetzes in Kellern von Gebäuden verlegt sein. Zudem werden Nahwärmenetze eventuell dann erstellt, wenn durch geplante Tiefbauarbeiten an Wasser-, Strom- oder Telekommunikationsleitungen eine gleichzeitige Verlegung mit anderen Netzinfrastrukturen erfolgen kann. Der Bedarf an Sand würde nach unserem Ermessen deutlich überschätzt, würde man jedem

Infrastruktursystem eine eigene Sandbettung zurechnen. Wir haben deshalb dem Nahwärmenetz keine eigene Bettung zugerechnet. Weiterhin werden keine Materialbedarfe für Armaturen geschätzt, da keine Informationen vorliegen inwieweit diese in dezentralen kleinen Nahwärmenetzen von Bedeutung sind. Aus Tab. 124 kann der spezifische Materialbedarf pro km Nahwärmeleitung und die Summe der gespeicherten Materialien, die sich aus dieser Abschätzung ergibt, entnommen werden.

Tab. 124: Spezifischer Materialbedarf und Materialbestand von Nahwärmenetzen

in t/km		ND	Stahl (Mediumrohr)	PE (Mantelrohr)	PUR-Hartschaum
Kunststoffmantelrohr	0-65	50	3	1	2
	80-125	100	9	2	2
	150-200	150	14	3	4

in t	ND	Netzlänge in km	Stahl (Mediumrohr)	PE (Mantelrohr)	PUR-Hartschaum
Kunststoffmantelrohr	0-65	25.000	84.225	32.500	40.775
	80-125	25.000	213.975	57.500	62.025
	150-200	25.000	360.050	67.500	99.950
Summe		75.000	658.250	157.500	202.750

Quelle: Eigene Abschätzung

Auf eine Abschätzung der jährlichen Flüsse der Fern- und Nahwärmenetze wird verzichtet, obwohl sie zukünftig an Bedeutung gewinnen. Die aktuellen jährlichen Zuwachsraten des Fernwärmenetzes liegen im Bereich weniger Kilometer bundesweit (46 km pro Jahr, BDEW 2009). Zu Nahwärmenetzen wiederum liegen keinerlei Daten vor, an Hand derer der jährliche Zuwachs oder der jährliche Materialbedarf der Erneuerung abgeschätzt werden könnte. Da beim Bau von Wärmenetzen heutzutage fast vollständig Kunststoffmantelrohre (KMR) bzw. flexible KMR verwendet werden, ließe sich aus den Bestandsschätzungen ableiten, welche Materialflüsse sich aus einem möglicherweise angestrebten oder erwarteten Ausbau des Fernwärme- bzw. Nahwärmenetzes um 10 % oder 20 % ergeben würden.

5.2 Infrastruktureinrichtungen zur Energieerzeugung

Im Bereich der Energieerzeugung kann auf umfangreiche Literatur und Sachbilanzen für verschiedene Energieerzeugungstechnologien zurückgegriffen werden (verschiedene EcoInvent-Berichte, Bauer 2008, Edelmann et al. 2001, Hirschberger 2005, FfE 1996, Ramesohl et al, 2005, Briem et al. 2004, Hennings et al, 2006, Mayer-Spohn et al. 2007, Marheinecke 2001, Manstein 1995, Salzer 2008, Nitsch et al. 2004). Da in der Literatur häufig der Materialbedarf für konventionelle Kraftwerke für typische Kraftwerksgrößen ausgewiesen ist, wird der Materialbestand der deutschen Stromerzeugungsinfrastruktur über den Materialverbrauch in Tonnen/MW anlagengenau hochgerechnet.

Zur Abschätzung des Bestandes an konventionellen Stein- und Braunkohlekraftwerke, Kernenergie, Erdgaskraftwerke und Heizkraftwerke konnte auf die UBA-Kraftwerksdatenbank (UBA 2006) zurückgegriffen werden. Allerdings sind in dieser Datenbank nur Kraftwerke mit einer Leistung >100 MW gelistet. In Gesprächen mit Vertretern des BDEW wurde deutlich, dass es im Moment keine vollständige anlagengenaue Auflistung deutscher Kraftwerke nach Energieträgern gibt. Der BDEW stellte dem Wuppertal Institut eine Auflistung zur Verfügung, die zum einen eine Bestandsaufnahme des BMWi mit Stichtag 31.12.2000 enthält, sowie darauf aufbauend die vom BDEW erfassten Zu- und Abgänge des Kraftwerkbestandes seit 2001.⁷¹ Aus diesen Daten ergibt sich für konventionelle Kraftwerke plus Wasserkraftwerke ein Bestand zum Jahre 2009 von:

Tab. 125: Bestand an Kraftwerken in Deutschland

	Bestand Ende 2000	Stilllegung seit 2001- 2005	Inbetriebnahme/ Modernisierung/ Erweiterung seit 2001	Bestand Ende 2009
Braunkohlekraftwerke	81	4	1	78
Steinkohlekraftwerke	51	11	5	45
Mischfeuerung	135			135
Heizöl	69	2		67
Erdgas	408	10	31	429
Kernkraftwerke	21	2		19
Müll	62	1	19	80
Laufwasserkraftwerke	316		4	320
Pumpspeicherwerke	60		2	62
Übrige	33			33

Quelle: BMWi / BDEW unveröffentlicht

Allerdings sind die Kraftwerksanlagen in der Auflistung des BMWi lediglich in sieben Leistungskategorien sortiert, die keine Rückschlüsse auf die genaue Leistung der einzelnen Kraftwerke zulassen.

Die in der UBA-Datenbank aufgelisteten Kraftwerke >100 MW repräsentieren jeweils mind. 85 % der installierten Bruttoleistung der einzelnen Kraftwerkskategorie.⁷² Für Erdgas-,

⁷¹ Wobei Zugänge in den Unterlagen des BDEW auch Modernisierung und Erweiterung sein können, die zu einer Leistungserhöhung geführt haben.

⁷² Der Vergleichswert für die Bruttoleistung der deutschen Strom- und Wärmeerzeugung stammt aus Nitsch (2008).

Mischfeuerung-⁷³ und Wasserkraftanlagen ist die Anzahl der in der UBA-Datenbank gelisteten Kraftwerke deutlich zu gering, da diese Kraftwerkskategorien häufig kleinere Anlagen mit Leistungen von unter <100 MW umfassen. In dieser Studie werden für Kraftwerke mit fossilen Brennstoffen die Angaben der UBA-Datenbank verwendet und anschließend um die fehlenden Kraftwerke (aus den BDEW-Unterlagen) unter <100 MW ergänzt. Die Bestandszahl der Wasserkraftanlagen wird vom BMU (ohne Jahr) mit einer Gesamtzahl von 7.654 Anlagen angegeben. Davon sind 7.300 Anlagen weder in der UBA noch in der BDEW-Datenbank enthalten, da ihre Leistung unter 1 MW liegt. Für Windenergieanlagen können Daten des Instituts für Solare Energieversorgungstechnik (ISET) der Universität Kassel (jetzt Fraunhofer Institut für Windenergie und Energiesystemtechnologie (IWES)) verwendet werden, die alle Windenergieanlagen sortiert nach Leistungsklassen enthalten. Diese werden durch DEWI-Statistiken ergänzt (DEWI 2009). Bei BHKW sind der Bestand und die Leistungsklasse der Anlagen unklar. Laut AGFW (2005) gab es 1998 rund 5.500 BHKW mit einer Leistung von 2,1 GW_{el.}. Neuere Angaben (Gores 2010) zeigen, dass der Bestand an BHKW in Deutschland eher im Bereich von 33.000 liegt, mit einer durchschnittlichen Leistung von 100 kW_{el.} pro Anlage. Für den Bestand an Biogasanlagen liegen aktuelle Daten aus den Veröffentlichungen der Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe (FNR) und des Deutschen Biomasse-Forschungszentrums (DBFZ) vor. Da aber keine Informationen über die Verteilung nach Leistungsklassen vorhanden sind, werden die Materialbedarfe der BHKW und Biogasanlagen über durchschnittliche Leistungsgrößen hochgerechnet.

5.2.1 Materialbestand und Materialflüsse der Braunkohle- und Steinkohlekraftwerke

Die UBA-Datenbank listet konventionelle Kraftwerke nach Anlagentyp und Primärenergieeinsatz (Tabelle 26). Für die Abschätzung des Materialbestandes wird als Unterscheidungskriterium die Art des Primärenergieeinsatzes gewählt.

Tab. 126: Kraftwerkstypen

Anlagentyp	Primärenergien
Dampfkraftwerk (DKW)	Steinkohle, Braunkohle, Erdgas und HS
Druckwasserreaktor (DWR)	Uran
Gasturbine mit Abhitzkessel (G/AK)	Erdgas
Gasturbine (GT)	Erdgas, HEL, Gichtgas und HS
Gas- und Dampfkraftwerk (GuD)	Steinkohle, Erdgas, Raffineriegas und HS
Heizkraftwerk (HKW)	Steinkohle, Braunkohle, Erdgas, Gichtgas und HEL
Siedewasserreaktor (SWR)	Uran
Sammelschienenanlage (SSA)	Steinkohle

Quelle: Umweltbundesamt (2006)

Für die Abschätzung des Materialbestands der Braunkohle- und Steinkohlekraftwerke werden zunächst die Daten der UBA-Datenbank verwendet, ergänzt um die BDEW-Informationen (für meist kleinere Kraftwerke bis 100 MW). Es gibt jedoch eine Überschnei-

⁷³ Mischfeuerungskraftwerke sind Kraftwerke, die neben Steinkohle auch noch mit Gas oder Heizöl betrieben werden (können). In dieser Studie werden Mischfeuerungskraftwerke komplett als Steinkohlekraftwerke gewertet.

derung der UBA-Datenbank mit der Abgrenzung der einzelnen Leistungsklassen in der BMWi-Datenbank, deren dritte Leistungskategorie Kraftwerke mit einer Leistung von 50 - 150 MW enthält. Die in dieser Kategorie enthaltene Anzahl an Kraftwerken wurde um die Kraftwerke bis einschließlich 150 MW aus der UBA-Datenbank bereinigt.

Aus den kombinierten Daten des UBA, BMWi und BDEW ergibt sich ein Bestand an 53 Braunkohlekraftwerken mit einer Leistung von 100 MW und mehr, für die eine individuelle Anlagenleistung bekannt ist, sowie 25 Braunkohlekraftwerken mit einer Leistung von 150 MW und weniger, denen über den Mittelwert ihrer Leistungskategorie eine Anlagenleistung zugewiesen wird.⁷⁴ Weiterhin sind in der UBA-Datenbank 50 Steinkohlekraftwerke mit einer Leistung von >100 MW verzeichnet, vier mehr als in der aktualisierten Auflistung des BMWi für alle Steinkohlekraftwerke. Allerdings sind in der BMWi-Liste zusätzlich noch insgesamt 135 Mischfeuerungskraftwerke gelistet, die neben Steinkohle auch Gas oder Öl als Primärenergiequelle verwenden und in unserer Abschätzung komplett als Steinkohlekraftwerke verbucht werden. Der Großteil dieser Kraftwerke hat eine Leistung von <150 MW (115 Kraftwerke). Für unsere Abschätzung verwenden wir somit die Angaben der 50 Steinkohlekraftwerke aus der UBA-Datenbank sowie 130 Kraftwerke der BMWi-Datenbank mit einer Leistung von kleiner 100 MW.

Aus verschiedenen Literaturquellen sind detaillierte Informationen über die verbauten Materialmengen pro MW vorhanden. Bei Dones et al. (2007) wird der Materialbedarf für zwei verschiedene Kraftwerksgrößen (100 und 500 MW) angegeben. Weiterhin stehen Daten von Manstein (1995) für ein 750 MW-Steinkohlekraftwerk zur Verfügung, die aber auf Grund der geringen Detailtiefe in dieser Studie nicht verwendet werden. Salzer (2008) schätzt den Materialbedarf für ein 600 MW-Braunkohle- bzw. ein 750 MW-Steinkohlekraftwerk ab. Ebenfalls sehr detaillierte Daten liegen aus der FfE-Studie (1996) für ein 550 MW-Steinkohle- und ein 978 MW-Braunkohlekraftwerk vor. Bauer (2008) schätzt in seiner Studie den Materialbedarf für zwei Steinkohlekraftwerke (400 MW und 800 MW) sowie ein Braunkohlekraftwerk (950 MW). Diese Angaben werden für diese Studie in Tonnen pro MW umgerechnet und diese Werte dann anschließend mit der Anlagenleistung der einzelnen Kraftwerke multipliziert.⁷⁵

Wir haben in dieser Studie den Bestand an Braun- und Steinkohlekraftwerken mit den Angaben in verschiedenen Literaturangaben hochgerechnet, um die mögliche Spannweite zu illustrieren (Tab. 127). Werden die Daten aus Dones et al. (2007) verwendet, ergibt sich der

⁷⁴ Die Kraftwerke in der BMWi/BDEW-Datenbank sind sortiert nach sieben Leistungsklassen (1-10 MW, >10-50 MW, >50-150 MW, >150-300 MW, >300-500 MW, >500-1000 MW, >1000 MW). Die Anzahl der höheren Leistungsklassen stimmt weitestgehend mit den Daten der UBA-Datenbank überein. Für diese Studie interessant sind die drei niedrigsten Leistungsklassen, die nur zum Teil durch die UBA-Datenbank abgedeckt sind. Zur Abschätzung des Materialbedarfs der Kraftwerksanlagen wird jeweils der Mittelwert der Leistungsklassen (5, 30, 100 MW) als Leistung der jeweiligen Anlagen verwendet.

⁷⁵ Aus Gründen der Vereinfachung unterstellt diese Methode einen linearen Zusammenhang des Materialverbrauchs pro MW. Vermutlich ist der Materialverbrauch pro MW bei größeren Anlagen geringer als bei kleineren Anlagen. Der Unterschied in den Daten von Bauer (2008) und Dones et al. (2007) ist allerdings nicht so groß, dass diese Vereinfachung nicht zulässig wäre. Bei der Berechnung des Materialbestandes von Kohlekraftwerken mit den Daten von Dones et al. (2007) und Bauer (2008) werden zudem die kleineren Anlagen mit den spezifischen Materialkoeffizienten der kleineren Anlage kombiniert. Konkret werden alle Anlagen bis 400 MW bei der Nutzung der Zahlen aus Dones et al. (2007) mit den Materialkoeffizienten der 100 MW Kraftwerke berechnet, die größeren Anlagen mit den Koeffizienten der 500 MW-Kraftwerke. Zur Berechnung des Materialbestandes der Steinkohlekraftwerke mit den Koeffizienten aus Bauer et al. (2008) werden alle Steinkohlekraftwerke bis 600 MW mit den Koeffizienten des 400 MW-Kraftwerks berechnet, Größere Anlagen werden mit den Koeffizienten des 800 MW-Kraftwerks berechnet.

niedrigste Materialbestand für den bestehenden Kraftwerkspark. Allerdings werden in Dones et al. (2007) deutlich weniger Materialkategorien abgeschätzt als in den restlichen drei Studien. Zudem ermitteln Dones et al. (2007) einen geringeren Betonbedarf pro MW als die restlichen Studien. Die gespeicherte Menge an metallischen Rohstoffen im Bestand der Kohlekraftwerke wird mit den unterschiedlichen Koeffizienten ebenfalls unterschiedlich hoch geschätzt, auch wenn die Differenzen zwischen den einzelnen Studien geringer sind (sowohl absolut als auch prozentual). Die Koeffizienten für Braunkohlekraftwerke unterscheiden sich zudem deutlicher als die der Steinkohlekraftwerke.

Für die weiteren Analysen der jährlichen Materialflüsse werden die Bestandsdaten, die sich aus der Verwendung der Materialkoeffizienten aus Bauer (2008) ergeben verwendet. Die Werte von Bauer sind zum einen am detailliertesten und zum andern zusammen mit den Daten von Salzer (2008) die aktuellsten Daten.

Tab. 127: Materialbestand der Steinkohlekraftwerke

in Tonnen		nach Dones et al. (2007)	nach Salzer (2008)	nach FfE (1996)	nach Bauer (2008)
Mineralische Rohstoffe	Beton	9.182.905	9.713.988	13.297.419	14.525.013
	Ziegelsteine/Mauerwerk		373.089	508.562	
	Asphalt/Bitumen		6.476	8.684	9.610
	Keramik/Fliesen			10.205	11.340
Metallische Rohstoffe	Stahl unlegiert	2.235.247	1.195.180	1.738.699	1.062.625
	Stahl legiert/rostfrei	248.361	226.660	304.911	1.071.118
	Gusseisen		34.683	25.561	28.379
	Aluminium	22.689	17.989	37.777	68.325
	Kupfer	38.328	35.978	52.249	20.096
	Messing			687	7.036
	Zink			245	3.013
	Blei			147	2.010
	sonstige NE Metalle		5.936		
Kunststoffe und sonstige Rohstoffe	Mineralwolle	24.299	75.553	101.850	112.956
	Glas		504	687	763
	Holz		72	98	90
	PVC			50.238	52.623
	PE			3.336	4.520
	PP			2.600	2.264
	Schmieröl			8.046	25.064
	Gummi			3.091	3.418
	Epoxidharz				5.988
	GFK			11.775	15.803
	SAN			540	756
	Sonstige	35.107	61.162	5.397	
	Summe Mineralische Rohstoffe		9.182.905	10.093.553	13.824.869
Summe Metallische Rohstoffe		2.544.625	1.516.425	2.160.276	2.262.602
Summe Kunststoffe und sonstige Rohstoffe		59.406	137.291	187.657	224.245
Summe Insgesamt		11.786.936	11.747.270	16.172.802	17.032.810

Quelle: Eigene Berechnung auf Grundlage der spezifischen Materialkoeffizienten aus Dones et al. (2007), Salzer (2008), FfE (1996) und Bauer (2008)

Tab. 128: Materialbestand der Braunkohlekraftwerke

in Tonnen		nach Dones et al. (2007)	nach Salzer (2008)	nach FfE (1996)	nach Bauer (2008)
Mineralische Rohstoffe	Beton	8.117.275	15.614.688	9.578.713	12.017.473
	Ziegelsteine/Mauerwerk		583.727	360.800	440.531
	Sand/Kies/Schotter			4.059.676	4.952.556
	Asphalt/Bitumen		23.714	73.839	18.032
	Keramik/Fliesen			739	821
Metallische Rohstoffe	Stahl unlegiert	2.179.375	2.297.147	2.928.056	3.532.458
	Stahl legiert/rostfrei	242.153	490.695	327.160	212.878
	Gusseisen		46.333	28.582	36.665
	Aluminium	16.235	7.297	59.514	91.390
	Kupfer	30.007	32.835	45.122	26.842
	Messing			1.701	9.385
	Zink			3.201	3.256
	Blei			425	2.684
	sonstige NE Metalle		132.251		
Kunststoffe und sonstige Rohstoffe	Mineralwolle	18.355	207.953	125.586	46.516
	Glas		839	515	629
	Holz		109	67	125.866
	PVC			37.356	
	PE			2.082	60.197
	PP			1.544	
	Schmieröl			8.796	24.517
	Gummi			783	
	Epoxidharz				
	GFK			7.274	
	SAN			336	
	Sonstige	25.766	76.249		
Summe Mineralische Rohstoffe		8.117.275	16.222.129	14.073.766	17.429.412
Summe Metallische Rohstoffe		2.467.769	3.006.557	3.393.762	3.915.559
Summe Kunststoffe und sonstige Rohstoffe		44.121	285.150	184.339	257.724
Summe Insgesamt		10.629.165	19.513.837	17.651.868	21.602.696

Quelle: Eigene Berechnungen auf Grundlage der spezifischen Materialkoeffizienten aus Dones et al. (2007), Salzer (2008), FfE (1996) und Bauer (2008)

Jährlicher Materialbedarf für Ausbau, Erneuerung und Instandhaltung

Konventionelle Kohlekraftwerke sind gekennzeichnet durch eine lange Nutzungsdauer. Den deutschen Kraftwerkspark zeichnet zudem aus, dass mehrere Kraftwerke in einer engen zeitlichen Phase von 10 - 20 Jahren errichtet wurden, so dass es zu typischen Investitionszyklen kommt, innerhalb derer sich große Teile des Kraftwerkspark erneuern und technische Pfadabhängigkeiten festgelegt werden. Nachdem viele westdeutsche Kraftwerke Mitte der 70er bzw. 80er Jahre errichtet wurden und Anfang der 90er Jahre der ostdeutsche Kraftwerksbestand ersetzt wurde, steht Deutschland aktuell am Beginn einer neuen Investitionsphase im Bereich der Energieerzeugung. Entsprechend oszillierend sind die Investitionsausgaben der Energiewirtschaft in den letzten 20 Jahren. Der BDEW (2008a) listet aktuell durchgeführte bzw. geplante Kraftwerksneubauten mit einer Gesamtleistung von 14,5 GW bzw. 24,3 GW auf. Die UBA-Kraftwerksdatenbank führt geplante oder schon begonnene Kraftwerksneubauten in einem Umfang von 28,2 GW elektrischer Bruttoleistung auf. Da in der UBA-Datenbank nur Kraftwerke mit einer Leistung von >100 MW gelistet sind, fehlen allerdings Neubauprojekte von kleineren Kraftwerken. Allerdings betrifft dies nach Daten des

BDEW (2008) lediglich 5 Müllverbrennungsanlagen, 2 Laufwasserkraftwerke und ein Pumpspeicherwerk, die aktuell errichtet werden.

Die von der BDEW zur Verfügung gestellten Informationen über Inbetriebnahme, Modernisierung bzw. Erweiterung führen für den Zeitraum 2001 bis 2009 nur ein einziges Braunkohlekraftwerk und fünf Steinkohlekraftwerke. Von den fünf gelisteten Steinkohlekraftwerken ist jedoch nur ein einziges ein Neubau. Bei drei Steinkohlekraftwerken finden Modernisierungen statt und bei einem erfolgte eine Umstellung des Primärenergieeinsatzes von Erdgas/Öl auf Steinkohle. Nimmt man diese Zahlen zum Maßstab, sind Neubauten von Kohlekraftwerke in den letzten Jahren kein bedeutender Faktor für jährliche Materialflüsse. Zudem sind die geplanten Kraftwerksbauten in den UBA- und BDEW-Veröffentlichungen zu spekulativ, um sie in diese Untersuchung zu integrieren. Andererseits sind zurzeit neun größere Steinkohlekraftwerke und drei Braunkohlekraftwerke im Bau. Für diese Studie werden daher die aktuellen Bauprojekte der großen Kraftwerksneubauten (>100 MW) als Referenzpunkt für die jährlichen Materialflüsse für Neubau und Erweiterung ausgewählt.

Kraftwerksneubauten sind mehrjährige Projekte – entsprechend liegt den Berechnungen eine geschätzte Bauzeit von vier Jahren zugrunde. Es werden also nur 25 % der hochgerechneten Materialbedarfe für den jährlichen Neubau der Kraftwerke angerechnet. Methodisch wird der jährliche Bedarf analog zum Bestand ermittelt. Für die Abschätzung der Materialflüsse werden die spezifischen Materialkoeffizienten aus Bauer (2008) verwendet. Demnach ergeben sich für den Neubau von zwölf Kohlekraftwerken mit einer Leistung zwischen 675 MW und 1.100 MW folgende Materialbedarfe pro Jahr:

Tab. 129: Materialbedarf für den aktuellen Neubau von Kohlekraftwerken (3 BKW, 9 SKW) pro Jahr

in Tonnen		Steinkohle- kraftwerk	Braunkohle- kraftwerk
Mineralische Rohstoffe	Beton	926.096	394.594
	Ziegelsteine/Mauerwerk		14.465
	Sand/Kies/Schotter		162.617
	Asphalt/Bitumen	648	592
	Keramik/Fliesen	760	27
Metallische Rohstoffe	Stahl unlegiert	70.331	115.988
	Stahl legiert/rostfrei	72.078	6.990
	Gusseisen	1.905	1.204
	Aluminium	4.595	3.001
	Kupfer	1.349	881
	Messing	471	308
	Zink	202	107
	Blei	135	88
Kunststoffe und sonstige Rohstoffe	Mineralwolle	7.596	1.527
	Glas	51	21
	Holz	6	4.133
	PVC	3.538	
	PE	303	1.977
	PP	152	
	Schmieröl	1.684	805
	Gummi	230	
	Epoxidharz	403	
	GFK	1.063	
SAN	51		
Summe Mineralische Rohstoffe		927.503	572.295
Summe Metallische Rohstoffe		151.067	128.567
Summe Kunststoffe und sonstige Rohstoffe		15.078	8.462
Summe Insgesamt		1.093.648	709.325

Quelle: Eigene Berechnungen, basierend auf den spezifischen Materialkoeffizienten in Bauer (2008)

In Ökobilanzierungen wird üblicherweise die Lebensdauer konventioneller Kraftwerke mit 35 bis 40 Jahren angegeben und über diesen Zeitraum abgeschrieben. Ein Großteil des Materialbestands ergibt sich aus Betonbauten. Diese können ohne große Instandhaltungen ihre komplette Nutzungsphase überstehen. Bestandteile der Maschinen- oder Steuerungstechnik sind jedoch störungsanfällig oder werden in der Nutzungsphase der Kraftwerke modernisiert und daher schon nach 10 - 15 Jahren ausgetauscht. Diese Bauteile entsprechen allerdings nur einem Bruchteil des Materialbestandes bzw. des Bedarfs bei Neubauten. Zudem zeigen die Daten, dass etliche Kraftwerke in Deutschland schon eine deutlich längere Nutzungsphase als 35 - 40 Jahre hinter sich haben.

In einer Studie der IER / DLR / LEE / FfE (2004) werden für verschiedene Kraftwerkstypen die Ersatzteile über die Nutzungsdauer mit einem Gesamtgewicht mit einigen hundert Tonnen angegeben. Der Materialbedarf der Instandhaltung von konventionellen Kraftwerken liegt also im Bereich von 0,1 % der zur Erstellung notwendigen Materialmengen. Wenn man das Verhältnis zwischen Herstellungs- und Instandhaltungsaufwand materialspezifisch betrachtet, resultieren bei Kupfer oder anderen Metallen Werte um höchstens 2 - 3 %.

Um Überschätzungen bei den Energieerzeugungsinfrastrukturen zu vermeiden, werden nur 10 % des Materialbestandes der Bautechnik in konventionellen Kraftwerken in die jährliche Abschreibung einbezogen. Der Materialbestand der Maschinen- und Elektrotechnik wird dagegen vollständig abgeschrieben. Die Anteile der einzelnen Stoffkategorien in der Bau-, Ma-

schinen- und Elektrotechnik werden den Daten der FfE (1996) entnommen. Als technische Lebensdauer wird ein Zeitraum von 40 Jahren verwendet.

Tab. 130: Jährlicher Materialbedarf für Instandhaltung, abgeleitet über die technische Lebensdauer von 40 Jahren

in Tonnen		Steinkohle- kraftwerke	Braunkohle- kraftwerke
Mineralische Rohstoffe	Beton	36.313	30.044
	Ziegelsteine/Mauerwerk	0	1.101
	Sand/Kies/Schotter	0	12.381
	Asphalt/Bitumen	24	45
	Keramik/Fliesen	284	4
Metallische Rohstoffe	Stahl unlegiert	18.251	8.831
	Stahl legiert/rostfrei	26.778	5.322
	Gusseisen	709	917
	Aluminium	456	880
	Kupfer	502	415
	Messing	176	235
	Zink	75	81
	Blei	50	67
sonstige NE Metalle	0	0	
Kunststoffe und sonstige Rohstoffe	Mineralwolle	2.711	847
	Glass	2	2
	Holz	0	315
	PVC	1.263	0
	PE	113	1.505
	PP	38	0
	Schmieröl	627	613
	Gummi	85	0
	Epoxidharz	150	0
	GFK	395	0
	SAN	19	0
	Sonstige	0	0
Summe Mineralische Rohstoffe		36.620	43.575
Summe Metallische Rohstoffe		46.998	16.747
Summe Kunststoffe und sonstige Rohstoffe		5.403	3.281
Summe Insgesamt		89.021	63.603

Quelle: Eigene Berechnungen, basierend auf Annahmen abgeleitet aus FfE (1996)

Aus dem Neubau und der Instandhaltung konventioneller Kraftwerke mit Kohlefeuerung ergeben sich nach unserer Abschätzung jährliche Materialflüsse von insgesamt rund 2 Mio. Tonnen. 92 % (oder 1,8 Mio. Tonnen) ergeben sich dabei durch die aktuellen Neubauten an Kohlekraftwerken. Während es bei der Instandsetzung nur geringe Unterschiede in der Dimension der Materialflüsse zwischen Braun- und Steinkohlekraftwerken gibt, sind die Aufwendungen für Neubau durch die größere Anzahl an Neubauten bei Steinkohlekraftwerken um ein Drittel höher als bei Braunkohlekraftwerken.

5.2.2 Materialbestand und Materialflüsse der Erdgaskraftwerke

Kraftwerke mit Erdgaseinsatz sind entweder als Dampfkraftwerke (DKW), Gasturbinenkraftwerke (GT) oder Gas- und Dampfkraftwerk (GuD) konstruiert. In der UBA-Kraftwerksdatenbank sind 83 Erdgas-Kraftwerke mit einer Leistung von >100 MW gelistet. Die um die Zu- und Abgänge bereinigten Daten des BMWi geben einen Gesamtbestand von

429 Gaskraftwerken mit einer Leistung von >1 MW für Deutschland an. Der UBA-Datensatz umfasst allerdings einen höheren Bestand an Gas-Kraftwerken mit höherer Leistung als die Daten des BMWi. Während laut UBA-Datenbank der Bestand der 83 leistungsstärksten Gaskraftwerken eine Leistung >100 MW besitzen, ergibt sich aus den Daten des BMWi ein Bestand von 82 Gaskraftwerken mit einer Leistung >50 MW. Analog zur Vorgehensweise bei den Kohlekraftwerken werden die anlagengenauen UBA-Daten mit den Daten der kleineren Kraftwerke aus der Zusammenstellung des BMWi ergänzt. Konkret werden zusätzlich zu den Gaskraftwerken der UBA-Datenbank der Materialbedarf für 235 Gaskraftwerke mit einer Leistung von 5 MW und 102 Gaskraftwerke mit einer Leistung von 30 MW abgeschätzt. Das methodische Vorgehen ist identisch mit der Abschätzung des Materialbestandes und der Materialflüsse im Bestand der Kohlenkraftwerke.

Für Gaskraftwerke können wiederum Daten von EcoInvent (Faist-Emmenegger et al. 2007), Salzer (2008), FfE (1996) und Bauer (2008) verwendet werden. Die EcoInvent-Daten beruhen wiederum auf älteren Studien von Jensch (1988) und Fritsche et al. (1989).⁷⁶ Der Materialbestand bei Faist-Emmenegger et al. (2007) bezieht sich auf eine Kraftwerksgröße von 100 MW. Bei Salzer (2008) und FfE (1996) wird der Materialbestand eines 350 MW GuD-Kraftwerk abgeschätzt, bei Bauer (2008) ein 400 MW Gaskraftwerk. Die Koeffizienten sind - wie auch in anderen Fällen - in bestimmten Stoffgruppen recht identisch und gehen bei anderen Materialarten zum Teil deutlich auseinander. Wie schon bei den Kohlekraftwerken sind die Daten des Stahl- und Betonaufwandes bei den EcoInvent-Abschätzungen niedriger geschätzt als bei der FfE (1996) oder Bauer (2008). Es wird bei der Abschätzung des Materialbedarfs nicht zwischen DKW, GT und GuD unterschieden.

⁷⁶ Inwieweit diese Daten noch den Stand der heutigen Technik und die Situation der deutschen Erdgaskraftwerke abbilden, sollte bei Nachfolgearbeiten, die sich speziell diesen Anlagen widmen, überprüft werden. Auch Manstein und Salzer beziehen sich auf Studien aus den Jahren 1993 bzw. 1996 und damit auf einen knapp 20 Jahre alten Technikstand. Für die Größenordnung der in dieser Studie ermittelten Materiallager dürften die verwendeten Daten ausreichend sein.

Tab. 131: Materialbestand der Gaskraftwerke in Deutschland

in Tonnen		nach Faist- Emmenegger et al. (2007)	nach Salzer (2008)	nach FfE (1996)	nach Bauer (2008)
Mineralische Rohstoffe	Beton	1.024.330	2.487.659	2.477.781	921.897
	Ziegelsteine/Mauerwerk		17.560	17.560	
	Sand/Kies/Schotter			11.560	
	Asphalt/Bitumen		8.195	8.195	
	Keramik/Fliesen				269
Metallische Rohstoffe	Stahl unlegiert	140.845	248.766	540.627	563.382
	Stahl legiert/rostfrei		2.427.662	97.019	115.237
	Gusseisen			33.071	
	Aluminium	19.206	21.950	3.439	28.169
	Kupfer	19.206		14.487	28.169
	Messing			439	
	Zink			219	
	Blei			366	
	sonstige NE Metalle		43.900		512
Kunststoffe und sonstige Rohstoffe	Mineralwolle	38.412	3.658	9.146	42.254
	Holz			1.829	
	PVC			5.487	
	PE	38.412	29.267		83.227
	PP			3.000	
	Gummi			439	
	Sonstige	17.756	2.195	146	
Summe Mineralische Rohstoffe		1.024.330	2.513.413	2.515.096	922.166
Summe Metallische Rohstoffe		179.258	2.742.278	689.667	735.469
Summe Kunststoffe und sonstige Rohstoffe		94.581	35.120	20.048	125.480
Summe Insgesamt		1.298.168	5.290.811	3.224.810	1.783.115

Quelle: Eigene Berechnungen, basierend auf spezifischen Materialkoeffizienten in Faist-Emmenegger et al. (2007), Salzer (2008), FfE (1996) und Bauer (2008)

Gaskraftwerke sind pro Anlage deutlich weniger ressourcenaufwändig als Kohle- und Kernkraftwerke. Der Grund liegt vor allem an der einfacheren Konstruktion. So benötigt ein Gaskraftwerk im Gegensatz zu einem Kohlekraftwerk z.B. keine Aufbereitung und Lagerung des Brennstoffs, die Entschwefelung erfolgte schon vor Einspeisung ins das Gasnetz und es muss anschließend keine Asche entsorgt werden. Im Gegensatz zu Kernkraftwerken benötigen Gaskraftwerke kein großes Reaktorgebäude aus Stahlbeton oder enorme Sicherheitsbehälter aus zentimeterdickem Stahl.

Jährlicher Materialbedarf für Ausbau, Erneuerung und Instandhaltung von Erdgaskraftwerken

Für die Abschätzung der jährlichen Materialbedarfe für Neubau und Instandsetzung werden die Koeffizienten der FfE-Studie (1996) verwendet. Zum einen weil sie in der Bestandschätzung den mittleren Wert zwischen Bauer (2008) bzw. Faist-Emmenegger et al. (2007) am unteren Ende der Abschätzung und Salzer (2008) am oberen Ende der Abschätzung bildet. Zudem sind die Daten der FfE hinsichtlich der einzelnen Materialkategorien am detailliertesten.

Die jährlichen Inbetriebnahmen an Gaskraftwerken waren im Zeitraum 2001 bis 2009 sehr unterschiedlich. Wurde laut BDEW-Unterlagen im Jahr 2003 kein einziges Gaskraftwerk in Betrieb genommen, waren es im Jahr 2005 zehn Inbetriebnahmen und drei Erweiterungen.

Ebenfalls sehr unterschiedlich sind die Leistungsklassen der in Betrieb genommenen Anlagen. Diese reichen von kleinen Anlagen der Stadtwerke mit 12 MW bis zu großen Gaskraftwerken mit 850 MW. Der Bau von drei Gaskraftwerken mit einer Leistung von jeweils 150 MW sollte eine realistische Annahme für die Abschätzung des Materialbedarfs des Neubaus von Gaskraftwerken darstellen. Der Materialbedarf für Instandhaltung wird wie bei den Kohlekraftwerken über eine technische Lebensdauer von 40 Jahren abgeschätzt. Wobei auch bei Gaskraftwerken der Materialbestand der Bautechnik nur mit 10 % in die Berechnung einfließt.

Tab. 132: Jährlicher Materialbedarf für Neubau und Instandhaltung von Erdgaskraftwerken

in Tonnen		Neubau	Anteil an der Abschreibung über die Lebensdauer in %	Instandhaltung
Mineralische Rohstoffe	Beton	43.541	10,0	6.194
	Ziegelsteine/Mauerwerk	309	10,0	44
	Sand/Kies/Schotter	203	10,0	29
	Asphalt/Bitumen	144	10,0	20
Metallische Rohstoffe	Stahl unlegiert	9.500	10,0	0
	Stahl legiert/rostfrei	1.705	77,4	10.460
	Gusseisen	581	100,0	2.425
	Aluminium	60	100,0	827
	Kupfer	255	100,0	86
	Messing	8	100,0	362
	Zink	4	100,0	11
	Blei	6	100,0	5
Kunststoffe und sonstige Rohstoffe	Mineralwolle	161	64,0	6
	Holz	32	100,0	0
	PVC	96	100,0	229
	PP	53	100,0	46
	Gummi	8	100,0	137
	Sonstige	3	100,0	0
Summe Mineralische Rohstoffe		44.196		6.288
Summe Metallische Rohstoffe		12.119		14.177
Summe Kunststoffe und sonstige Rohstoffe		352		417
Summe Insgesamt		56.668		20.882

Quelle: Eigene Abschätzung auf Basis der Daten von FfE (1996)

5.2.3 Materialbestand und Materialflüsse von Blockheizkraftwerken (BHKW)

Die Fernwärmenachfrage wird zu großen Teilen durch Heizkraftwerke (HKW), in zunehmendem Maß auch durch Nahwärmenetze mit dezentralen Block-Heiz-Kraftwerken (BHKW) befriedigt. Weiterhin sorgen Kleinkraftwerke oder Industrieunternehmen für ein Angebot an Wärmeleistung. Die in der UBA-Kraftwerksdatenbank gelisteten größeren HKW werden in dieser Studie nicht separat in ihrem Materialbestand erfasst, da diese in den Kohle- und Gaskraftwerken über die Ergänzung der UBA-Daten durch Daten des BMWi/BDEW miterfasst sind.

Es wird daher in diesem Kapitel nur der Materialbedarf für den Bestand an BHKW abgeschätzt. Es gibt wenige konkrete Zahlen wie hoch der Bestand an BHKW ist, zumal nur größere Anlagen genehmigungspflichtig sind. Das Öko-Institut (Gores 2010) gibt in einer aktuellen Präsentation von Dez. 2010 den Bestand an BHKW mit insgesamt 33.000 Anlagen und

einer Gesamtleistung von 3.500 MW_{el.} an. Über Marktbefragungen schlussfolgert Gores (2010), dass in den Jahren 2006 bis 2010⁷⁷ der Bestand rasant um jährlich 3.800 bis 6.500 Anlagen anwuchs. Insgesamt ist laut Gores in den Jahren 2006 bis 2010 der Bestand um 20.070 Anlagen oder 2.100 MW_{el.} gestiegen. Zwei Drittel der installierten Leistung (rund 2.400 MW_{el.}) wird von Anlagen <1 MW_{el.} beigesteuert. Der starke Anstieg der BHKW seit 2006 ist vor allem auf die Zunahme der Biogasanlagen mit Stromeinspeisung zurückzuführen. Aus der Präsentation von Gores (2010) geht hervor, dass die installierte Leistung von BHKW mit fossilem Brennstoffeinsatz seit 2001 wieder rückgängig ist und seit 2003 die Wachstumsdynamik allein auf die Zunahme von BHKW mit biogenem Brennstoffeinsatz, und dabei vor allem Biogas, zum Teil auch Pflanzenölen, zurückgeführt werden kann. 33.000 BHKW mit einer Gesamtleistung von 3.500 MW_{el.} ergibt ziemlich genau eine durchschnittliche Leistung von 100 kW_{el.}

Heck (2007) ermittelte für EcoInvent in einer Studie zur Wärme-Kraft-Kopplung den Materialbedarf für zwei kleine BHKW (160 kW_{el.} und 35 kW_{el.}) und gibt für größere BHKW einen Skalierungsfaktor an. Heck schätzt, dass der Motor und der Generator des BHKW linear mit der Leistung wachsen, die restlichen Bauteile jedoch mit einer Proportionalität von $P^{2/3}$. Das heißt, das Gewicht nimmt mit zunehmender Leistung nicht im selben Maße sondern schwächer zu. Diese Annahme wurde in dieser Studie übernommen und die Werte der Referenzanlage aus Heck (2007) mit Hilfe des Skalierungsfaktors für verschiedene BHKW bis zu einer Leistung von 1.000 kW_{el.} hochgerechnet.

In der untenstehenden Tabelle wird der Materialbedarf für unterschiedliche Leistungsklassen von BHKW dargestellt. Die 160 kW_{el.} – Anlage stellt die Referenzanlage dar, die restlichen größeren Anlagen werden mittels des Korrekturfaktors geschätzt bzw. das BHKW mit 200 kW_{el.} und Dieselmotor um spezifische Materialbedarfe nach Heck (2007) ergänzt.

⁷⁷ Die Daten für 2010 sind in dieser Befragung Prognosen.

Tab. 133: Spezifischer Materialbedarf pro BHKW nach verschiedenen Leistungsklassen

	Material in kg	Lambda1-Motor	Mini-BHKW	Mager-motor	Mager-motor	Mager-motor	Mager-motor	Diesel-motor
	Leistung in kW	160	2-5	50	200	500	1000	200
metallische Rohstoffe	Gusseisen	1.595		498	1.994	4.984	9.969	1.994
	Chromstahl 18/8	236	308	94	283	603	1.086	483
	Stahl, unlegiert/niedriglegiert	6.900	437	3.133	8.033	15.044	24.268	11.113
	Aluminium	87	29	40	101	187	297	101
	Kupfer	272	29	88	339	834	1.652	339
	Zinn	3		1	3	6	9	3
	Blei	1	0	1	1	3	4	1
	Nickel	1	0	0	1	1	2	1
	Zink	0	0	0	0	1	1	0
	Palladium	0		0	0	0	0	0
	Platin	0		0	0	0	0	0
Rhodium	0		0	0	0	0	0	
Titanoxid								0
Kunststoff und sonstiges	PVC	12	5	6	14	26	41	14
	PE	126	13	58	146	269	427	216
	Polyester		50					
	Mineralwolle	571	26	263	663	1.220	1.937	663
	Acrylharzlack	4	1	2	5	9	14	5
	Gummi	10		5	12	21	34	12
Zeolith	8	0	4	9	17	26	9	
Mineralische Rohstoffe	Beton	5.750		2.648	6.672	12.290	19.510	8.627
Summe metallische Rohstoffe		9.095	804	3.855	10.756	21.663	37.289	14.036
Summe Kunststoff und sonstige		723	94	333	839	1.546	2.453	909
Summe Mineralische Rohstoffe		5.758	0	2.652	6.681	12.307	19.536	8.636
Summe Insgesamt		15.576	899	6.840	18.276	35.516	59.279	23.582

Quelle: Eigene Berechnung auf Grundlage von Heck (2007)

Bei geschätzten 33.000 BHKW und einer installierten Bruttoleistung von 3.500 MW wird die 160 kW_{el.} mit Lambda1-Motor als Referenzanlage gewählt, um den Materialbedarf abzuschätzen. Danach ergibt sich aus dem Bestand von 33.000 BHKW ein Materialbestand von rund 514.000 Tonnen. Den größten Anteil an diesem Materialbestand haben metallische Rohstoffe mit 300.000 Tonnen, gefolgt von Beton mit 189.750 Tonnen. Geht man von den Zuwächsen der letzten vier Jahre aus, werden pro Jahr rund 5.000 neue BHKW in Betrieb genommen. Auch hier werden die spezifischen Materialkoeffizienten eines 160 kW_{el.} BHKW als Referenzanlage verwendet. Die jährliche Instandhaltung wird über eine technische Lebensdauer von 10 Jahren pro BHKW abgeschätzt.

Tab. 134: Materialbestand und jährlicher Materialbedarf für BHKW

in Tonnen	160 kWel.	Bestand	Neubau	Instandhaltung
		33.000 BHKW	5000 BHKW	10 Jahre technische Lebensdauer
metallische Rohstoffe	Gusseisen	52.635	7.975	5.264
	Chromstahl 18/8	7.788	1.180	779
	Stahl, unlegiert/niedriglegiert	227.690	34.499	22.769
	Aluminium	2.886	437	289
	Kupfer	8.986	1.362	899
	Zinn	86	13	9
	Blei	41	6	4
	Nickel	18	3	2
	Zink	13	2	1
	Palladium	0,5	0,1	0,1
	Platin	2,2	0,3	0,2
	Rhodium	0,3	0,0	0,0
Kunststoff und sonstiges	PVC	396	60	40
	PE	4.155	629,5	415
	Mineralwolle	18.843	2855	1.884
	Acrylharzlack	139	21	14
	Gummi	330	50	33
	Zeolith	257	39	26
Mineralische Rohstoffe	Beton	189.750	28750	18.975
Summe metallische Rohstoffe		300.147	45.477	30.014
Summe Kunststoff und sonstige Materialien		24.119	3.655	2.412
Summe Mineralische Rohstoffe		189.750	28.750	18.975
Summe Insgesamt		514.016	77.881	51.402

Quelle: Eigene Berechnung auf Grundlage von Heck (2007)

5.2.4 Materialbestand und Materialflüsse der Kernkraftwerke

Der Materialbestand und der jährliche Materialbedarf der 17 noch im Betrieb befindlichen Kernkraftwerke (11 Druckwasser- und 6 Siedewasserreaktoren) wird zum einen mit den Daten des EcoInvent-Reports „Kernenergie“ (Dones 2007) und zum anderen mit den Angaben der FfE-Studie von 1996 berechnet. Die Zahlen bei Dones beruhen auf je einem Schweizer 1.000 MW-Reaktor jeder Bauart. Für die Kraftwerke der 1.300 MW-Klasse werden die Daten mit einem Korrekturfaktor von 1,2 hochgerechnet. Der Zuwachs an Material verläuft demnach nicht linear zum Zuwachs an Leistung. In der Studie der Forschungsstelle für Energiewirtschaft (FfE 1996) ist nur der Materialbedarf für ein Kraftwerk mit einem 1.400 MW Druckwasserreaktor abgeschätzt. Die Daten der einzelnen Materialkategorien sind in Dones (2007) und FfE (1996) häufig recht identisch. Allerdings analysiert die FfE-Studie den Materialbedarf eines DWR in größerer Detailtiefe. Ein Teil der höheren aggregierten Materialbestandswerte der FfE erklärt sich aus diesem Umstand. Der andere Faktor für die höheren Materialbestände pro MW liegt in einer höheren Abschätzung des Betonbedarfs in der Studie der FfE (1996). Für die Abschätzung werden die Kernkraftwerke entweder der 1.000 MW-Klasse oder der 1.300 MW-Klasse zugerechnet.

Tab. 135: Materialbestand der deutschen Kernkraftwerke

in Tonnen		nach Dones (2007)	nach Dones (2007)	nach FfE (1996)
		Siedewasser- reaktor	Druckwasser- reaktor	Druckwasser- reaktor
mineralische Rohstoffe	Beton	3.039.036	5.059.080	7.766.383
	Mauerwerk			68.946
	Asbestzement	34.980	68.900	89.705
	Bitumen			9.591
	Dachpappe			1.725
metallische Rohstoffe	Stahl unlegiert, niedriglegiert	435.864	795.093	964.977
	Stahl legiert, rostfrei			54.496
	Gusseisen			6.941
	Aluminium	1.320	2.600	2.272
	Kupfer	9.722	19.149	21.958
	Blei			1.104
	Titan	862		
Kunststoff und sonstiges	PP			1.336
	PE			421
	PVC			6.310
	Polystyrol-Hartschaum			326
	Mineralwolle			35.020
	Glas			578
	Schmieröl			5.363
Summe Mineralische Rohstoffe		3.074.016	5.127.980	7.936.349
Summe Metallische Rohstoffe		447.768	816.842	1.051.748
Summe Kunststoffe und sonstige Rohstoffe				49.354
Summe Insgesamt		3.521.784	5.944.822	9.037.451

Quelle: Eigene Berechnung basierend auf spezifische Materialkoeffizienten in Dones (2007) und FfE (1996)

Der Materialbestand von Kernkraftwerken wird zu 85 % durch Beton bestimmt. Die enorme Menge an Beton ergibt sich vor allem aus den materialaufwändigen Baumaßnahmen der Reaktorkuppel. Auch der hohe Anteil an Baustahl erklärt sich aus dem immensen Materialaufwand für die Schutzhülle des Reaktors.

Jährliche Materialflüsse für die Instandhaltung der deutschen Kernkraftwerke

In Deutschland wurden 1988 die letzten Kernkraftwerke (KKW) in Betrieb genommen. Ein Neubau eines Kernkraftwerkes ist zurzeit nicht angedacht, allerdings wurden vor wenigen Monaten die Laufzeiten der bestehenden KKW's verlängert. Somit fällt kein Materialbedarf für den Neubau an, allerdings für die Instandsetzung und Modernisierung. Laut FfE (1996) werden in 40 Betriebsjahren 30 % der Maschinenteknik und 50 % der Elektrotechnik ausgewechselt. Die Gebäudebestandteile, die den Großteil des Materialbestandes von KKW ausmachen, müssen vermutlich nur wenig instand gehalten werden. Um die jährlichen Materialbedarfe der Energieerzeugung aus Kernenergie mit denen der anderen konventionellen Kraftwerke vergleichen zu können, wird in dieser Studie der jährliche Instandhaltungsaufwand, mit Ausnahme der Bautechnik, komplett über die technische Lebensdauer abgeschätzt. Der Materialbestand der Bautechnik wird analog zu Kohle- und Gaskraftwerken nur mit 10 % in die jährliche

Abschreibung einbezogen. Die in der FfE-Studie (1996) angegebene Lebensdauer von 40 Jahren wird für Deutschland als realistisch angesehen, auch wenn in anderen Ländern schon Betriebsgenehmigungen für 60 Jahre ausgestellt wurden. Je nachdem, ob man die Daten von Dones oder FfE verwendet, kommt man auf einen jährlichen Materialbedarf von 27.220 Tonnen (Dones) oder 37.403 Tonne (FfE).

Tab. 136: Jährlicher Materialbedarf für Instandhaltung, abgeleitet aus der technischen Lebensdauer

in Tonnen		nach Dones (2007)	nach Dones (2007)	nach FfE (1996)
		SWR	DWR	DWR
mineralische Rohstoffe	Beton	7.689	12.799	19.649
	Mauerwerk			172
	Asbestzement	875	1.723	2.243
	Bitumen			24
	Dachpappe			4
metallische Rohstoffe	Stahl unlegiert, niedriglegiert	1.193	2.177	2.642
	Stahl legiert, rostfrei			1.362
	Gusseisen			174
	Aluminium	15	30	26
	Kupfer	235	463	531
	Blei			28
	Titan	22		
Kunststoff und sonstiges	PP			33
	PE			11
	PVC			158
	Polystyrol-Hartschaum			1
	Mineralwolle			182
	Glass			1
	Schmieröl			134
Summe Mineralische Rohstoffe		8.563	14.522	22.092
Summe Metallische Rohstoffe		1.465	2.670	4.762
Summe Kunststoffe und sonstige Rohstoffe				520
Summe Insgesamt		10.028	17.192	27.375

Quelle: Eigene Berechnung auf Basis von Dones (2007) und FfE (1996)

Gleichzeitig wurden mit den KKW's Stade und Obrigheim die ersten beiden KKW im Rahmen der früheren Vereinbarung über den Ausstieg aus der Atomenergie abgeschaltet und werden zurzeit zurückgebaut. Dies betrifft aktuell neben diesen beiden KKW's zusätzlich noch die KKW's Mühlheim-Kärlich, Greifswald und Würgassen. Der Rückbau erfolgt in mehreren Phasen und dauert zehn und mehr Jahre. Das KKW Gundremmingen A wurde z.B. über 20 Jahre (1985 - 2005) zurückgebaut. In Greifswald werden seit 1995 die beiden genutzten sowie die vier fertig gestellten, jedoch nie genutzten, Kraftwerksblöcke für geschätzte 5 Mrd. Euro zurückgebaut. Laut Kraftwerksbetreiber (E.ON 2006) können 99 % der Rückbaumassen für die Verwertung bzw. Wiederverwendung freigegeben werden. Die Menge an radioaktiven Abfällen, die konditioniert und sicher eingelagert werden müssen beträgt z.B. im KKW Stade rund

3.000 t von ca. 330.000 t Rückbaumasse. Für die sichere Einlagerung der radioaktiven Abfälle entsteht ein zusätzlicher Materialbedarf für Stahl und Beton (Stahl für Fässer und Container und Beton für die Verfüllung). Laut Dones (2007) sind dies Mengen von 3.000 - 5.300 t Beton und 400 - 700 t Stahl pro KKW der Klasse 970 MW. Über eine betrachtete Zeitspanne des Rückbaus von rund 13 Jahren ist dieser jährliche Materialbedarf allerdings zu vernachlässigen.

Während die Menge dieser Abfälle als solche relativ klein ist, ist der ressourcenbezogene Aufwand für die sichere Zwischen- und Endlagerung dieser Abfälle wie auch bei den Abfällen aus Kernbrennstoffen noch nicht untersucht.

Aus den Rückbaumassen, die E.ON für das KKW Stade angibt, wird mit Bezug zur Kraftwerksleistung der drei anderen KKW, die derzeit zurückgebaut werden, die Rückbaumenge überschlagsmäßig hochgerechnet. Gleichzeitig wird eine durchschnittliche Zeitspanne für den kompletten Rückbau von 13 Jahren unterstellt. Der Rückbau der sechs Kraftwerksblöcke in Greifswald wird wegen fehlender Informationen der gespeicherten Materialmengen in russischen Kraftwerkstypen nicht mit einbezogen. Aus diesen Annahmen ergibt sich eine jährliche Rückbaumasse von rund 110.000 t. Diese umfasst 95.000 t Beton sowie überwiegend Stahl.

5.2.5 Materialbestand und Materialflüsse der Wasserkraftanlagen

Neben vielen Kleinanlagen (ca. 7.300) mit einer Leistung von <1 MW tragen die etwa 354 größeren Wasserkraftwerke (>1 MW) zu 90 % zu der durch Wasserkraft produzierten Strommenge bei (BMU 2008). Insgesamt sind in Deutschland 4.630 MW an Wasserkraftanlagen installiert.⁷⁸ Der Anteil der Wasserkraft bei der Stromerzeugung liegt in Deutschland bei ca. 5 % (Bundesverband Deutscher Wasserkraftwerke e. V. BDW). Aufgrund des Gewässerschutzes und der topographischen Bedingungen in Deutschland ist in Zukunft nur ein begrenzter Ausbau der Wasserkraftinfrastruktur zu erwarten. Vielmehr sind über Modernisierungs- und Ausbaumaßnahmen der bestehenden Kraftwerke Potentiale von weiteren 2 TWh/a möglich (BMU 2004). Aktuell werden mit Wasserkraftanlagen in Deutschland rund 19,7 TWh Strom pro Jahr produziert (BMU 2011).

Wasserkraftanlagen (WEA) können Laufwasserkraftwerke (LWK) sein, die zumeist an Flüssen erbaut sind, sowie Speicherkraftwerke (SKW), die in Deutschland jedoch nur eine untergeordnete Rolle spielen. Die UBA-Kraftwerksdatenbank kann zur Berechnung des Materialaufwandes der Wasserkraftanlagen nicht herangezogen werden, da nur ein Bruchteil der Wasserkraftanlagen eine Leistung von >1 MW aufweisen und damit Bestandteil der UBA-Datenbank sind. Selbst die Daten des BMWi/BDEW mit Anlagen ab einer Leistung von 1 MW listen nur 320 LWK auf und damit deutlich weniger als die 7.654 vom BMU angegebenen Wasserkraftanlagen.

⁷⁸ Zusätzlich sind noch Kapazitäten von 6.000 MW PSW in Deutschland vorhanden. Allerdings muss die notwendige Leistung, die zum Hochpumpen des Wassers in das Oberbecken notwendig ist, gegen gerechnet werden. Grundsätzlich benötigen PSW mehr Energie zum Hochpumpen als sie selbst erzeugen.

Neben der unzureichenden Datenlage über den Bestand an Wasserkraftanlagen und deren individuelle Kraftwerksleistung⁷⁹ gibt es nur wenige ausführliche Sachbilanzen für Wasserkraftanlagen. Die wenigen vorhandenen Sachbilanzen mit detaillierten Daten für Wasserkraftanlagen sind wiederum meist Kraftwerke mit Leistungen über 1 MW, die für den Großteil des Bestandes an Wasserkraftanlagen nicht verwendet werden können. Die Daten in Bauer et al. (2007) beziehen sich auf die Schweizer Wasserkraftanlagen. Die Topographie der Schweiz erlaubt es, große und sehr leistungsstarke Speicherkraftwerke zu betreiben, die zudem häufig in Form von Beton-Talsperrenmauern erbaut sind. In Deutschland sind dagegen sehr häufig Speicherseen mittels Erd- oder Steinschüttdämmen errichtet. Die Mengen an gespeicherten Stahl und Beton sind somit nicht mit den Daten der Schweizer Talsperren vergleichbar. Verschiedene Projekte am Wuppertal Institut haben zudem gezeigt, dass eine Zurechnung des Materialbedarfs von Speicherkraftwerken über die Leistung in MW eigentlich nicht zulässig ist. Denn die Leistung bestimmt sich im hohen Maße über die erreichbare Fallhöhe, die wiederum nicht unmittelbar mit dem Bauaufwand verbunden sein muss. Zusätzlich sind in Bauer et al. (2007) die Materialbestände für drei größere LWK (23 MW, 40 MW und 85 MW) nach den Materialkategorien Beton, Baustahl und rostfreier Stahl abgeschätzt.

Die Daten in Manstein (1996) wiederum beziehen sich auf den Materialbedarf des deutschen Energieverbrauchs und damit auf die Infrastruktur der Herkunftsregion des deutschen Stromverbrauchs. Bei Wasserkraft ist dies zu großen Teilen Österreich oder die Schweiz, so dass sich auch die Daten in Manstein auf große Speicherkraftwerke bzw. leistungsstarke Laufwasserkraftwerke beziehen.

Neben Manstein (1995) und Bauer et al. (2007) sind in Nitsch et al. (2004) der Bauxit und Eisenbedarf für ein 3,1 MW und ein 0,3 MW Laufwasserkraftwerk abgeschätzt. Mayer-Spohn et al. (2007) gibt zusätzlich noch den Kupferbedarf für ein 3,1 MW LWK an. Marheinecke (2001) wiederum berechnet den Materialbedarf für vier LWK der Leistungsklassen 300 kW, 500 kW, 2,2 MW sowie 3,1 MW für die Materialkategorien Eisen, Kupfer, Bauxit und Kalkstein. In Nitsch et al. (2004), Mayer-Spohn et al. (2007) und Marheinecke (2001) wurden die gespeicherten Materialmengen der LWK schon in ihre Ausgangsrohstoffe zurückgerechnet, ohne dass die dahinterliegenden Koeffizienten publiziert wären. Es ist daher nur mit eigenen Annahmen möglich, den Wert z.B. für Kalkstein über den Zwischenschritt der Zementherstellung wieder in einen Wert für Beton zurückzurechnen.

Eine sehr detaillierte Umwelterklärung mit umfassender Sachbilanz liegt für das Laufwasserkraftwerk Wildegg-Brugg in der Schweiz vor (AXPO 2010). Allerdings hat dieses Kraftwerk eine Leistung von 50 MW und ist somit nur mit wenigen Laufwasserkraftwerken in Deutschland vergleichbar. In der GEMIS-Datenbank 4.5 des Öko-Instituts (Fritsche/Schmidt 2008) sind ebenfalls Stahl- und Zementangaben für verschiedene Leistungskategorien (50 MW, 100 kW, 10 kW) in kg/MW angegeben. Im

⁷⁹ Der BDEW hat Ende 2009 begonnen eine Datenbank mit detaillierten Informationen über den Bestand an Wasserkraftanlagen aufzubauen. Dieses war im Projektzeitraum noch nicht verfügbar.

Vergleich zu den anderen genannten Studien scheint der Betonwert allerdings für die Leistungsklasse der 50 MW-LWK deutlich überschätzt und für die beiden kleineren Anlagenkategorien deutlich unterschätzt. In der GEMIS-Datenbank ist bei einem 50 MW LWK ein Wert von $9,6 \cdot 10^6$ kg/MW Zement angegeben. Dies wären für ein 50 MW-Kraftwerk 480.000 Tonnen Zement. Bei einem Zementanteil von 330 kg pro m^3 Beton und einer Betondichte von 2.400 kg/m^3 (Bundesverband der Betonindustrie) ergibt dies rechnerisch für ein 50 MW LWK eine Betonmenge von 3,8 Mio. Tonnen. Bauer et al. geben für ähnlich große Anlagen lediglich einen Wert im Bereich von 50.000 bis 75.000 Tonnen an. Internetrecherchen zum Neubauprojekt des LWK Rheinfelden führen für das 100 MW LWK zu einer verbaute Betonmenge von 420.000 Tonnen. Weiterhin sind in Baumgartner/Boka (1998) die gespeicherten Materialmengen für vier kleinere Laufwasserkraftwerke der Schweiz (18,5 kW, 70 kW, 150 kW und 360 kW) abgeschätzt.

Da lediglich für die größeren LWK eine Verteilung nach Leistungsklassen vorliegt, müssen eigene Annahmen über eine sinnvolle Durchschnittsleistung pro LWK getroffen werden. Laut BMWi haben die großen Laufwasserkraftwerke eine summierte Leistung von rund 2.900 MW. Bei einer Gesamtleistung aller Wasserkraftanlagen von insgesamt 4.650 MW bedeutet dies für die rund 7.300 Kleinwasserkraftwerke mit einer Leistung von jeweils unter 1 MW eine Gesamtleistung von rund 1.750 MW. Pro Kleinwasserkraftwerk entspricht dies einer Leistung von 240 kW. Der Großteil der Wasserkraftanlagen >1 MW hat laut BMWi-Aufstellung eine Leistung zwischen 1 - 10 MW. Für die Abschätzung des Materialbedarfs der deutschen Wasserkraftwerke werden für die Wasserkraftwerke >10 MW (75 Laufwasserkraftwerke) der Materialbedarf eines 40 MW LWK aus Bauer et al. (2007) verwendet, für die 240 LWK der Leistungsklasse 1 - 10 MW werden die Daten eines 2,2 MW Kraftwerkes aus Marheinecke (2001) verwendet. Der Materialbestand der 7.300 Kleinwasserkraftwerke wird schließlich mit den Werten eines 150 kW Kraftwerkes aus Baumgartner/Boka (1998) hochgerechnet.

Tab. 137: Materialbestand Laufwasserkraftwerke Deutschland

in t	Klein-LWK	mittlere LWK	große LWK
	150 kW	2,2 MW	40 MW
	nach Baumgartner/Boka (1998)	nach Marheinecke (2001)	nach Bauer et al. (2007)
Anzahl	7.300	279	75
Beton	10.599.600	156.731	2.016.000
Stahl unlegiert, niedriglegiert	343.100	5.422	12.600
Stahl legiert, rostfrei			675
Kupfer		16	
Bauxit		28	
Kunststoff	102.200		
sonstiges	5.350.900		
Summe	16.395.800	162.197	2.029.275

Quelle: Eigene Berechnung, basierend auf spezifischen Materialkoeffizienten aus Baumgartner/Boka (1998), Marheinecke (2001), Bauer et al. (2007)

Insgesamt schätzen wir den gespeicherten Materialbedarf in deutschen Wasserkraftanlagen auf rund 18,6 Mio. Tonnen und damit in der Größenordnung der Stein- oder Braunkohlekraftwerke.

Für Speicher- und Pumpspeicherwerke liegen für Deutschland bis auf wenige im Internet verfügbare Daten keine konkreten Informationen zur verbauten Mengen an Materialien vor. Die Angaben im Internet beziehen sich dabei eher auf die leistungsstarke PSW (Goldisthal) bzw. auf PSW, bei der die Maschinentechnik in unterirdischen Kavernen untergebracht wurden (Waldeck II). Beide PSW sind eher die Ausnahme als die Regel und würden angewendet auf den Gesamtbestand der PSW den Materialbedarf deutlich überschätzen. Wir haben daher in dieser Studie die Pumpspeicherkraftwerke nicht mit in die Abschätzung des Materialbestandes der Energieerzeugung integriert.

Jährlicher Materialbedarf für die Instandhaltung von Wasserkraftanlagen

Die hier untersuchten Studien, die entweder Ökobilanzierungen durchführen bzw. Potentialabschätzungen erneuerbarer Energien an der zukünftigen Energieversorgung abschätzen (z.B. DLR / ifeu / WI 2004, Hirschberger et al. 2005), kommen übereinstimmend zum Fazit, dass das Potential zum Ausbau der Wasserkraftwerke in Deutschland weitestgehend ausgeschöpft ist. Ein Ausbau ist allenfalls bei kleinen Laufwasserkraftwerken zu erwarten. Diese sind jedoch oft Erweiterungen bestehender Anlagen bzw. Reaktivierungen alter Anlagen, so dass eine Zurechnung der Materialbedarfe schwieriger zu bewerkstelligen ist. Daher wird kein jährlicher Materialbedarf für Neubauten abgeschätzt. Die Bautechnik (Wehre u.ä.) einmal erstellter Wasserkraftanlagen wird als wartungsarm eingeschätzt. Wenn Instandhaltungen vorzunehmen sind dann im Bereich der Maschinentechnik. Eine trennscharfe Aufteilung z.B. der Stahlmenge in Bewehrungsstahl und Maschinentechnik ist nicht möglich. Aus diesem Grund wird der Instandhaltungsaufwand auch bei Wasserkraftanlagen über die technische Lebensdauer abgeschätzt. In dieser Studie wird für die verschiedenen Leistungsklassen der Wasserkraftanlagen einheitlich von 80 Betriebsjahren ausgegangen. Für Beton und Armierungsstahl werden zudem nur 10 % der Materialmenge in die jährliche Abschreibung über die technische Lebensdauer mit einbezogen. Daraus ergibt sich folgender jährlicher Materialbedarf für die Instandhaltung des Anlagenbestandes von Laufwasserkraftwerken:

Tab. 138: Jährlicher Materialbedarf für die Instandhaltung des Bestandes an LWK

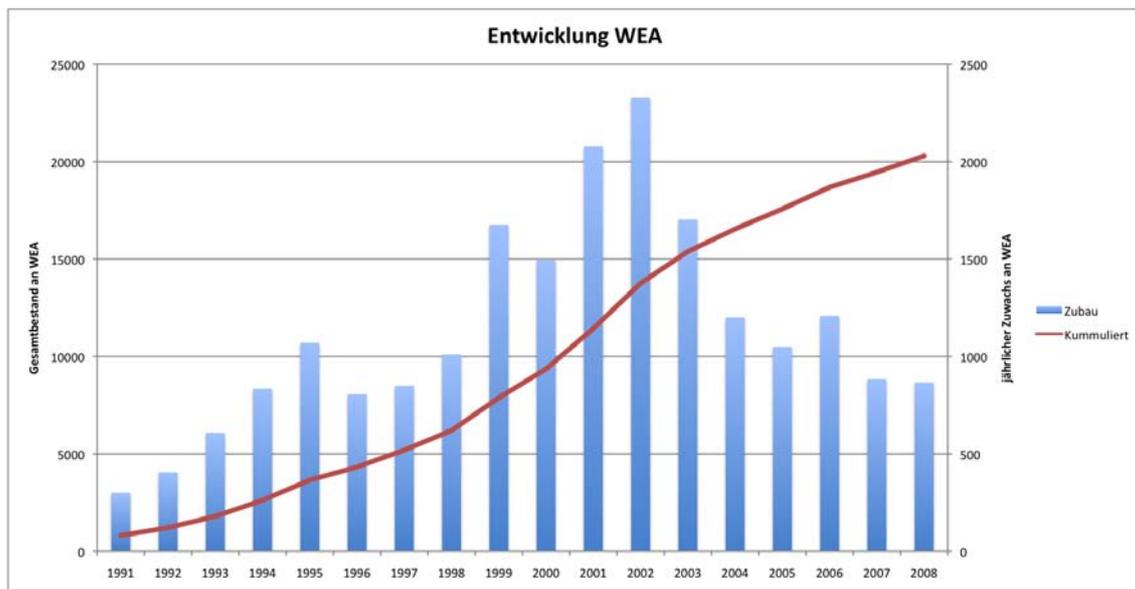
in t	Klein-LWK	mittlere LWK	große LWK
	150 kW	2,2 MW	40 MW
	Baumgartner/Boka (1998)	Marheinecke (2001)	Bauer et al. (2007)
Anzahl	7.300	279	75
Beton	13.250	196	2.520
Stahl unlegiert, niedriglegiert	429	7	16
Stahl legiert, rostfrei			8
Kupfer		0,2	
Bauxit		0,4	
Kunststoff	1.278		
Sonstiges	66.886		
Summe	81.842	203	2.544

Quelle: Eigene Berechnung, basierend auf spezifischen Materialkoeffizienten aus Baumgartner/Koka (1998), Marheinecke (2001), Bauer et al. (2007)

5.2.6 Materialbestand und Materialflüsse der Windenergieanlagen

Bereits in den 80er Jahren des letzten Jahrhunderts stellte Deutschland erste Förderprogramme für die Nutzung von Windkraft auf. 1992 gab es in Deutschland rund 2.000 Windenergieanlagen. Seitdem wächst die Zahl der Windenergieanlagen, wenn auch mit nachlassender Dynamik. Nach der aktuellen Liste für Windenergieanlagen (WEA), die vom ISET zur Verfügung gestellt wurde, waren zum Stichtag 01.02.2009 20.023 WEA mit einer Gesamtleistung von 23.712 MW installiert. Wenn die jährlich neugebauten WEA betrachtet werden, wird deutlich, dass die durchschnittliche Leistung pro WEA in den letzten Jahren immer stärker angestiegen ist. Wurden früher vor allem Anlagen mit einer Leistung von 1 - 1,5 MW gebaut, sind die Anlagen, die im Jahr 2007 oder 2008 erstellt wurden, häufig Anlagen im Bereich >2,5 MW. Vereinzelt werden schon WEA mit einer Leistung von 6 MW in Deutschland zugelassen und gebaut.

Abb. 10: Windenergieanlagen in Deutschland



Quelle: Eigene Darstellung nach ISET (jetzt Fraunhofer IWES) (2009)

Der typische Aufbau einer Windenergieanlage lässt sich grob in die vier Baugruppen Fundament, Turm, Gondel und Rotor unterscheiden. Für das Fundament wird Beton und Stahl benötigt. Der Turm besteht aus Stahl oder aus Beton. Üblich ist laut dem Bundesverband Windenergie e.V. die Stahlturmvariante. Weitere Varianten sind möglich und werden in anderen Ländern ebenfalls angewendet. Zu erwähnen ist hier die Gitterturmvariante. Diese ist mit weniger Materialaufwand verbunden, aber aufgrund einer arbeitsintensiveren Produktion gerade in Ländern mit hohen Personalkosten teurer. Eine Windenergieanlage besteht weiter aus einer Gondel, in welcher weitere Bauteile (Getriebe, Kupplung, Bremse, Generator, Rotorwelle, Kühlung) einer Windenergieanlage untergebracht werden.

Für die Zukunft ist ein weiterer Ausbau zur Nutzung der Windenergie in Deutschland absehbar. Es soll laut DENA Netzstudie bis zum Jahr 2015 insgesamt 37.000 MW installiert sein (DENA 2005). Bei den Ausbauplanungen sind geplante oder schon begonnene Offshore-Anlagen in Ost- und Nordsee zu berücksichtigen. Es ist allerdings aufgrund der technischen Herausforderungen noch nicht absehbar, wie viele Anlagen mit welchem Leistungsumfang bis zum Jahr 2020 tatsächlich realisiert werden. Der Materialaufwand für Offshore-Anlagen ist aufgrund der großen Tiefe der geplanten Standorte und der deutlich höheren Belastung für die Bauteile wesentlich höher.

Im Gegensatz zu anderen Energieerzeugungsanlagen herrscht im Bereich der WEA kein Mangel an Sachbilanzen und LCA-Studien. So haben Burger/Bauer (2007) für Eco-Invent LCA-Daten für Windenergieanlagen zusammengetragen. Dabei werden jedoch nur kleine Anlagentypen (30 kW, 150 kW, 600 kW und 800 kW) detailliert dargestellt. Selbst die 800 kW-WEA wäre für den heutigen Bestand in Deutschland zu

klein und nicht repräsentativ, da 2/3 der deutschen WEA mindestens eine Leistung von 1 MW oder mehr haben.

Über verschiedene Herstellerangaben kann zumindest das Gesamtgewicht von wichtigen Baugruppen (Rotorblätter, Rotor gesamt, Gondel, Turm) für WEA der neueren Generation mit höheren Leistungen ermittelt werden. Unter der Annahme, dass die prozentualen Anteile der einzelnen Anlagenteile (z.B. Getriebe, Generator) am Gesamtgewicht der Baugruppe (Gondel) identisch mit den kleineren Anlagen sind, ist es möglich, die Materialmenge differenziert nach verschiedenen Anlageteilen und Materialgruppen auch für Anlagen der Leistungsklassen 1,65 MW (Vestas), 2,5 MW (Nordex) und der Kategorie 3,6 MW (Siemens) hochzurechnen. Geuder (2004) veröffentlichte in seiner Diplomarbeit zudem eine detaillierte Materialzusammensetzung zweier Enercon-Modelle (E-66 und E-112), die für die Abschätzung des Materialbestandes von WEA in Deutschland bedeutsam sind. WEA des deutschen Marktführers Enercon unterscheiden sich in ihrer Konstruktion deutlich von WEA anderer Anbieter: Enercon verzichtet in seinen WEA auf ein wartungsintensives Getriebe, was aber zur Folge hat, dass der Generator deutlich größer konzipiert werden muss, um die gleiche Leistung zu erzeugen wie bei herkömmlichen WEA. Damit ist zum Bau von Enercon-WEA ein deutlich höherer Kupferbedarf notwendig.

Für jede Leistungskategorie der ISET-Datenbank kann aus den vorhandenen Daten eine typische WEA zugeordnet und somit die WEA jeder Leistungsklasse mit klassentypischen Materialmengen abgeschätzt werden. Zudem wird der Marktanteil von Enercon (um die 50 %) in der Abschätzung mit berücksichtigt.

Tab. 139 weist die Gesamtmengen an Materialien aus, die in den ca. 20.000 WEA in Deutschland verbaut sind. Die große Menge an Beton ist für die zum Teil 100 m hohen Stahl- oder Betonmasten der WEA notwendig. Zum einen für den Mast selbst⁸⁰ zum anderen für die enorm großen Fundamente, die notwendig sind, um der WEA die notwendige Standfestigkeit zu verschaffen. Da konkrete Daten zur Verteilung von Stahl- und Betonmasten fehlen, wird in dieser Abschätzung angenommen, dass alle WEA mit Ausnahme der großen Enercon-Anlagen (Enercon E-112) in Deutschland mit einem Stahlrohrmast gebaut sind.

⁸⁰ Enercon baut zum Beispiel die Masten seiner größeren WEA sehr häufig aus Beton-Fertigteilen, die übereinander gesetzt werden.

Tab. 139: Materialbestand Windenergieanlagen in Deutschland

Leistungsklassen		0-149 kW	150-499 kW	500-999 kW	1000-1499 kW	1500-2000 kW	1500-2000 kW	2000-2499 kW	2000-2499 kW	>=2500 kW	>=2500 kW	Insgesamt
Gerätetyp		150 kW Ecoinvent	600 kW Ecoinvent	800 kW Ecoinvent	1,65 MW (Vestas)	1,5 MW (Enercon)	1,65 MW (Vestas)	2,5 MW (Nordex)	2,5 MW Enercon	3,6 MW (Siemens)	4,5 MW (Enercon)	
Anzahl		800	1275	6485	980	3634	2652	2036	2036	62	63	20.023
Material		in t	in t	in t	in t	in t	in t					
mineralische Rohstoffe	Beton	40.800	229.500	1.459.125	401.800	2.089.550	1.087.320	1.966.776	1.951.166	124.000	466.200	9.816.237
	Leichtbeton	0	0	0	0	43.608	0	0	40.720	0	2.268	86.596
metallische Rohstoffe	Stahl unlegiert, niedrig legiert	14.147	67.337	564.993	155.980	818.635	422.100	523.425	542.140	24.332	34.051	3.167.139
	Stahl legiert, rostfrei	2.202	22.032	90.959	19.404	72.211	52.510	129.002	10.209	5.540	5.754	409.822
	Gusseisen	726	3.910	21.264	17.640	93.674	77.704	57.937	80.905	2.572	7.627	363.958
	Aluminium	57	260	1.343	3.038	821	8.221	7.240	17.958	243	61	39.242
	Kupfer	385	1.651	9.462	2.842	55.964	7.691	4.923	36.422	176	3.944	123.459
	Zinn	0	1	3	0	0	1	1	0	0	0	7
	Blei	0	1	3	0	0	1	1	0	0	0	7
	Elektrik	0	0	0	0	3.870	0	0	3.614	0	201	7.685
	Elektronik	0	0	0	0	5.099	0	0	4.353	0	279	9.730
Kunststoffe und sonstiges	GFK	2.230	9.105	62.652	27.440	59.685	74.256	64.388	61.935	3.862	4.092	369.645
	Kunststoffe	646	1.331	6.971	1.992	7.457	5.392	4.139	2.535	126	447	31.036
	PVC- Hartschaum	0	0	0	0	3.042	0	0	0	0	196	3.237
	Gummi	396	128	649	98	600	265	940	0	39	39	3.153
	Epoxid- harz/Lack	76	184	2.335	847	17.331	2.291	2.345	1.097	89	281	26.876
	Getriebeöl	0	0	0	0	3.416	0	0	3.190	0	178	6.784
	sonstiges	0	0	0	0	2.660	0	0	764	0	161	3.585
Summe Mineralische Rohstoffe		40.800	229.500	1.459.125	401.800	2.133.158	1.087.320	1.966.776	1.991.886	124.000	468.468	9.902.833
Summe Metallische Rohstoffe		17.517	95.192	688.026	198.905	1.050.273	568.228	722.530	695.599	32.863	51.918	4.121.050
Summe Kunststoffe und sonstiges		3.348	10.747	72.606	30.377	94.190	82.204	71.813	69.521	4.116	5.393	444.316
Summe Insgesamt		61.665	335.439	2.219.757	631.082	3.277.621	1.737.752	2.761.119	2.757.007	160.979	525.778	14.468.199

Quelle: Eigene Berechnung auf Grundlage von Burger/Bauer (2007), Geuder (2004), Vestas (2006) und weiteren Herstellerangaben. Daten zur Anzahl der Windenergieanlagen nach Leistungsklassen: ISET (jetzt Fraunhofer IWES), persönliche Kommunikation 2009

Der Materialbestand der 20.000 WEA beträgt nach unserer Abschätzung 14,5 Mio. Tonnen. Zu zwei Dritteln ist der Materialbestand durch den Betonverbrauch für Masten und Fundamente der WEA bestimmt. Zudem sind auch über 4 Mio. Tonnen metallische Rohstoffe, vor allem Stahl, im Bestand der 20.000 WEA gespeichert.

Jährlicher Materialbedarf für Ausbau, Erneuerung und Instandhaltung von Windenergieanlagen

Für den Zubau an WEA liegen detaillierte Daten pro Jahr sortiert nach Leistungsklassen vor. Weiterhin sind Angaben zum sogenannten Repowering alter WEA durch

neue, leistungsstärkere WEA vorhanden. Es kann somit der Materialbedarf für Neubau und Erneuerung von WEA gut abgeschätzt werden.

Der stoffliche Wartungsaufwand von WEA wird als gering eingeschätzt. Zum einen ist der Großteil der WEA unter zehn Jahre alt und damit noch in der ersten Hälfte ihrer vermuteten Nutzungsphase von 20 Jahren. Zwar zeigen Untersuchungen des Fraunhofer IWES (Hahn 2003), dass die Störanfälligkeit von WEA in den ersten beiden Jahren besonders hoch ist (Kinderkrankheiten innerhalb der Gewährleistung). Die geringen durchschnittlichen Reparaturzeiten lassen allerdings auf Reparaturen schließen, bei denen nicht das gesamte Getriebe bzw. die Rotorenblätter ausgetauscht werden müssen. Die Verteilung der Schadenshäufigkeit bestimmter Baugruppen von WEA zeigt ebenfalls an, dass überwiegend Schäden an der Regelungstechnik und der Elektronik auftreten und weniger an Rotorblättern oder gar Fundamenten. Ökobilanzierungen zu WEA rechnen häufig mit einem einmaligen Austausch der Rotorblätter und anderer Hauptbestandteile während der Nutzungsphase einer WEA. Die mit 1,8 % in den ersten 10 Jahren und 3,6 % in der restlichen Lebensdauer recht geringen jährlichen Instandhaltungskosten von WEA unterstützen die These des geringen Wartungsaufwandes von WEA (Bundesverband Windenergie 2010).

Aus Abb. 10 wird ersichtlich, dass der Zuwachs an WEA seit 2002 rückläufig ist. Die folgenden Berechnungen beziehen sich auf den durchschnittlichen Zuwachs der Jahre 2004 bis 2008 um jährlich 1.000 WEA. Die Größenverteilung des Zuwachses an WEA wird den Erhebungsdaten des deutschen Windinstitutes (DEWI 2009) für das Jahr 2008 entnommen. Aus dem Zuwachs von 1.000 WEA in der Größenverteilung des Jahres 2008 ergibt sich ein Materialbedarf von rund 1,17 Mio. Tonnen.

Tab. 140: Jährlicher Materialbedarf für den Zubau von Windenergieanlagen

Leistungsklassen		1000-1499 kW	1500-2000 kW	1500-2000 kW	2000-2499 kW	2000-2499 kW	>=2500 kW	>=2500 kW	Insgesamt
Gerätetyp		1,65 MW (Vestas)	1,5 MW (Enercon E-66)	1,65 MW (Vestas)	2,5 MW (Nordex)	2,5 MW Enercon	3,6 MW (Siemens)	4,5 MW (Enercon E-112)	
Anzahl		55	235	180	250	260	10	10	1.000
Material		in t	in t	in t	in t	in t	in t	in t	in t
mineralische Rohstoffe	Beton	22.550	135.125	73.800	241.500	249.167	20.000	74.000	816.142
	Leichtbeton	0	2.820	0	0	5.200	0	360	8.380
metallische Rohstoffe	Stahl unlegiert, niedrig legiert	8.754	52.939	28.649	64.271	69.232	3.924	5.405	233.175
	Stahl legiert, rostfrei	1.089	4.670	3.564	15.840	1.304	894	913	28.273
	Gusseisen	990	6.058	5.274	7.114	10.332	415	1.211	31.393
	Aluminium	171	53	558	889	2.293	39	10	4.013
	Kupfer	160	3.619	522	604	4.651	28	626	10.211
	Elektrik	0	250	0	0	462	0	32	744
	Elektronik	0	330	0	0	556	0	44	930
Kunststoffe und sonsti-	GFK	1.540	3.860	5.040	7.906	7.909	623	649	27.527
	Kunststoffe	112	482	366	508	324	20	71	1.883
	PVC-Hartschaum	0	197	0	0	0	0	31	228
	Gummi	6	39	18	115	0	6	6	190
	Epoxidharz/Lack	48	1.121	156	288	140	14	45	1.811
	Getriebeöl	0	221	0	0	407	0	28	657
	sonstiges	0	172	0	0	98	0	26	295
Summe Mineralische Rohstoffe		22.550	137.945	73.800	241.500	254.367	20.000	74.360	824.522
Summe Metallische Rohstoffe		11.163	67.918	38.567	88.719	88.829	5.300	8.241	308.738
Summe Kunststoffe und sonstiges		1.705	6.091	5.579	8.818	8.878	664	856	32.591
Summe Insgesamt		35.418	211.954	117.947	339.037	352.074	25.964	83.457	1.165.850

Quelle: Eigene Berechnungen, abgeleitet aus den Zuwächsen 2004-2008

In den DEWI-Erhebungen wird darüber hinaus die Anzahl der Repowering-Projekte veröffentlicht. Allerdings schwanken diese Zahlen stark, weshalb sich die Verwendung von Durchschnittszahlen anbietet. Bis Ende 2008 wurden 496 Anlagen abgebaut und 289 Anlagen durch Repowering modernisiert⁸¹. Im Durchschnitt der letzten sechs Jahre wurden in Deutschland 56 WEA abgebaut und 34 Anlagen durch Repowering ersetzt. Obwohl Repowering-Projekte durch die Novellierung des EEG seit 1.1.2009 gefördert werden, sind die Hürden zur Umsetzung solcher Projekte durch strenge Regelungen bezüglich Hausabstand oder Nabenhöhe recht hoch (Deutsche Wind-Guard 2005). Zudem rechnet sich das Repowering alter Anlagen erst ab einer Betriebsdauer von ca. 15 Jahren. Zusätzlich wird das Potenzial von Repowering dadurch reduziert, dass Anlagen, die vor 1996 außerhalb von sogenannten Vorranggebieten für Windenergienutzung errichtet wurden, zwar Bestandsschutz genießen, aber keine Genehmigung für ein Repowering erhalten. Daraus ergibt sich für die Abschätzung der Materialbedarfe für die Erneuerung von WEA, dass pro Jahr ein Abbau von ca. 60 WEA und ein Austausch von ca. 40 WEA als realistische Größe eingeschätzt wird.

⁸¹ Bei Repowering-Maßnahmen in Windparks verringert sich häufig die Anzahl der WEA, obwohl die Gesamtleistung der Anlage steigt. Deshalb ist die Anzahl der abgebauten und neu errichteten Anlagen nicht identisch.

Für den Abbau und das Repowering wird unterstellt, dass die ausgetauschten und abgebauten Anlagen ausschließlich aus dem Bestand der untersten zwei Leistungsklassen stammen und zwar zu je 50 %. Der Zubau der Anlagen bzw. durch Repowering neu errichteten WEA wird entsprechend der Verteilung der neugebauten WEA des Jahres 2008 berechnet.

Zusätzlich ergeben sich aus dem Austausch von 40 Anlagen jährliche Materialbedarfe in einer Gesamtgrößenordnung von knapp 137.000 t (Tab. 141). Weiterhin fallen durch den Abbau von 100 Anlagen geringerer Leistungsklassen Rückbaumassen von über 17.000 t an (Tab. 142). In der Literatur werden unterschiedliche Angaben über den Anteil der Verwertung beim Rückbau von WEA gemacht. Während bei Martinez et al. (2009) 100 % des Fundaments recycelt werden, bleiben laut Wagner (2004) und Kehrbaum (1995) Teile des Fundamentes nach dem Rückbau im Erdreich. Demnach würden nur die oberen 1,5 m eines WEA-Betonfundaments beseitigt, um eine landwirtschaftliche Nutzung auf diesen Flächen wieder zu gewährleisten. Wagner (2004) schätzt, dass 20 % einer WEA nicht wiederverwertet werden.

Tab. 141: Jährlicher Materialbedarf für Repowering von Windenergieanlagen

Leistungsklassen		2000-2499 kW	2000-2499 kW	>=2500 kW	>=2500 kW	Insgesamt
Gerätetyp		2,5 MW (Nordex)	2,5 MW Enercon	3,6 MW (Siemens)	4,5 MW (Enercon E-112)	
Anzahl		2036	2036	62	63	4197
Material		in t	in t	in t	in t	in t
mineralische Rohstoffe	Beton	9.660	9.583	20.000	74.000	113.243
	Leichtbeton	0	200	0	360	560
metallische Rohstoffe	Stahl unlegiert, niedrig legiert	2.571	2.663	3.924	5.405	14.563
	Stahl legiert, rostfrei	634	50	894	913	2.491
	Gusseisen	285	397	415	1.211	2.307
	Aluminium	36	88	39	10	173
	Kupfer	24	179	28	626	858
	Zinn	0	0	0	0	0
	Blei	0	0	0	0	0
	Elektrik	0	18	0	32	50
	Elektronik	0	21	0	44	66
Kunststoffe und sonstiges	GFK	316	304	623	649	1.893
	Kunststoffe	20	12	20	71	124
	PVC-Hartschaum	0	0	0	31	31
	Gummi	5	0	6	6	17
	Epoxidharz/Lack	12	5	14	45	76
	Getriebeöl	0	16	0	28	44
	sonstiges	0	4	0	26	29
Summe Mineralische Rohstoffe		9.660	9.783	20.000	74.360	113.803
Summe Metallische Rohstoffe		3.549	3.417	5.300	8.241	20.507
Summe Kunststoffe und sonstiges		353	341	664	856	2.214
Summe Insgesamt		13.561	13.541	25.964	83.457	136.524

Quelle: Eigene Berechnungen, abgeleitet aus den Daten von 2005-2008

Tab. 142: Jährliche Rückbaumengen an Windenergieanlagen im Rahmen von Repowering

Leistungsklassen		0-149 kW	150-499 kW	Insgesamt
Gerätetyp		150 kW (Ecoinvent)	600 kW (Ecoinvent)	
Anzahl		800	1275	2075
Material		in t	in t	in t
mineralische Rohstoffe	Beton	2.550	9.000	11.550
metallische Rohstoffe	Stahl unlegiert, niedrig legiert	884	2.641	3.525
	Stahl legiert, rostfrei	138	864	1.002
	Gusseisen	45	153	199
	Aluminium	4	10	14
	Kupfer	24	65	89
Kunststoffe und sonstiges	GFK	139	357	496
	Kunststoffe	40	52	93
	Gummi	25	5	30
	Epoxidharz/Lack	5	7	12
Summe Mineralische Rohstoffe		2.550	9.000	11.550
Summe Metallische Rohstoffe		1.095	3.733	4.828
Summe Kunststoffe und sonstiges		209	421	631
Summe Insgesamt		3.854	13.154	17.008

Quelle: Eigene Berechnungen, abgeleitet aus den Daten von 2005-2008

5.2.7 Materialbestand und Materialflüsse der Biogasinfrastuktur

Erneuerbare Energiequellen konnten in den letzten Jahren ihren Anteil an der deutschen Energieversorgung immer weiter ausbauen. In diesem Kontext ist in den letzten Jahren die Nutzung von Biomasse als Option der Strom- und Wärmerzeugung vermehrt in den Fokus der Diskussion gerückt. Traditionell wird Biomasse entweder thermisch verwertet, in den letzten Jahren vermehrt zu Biokraftstoffen umgewandelt oder in Form von Vergärung von Gülle, Bioabfällen und Nawaros (Nachwachsende Rohstoffe) zu Biogas lokal zur Stromgewinnung genutzt.

In den vergangenen Jahren sind einige Veröffentlichungen erschienen, die das Thema Einspeisung von Biogas in das Erdgasnetz thematisieren und dieser Nutzungsform große Potentiale prognostizieren (z.B. Institut für Energetik und Umwelt et al. 2006, Wuppertal Institut et al. 2005, Hornbacher/Mairitsch 2007).

Bis vor wenigen Jahren wurde das Biogas zumeist vor Ort in Blockheizkraftwerken (BHKW) mit angeschlossenen Stromgenerator verbrannt. Zum Teil konnte die dabei entstehende Abwärme in eigenen Gebäuden oder angrenzten Gebäuden genutzt werden. Häufig jedoch gab es eine räumliche Diskrepanz zwischen Entstehungs- und potentieller Verbrauchsstruktur der anfallenden Wärme. Die Aufbereitung des Biogases zu Biomethan, die Einspeisung ins Erdgasnetz und die Nutzung des Biomethans in räumlich getrennten Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen (KWK-Anlagen) würde diese Nichtübereinstimmung zwischen Entstehung und Verbrauch aufheben. Weitere Vorteile einer Einspeisung von Biomethan in das Erdgasnetz wären die generelle Aufhebung der Grenzen räumlicher Absatzmöglichkeiten für die Betreiber von Biogasanlagen und

bei einer Verwendung dieses Biomethans in KWK-Anlagen eine deutliche Erhöhung des Wirkungsgrades und über Wärmegutschriften verbesserte Finanzierungsmöglichkeiten der Biogasanlagen. Ende 2006 ist die erste Biogasanlage in Betrieb gegangen, die Biomethan in das Erdgasnetz einspeist (Seebach et al. 2007).

In Deutschland gab es Ende 2009 etwa 4.950 Biogasanlagen mit einer installierten Leistung von 1.780 MW (DBFZ 2010). Allerdings ist mit dem Anstieg der Preise insbesondere für Mais, der zumeist als Substrat in Biogasanlagen verwendet wird, ein wirtschaftlicher Betrieb der Biogasanlagen schwieriger geworden, zumindest wenn man die Substrate zukaufen muss. In der Folge sind sowohl einige Biogasanlagenbetreiber und Produzenten in finanzielle Schwierigkeiten geraten und zum anderen dürfte sich das exponentielle Wachstum der Biogasbranche in den letzten Jahren in Zukunft abschwächen (Etscheid 2008).

Die veränderten Rahmenbedingungen spiegeln sich auch in Abschätzungen möglicher Biogaspotentiale und ihrer Nutzung wider. So prognostizierte das Wuppertal Institut et al. (2005), dass unter bestimmten Annahmen das technische Potential an produzierbarer Menge Biogas bis zum Jahr 2030 auf jährlich 16,58 Mrd. m³ anwächst. Bei einem realistischen Wachstumsszenario (regionale Begrenzung der Transportmöglichkeiten von Gülle, keine Beachtung von industriellen Rückständen) würde die erzeugte Menge Biogas bis zum Jahr 2030 auf rund 10 Mrd. m³ Biogas bzw. 5,3 Mrd. m³ Biomethan⁸² anwachsen: immerhin 6 % des derzeitigen Verbrauchs an Erdgas. In einer 2008 für das UBA fertig gestellten Studie „Nachhaltige Flächennutzung und nachwachsende Rohstoffe“ kommt das Wuppertal Institut et al. (2008) dagegen in den Szenarien BAU I und BAU II zu einem deutlich geringeren Anstieg der Biogasproduktion. Demnach ist im Szenario BAU I bis zum Jahr 2030 mit einer Biogasproduktion von 3,6 Mrd. m³ oder 1,91 Mrd. m³ Biomethan zu rechnen. Im BAU II-Szenario würde die Biogasmenge auf 4,04 Mrd. m³ ansteigen. Dies entspricht einer Menge an aufbereiteten Biomethan von 2,14 Mrd. m³. Im Vergleich dazu betrug die Biogasproduktion (Methangehalt) im Jahr 2005 etwa 880 Mio. m³ (Ramesohl et al. 2005).

Der Großteil der betriebenen Biogasanlagen sind kleine bis mittelgroße Anlagen. Die durchschnittliche Leistung der deutschen Biogasanlagen liegt bei 360 kW. Seit 2006 wird jedoch verstärkt in großindustrielle Anlagen investiert, die Leistungen von 20 MW und mehr aufweisen können (wie z.B. der BioEnergiepark „Klarsee“ in Penkun, der von der NAWARO Bioenergie AG betrieben wird).

Der Monitoringbericht des DBFZ (2010) liefert ebenfalls Informationen zu den beiden anderen Möglichkeiten der Verstromung von Biomasse. Zum einen die Nutzung fester Biomasse überwiegend als Biomasseheizkraftwerke, deren Anlagebestand aufgrund des Marktpreises der festen Biomasse sehr schwankend ist. Zum anderen die Pflanzenöl-Kraftwerke, die flüssige Biomasse verbrennen. Hier sind allerdings die Anlagen-

⁸² Unter Biomethan wird Biogas verstanden, das nach seiner Aufbereitung Erdgasqualität, d.h. einen Methangehalt von 96 - 97 %, besitzt. Es wird in diesen Abschätzungen von einem Methangehalt von 53 % im Biogas ausgegangen.

zahlen in Deutschland aktuell noch sehr gering. Beide Alternativtechnologien zur gasförmigen Nutzung der Biomassen werden in dieser Studie nicht mit abgeschätzt.

Biogas wird überwiegend in einem biologischen Prozess, der so genannten anaeroben Fermentation, erzeugt. Dabei zersetzen Mikroorganismen, die als Substrat eingebrachten Pflanzen und anderen organischen Materialien und bilden als Nebenprodukt Biogas, das zu zwei Dritteln aus Methan und zu einem Drittel aus Kohlendioxid besteht. Mit Blick auf den Materialbedarf einer Biogasanlage fallen besonders die Betonbauwerke zur Vorlagerung, der eigentliche Fermenter und die Bauten der Nachgärung und Gärrestlagerung ins Gewicht. Der Materialbedarf der BHKW, die zur Verstromung des Biogases notwendig sind, wird schon in einem vorherigen Kapitel abgeschätzt. Zur Funktionsweise und unterschiedlichen Bauweisen einer Biogasanlage gibt es umfangreiche Literatur z.B. der Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe.

Für die Abschätzung des Materialbestands der rund 4.950 Biogasanlagen wird zum einen auf Materialkoeffizienten von Jungbluth (2007) zurückgegriffen und zum anderen auf Edelmann et al. (2001). Beide Studien behandeln Schweizer Biogasanlagen, die allerdings deutlich kleiner ausgelegt sind als in Deutschland üblicherweise betriebene Biogasanlagen. In beiden Studien wird der Materialbedarf für eine Biogasanlage mit einem Fermenter-Volumen von lediglich 300 m³ abgeschätzt. Zudem ist in beiden Studien keine explizite Nachgäreinrichtung vorgesehen. Allerdings schätzt Edelmann et al. (2001) die Materialmenge einer Gärreststoffeinrichtung (Gülleresttank) mit ab. Bei Jungbluth (2007) wird dies aus dem Text nicht deutlich.

In der Diplomarbeit von Soukup (2008) zum Thema Produktökobilanz von Biogas zur Einspeisung in das Erdgasnetz, die am Wuppertal Institut betreut wurde, wird das Problem der kleinen Anlagengröße nicht durch ein lineares Hochrechnen der Werte auf eine deutsche Referenzgröße gelöst, sondern durch die Verwendung eines Skalierungsfaktors von $P^{2/3}$.

Dieser Skalierungsfaktor von $P^{2/3}$ (also ein schwächeres Wachstum des Materialbedarfs um 0,67 mit dem Anstieg der Leistung der Biogasanlage um 1 MW) wird für die Abschätzung in diesem Bericht übernommen und die Daten sowohl für Biogasanlagen mit Beton-Fermenter als auch Stahl-Fermenter auf Grundlage der Daten von Edelmann et al. (2001) auf die Größe von 1.500 m³ Fermentervolumen hochgerechnet. Die Größe der Nachgäranlagen bzw. Restlager im Vergleich zur Kapazität der Biogasanlage haben wir im Vergleich zu Edelmann et al. (2001) nach Literaturrecherchen etwas reduziert. Diese Recherchen haben ergeben, dass die Größe der Nachgäranlage bzw. Gärrestlagerung unabhängig von der Anlagengröße sehr unterschiedlich ausfallen können (Effenberger et al. 2009). Aufgrund dessen werden die Nachgäranlage bzw. Gärrestlager ebenfalls mit einem durchschnittlichen Volumenwert von 1500 m³ veranschlagt. Für die Aufteilung, wie viele Biogasanlagen mit Nachgäranlage und/oder mit Gärrestlager arbeiten, können die Angaben der Firma bioreact (www.biogaswissen.de) herangezogen werden. Demnach arbeiten 28 % der Anlagen, die in ihrer Datenbank erfasst sind, mit einer Nachgäranlage, 50 % mit einer Nachgäranlage plus Endlager, 12 % nur mit einem Endlager. Weitere 10 % der Anlagen sind

weder mit Endlager noch mit einer Nachgäranlage versehen. Wir kalkulieren für unsere Abschätzung für zwei Drittel der 4.950 Biogasanlagen eine Nachgäranlage bzw. ein Gärrestlager ein. Wir nehmen nach Edelmann et al. (2001) an, dass 90 % der Biogasanlagen mit einem Beton-Fermenter gebaut sind und nur 10 % der Biogasanlagen mit einem Stahl-Fermenter. Die unterstellten Größenordnungen wurden telefonisch mit Experten des DBFZ⁸³ diskutiert und abgestimmt. Im Gespräch wurde deutlich, dass selbst in der DBFZ-Datenbank des Bestandes an Biogasanlagen in Deutschland zurzeit keine umfassenden detaillierten Daten zur Ausstattung dieser Anlagen vorliegen. Seitens des DBFZ würden unsere Annahmen von 1,5 Fermentern pro Biogasanlage mit einem durchschnittlichen Volumen von 1500 m³ für plausibel angesehen. Zudem teilt das DBFZ unsere Einschätzung, dass bei der Erstellung einer Biogasanlage zumeist nicht auf bestehende bauliche Infrastrukturen zurückgegriffen werden kann.

Tab. 143: Materialbestand der Biogasanlagen (ohne BHKW)

	in Tonnen	Beton-Fermenter	Stahl-Fermenter	Nachgär- oder Gärrestanlage	Summe
		1500 m ³	1500 m ³	1500 m ³	
	Anzahl	6930	495	3300	in t
mineralische Rohstoffe	Beton	3.565.978	99.055	1.698.085	5.363.117
	Mörtel		1.769	63.678	65.447
metallische Rohstoffe	Stahl unlegiert, niedrig legiert	133.724	14.513	7.665	155.902
	Stahl legiert, rostfrei	16.096	2.123		18.219
	Kupfer	3.095	150		3.246
Kunststoff und sonstige	Polystyrol	7.058			7.058
	PE (HD)	2.105	1.176		3.281
	PVC	4.086			4.086
	Gummi		929		929
	Polyesterharz		1.176		1.176
Summe Mineralische Rohstoffe		3.565.978	100.824	1.761.763	5.428.564
Summe Metallische Rohstoffe		152.916	16.786	7.665	177.367
Summe Kunststoffe und sonstiges		13.249	3.281		16.530
Summe Insgesamt		3.732.142	120.891	1.769.428	5.622.462

Quelle: Eigene Berechnung auf Grundlage von Edelmann et al. (2001) und Soukup (2008);

Tab. 143 weist einen Materialbestand in den deutschen Biogasanlagen in Höhe von 5,6 Mio. Tonnen aus. Zusätzlich müssten eigentlich noch der Materialbedarf von rund 1,5 bis 1,8 BHKW pro Biogasanlage zugerechnet werden. Diese Materialmengen sind allerdings schon im Kapitel Materialbestand der BHKW enthalten. Die Ergebnisse zeigen, dass Biogasanlagen vor allem sehr betonintensiv sind, zum einen durch den hohen Anteil an Beton-Fermentern, aber auch durch die notwendige Bodenplatte aus Beton, die den Fermentern das notwendige Fundament liefert, um die hohen Lasten der Substrate und des Fermenters selbst zu tragen.

⁸³ Telefonischer Kontakt mit Elmar Fischer.

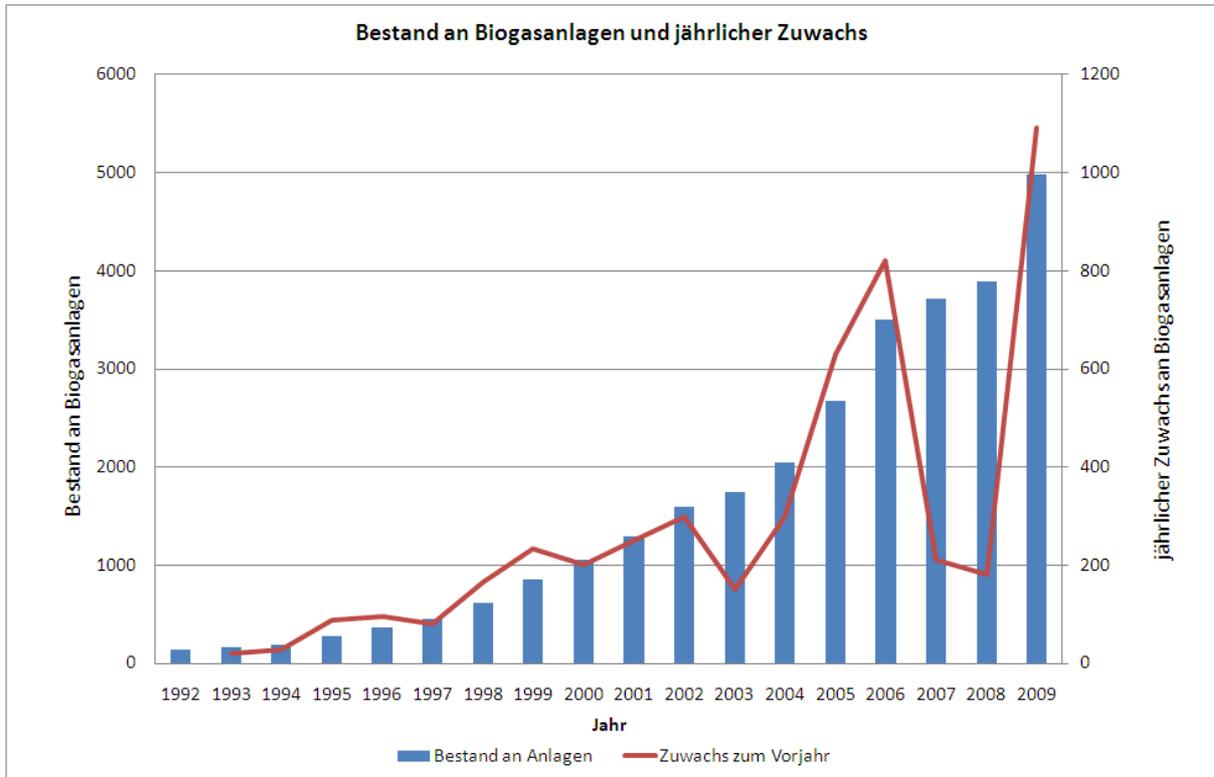
Die Ergebnisse mit ihrer Betonung des Betonbedarfs für Fermenter und Nachgäranlagen bzw. Gärrestlager reagieren empfindlich auf den angenommenen Volumenwert. Es gibt Beispiele bei denen deutlich größere Nachgäranlagen bei Fermentergrößen $<1.500 \text{ m}^3$ existieren. Es wäre also durchaus realistisch, die Nachgäranlage bzw. das Gärrestlager mit einem Volumen von 3.000 oder 4.000 m^3 abzuschätzen. Entsprechend wäre der Materialbestand der Biogasanlagen deutlich höher als hier abgeschätzt.⁸⁴ Ebenso sind die unterstellten Materialbedarfe pro Anlage je nach Literatur sehr unterschiedlich. Hätten wir den Materialbedarf der Biogasanlagen mit einer typischen Größenkategorie mittels der Daten der GEMIS-Datenbank 4.5 ermittelt (Biogasanlage mit einem Fermentervolumen von 1500 m^3 und einer Leistung von $630 \text{ kW}_{\text{el}}$) würde sich der Materialbestand der Biogasanlagen im Gegensatz zur Nutzung der Koeffizienten aus Edelman et al. (2001) und Soukup (2008) auf knapp 10 Mio. Tonnen nahezu verdoppeln. Um Überschätzungen zu vermeiden, haben wir in unserer Hochrechnung konservative Größenkategorien gewählt.

Jährlicher Materialbedarf für Ausbau, Erneuerung und Instandhaltung von Biogasanlagen

Wie bei WEA sind die Zuwachsraten der Biogasanlagen bekannt (Abb. 11). Nach einem Einbruch der Zuwachsraten in 2007 und 2008 ist der Neubau von Biogasanlagen im Jahr 2009 wieder stark angestiegen. Es liegen keine anlagenspezifischen Informationen zur Leistung dieser neuerbauten Biogasanlagen vor. Aus dem Monitoringbericht der DBFZ (2010) wird allerdings deutlich, dass der größte Zubau in den letzten Jahren bei mittleren Anlagen mit einer Leistung von 70 bis $500 \text{ kW}_{\text{el}}$ erfolgte. In 2009 stieg aufgrund veränderter Vergütungsstrukturen der Stromeinspeisung die Zahl der kleinen Biogasanlagen bis $150 \text{ kW}_{\text{el}}$ stark an. Über die kumulierte Gesamtleistung aller Biogasanlagen wird aber auch deutlich, dass die durchschnittliche Leistung pro Biogasanlage von $58 \text{ kW}_{\text{el}}$ im Jahr 1999 auf $365 \text{ kW}_{\text{el}}$ in 2009 gestiegen ist.

⁸⁴ Bei einem Volumen von 3.000 m^3 für die 3.300 Nachgäranlagen bzw. Gärrestanlagen würde sich z.B. der Materialbestand von $5,6$ auf $6,7$ Mio. Tonnen erhöhen.

Abb. 11: Zuwachs und Bestand an Biogasanlagen



Quelle: Eigene Darstellung, basierend auf Olzem (2010)

Für die Abschätzung wird angenommen, dass pro Jahr 400 Biogasanlagen neu gebaut werden. Dies entspricht in etwa dem durchschnittlichen Wert der letzten Jahre, wobei die Entwicklung des Zubaus sehr schwankend ist. Des Weiteren wird angenommen, dass alle Anlagen mit Beton-Fermenter sowie zwei Drittel der Anlagen mit einer Nachgäranlage bzw. Gärrestelager versehen sind. Die Anzahl und das Volumen der Fermenter und der Nachgäranlage bzw. des Gärrestelagers werden analog zum Bestand mit 1,5 Fermentern pro Biogasanlage bzw. einem Volumen von 1.500 m³ abgeschätzt. Aus diesen Annahmen ergibt sich ein jährlicher Materialbedarf für den Zubau an Biogasanlagen (ohne BHKW) von insgesamt 540.000 t. Aus der Aufteilung (Tab. 143) wird deutlich, dass der Materialbedarf ganz eindeutig durch Beton für die Fermenter und Nachgäranlagen und Endlager bestimmt wird.

Tab. 144: Jährlicher Materialbedarf für den Zubau von Biogasanlagen (ohne BHKW)

	in Tonnen	Beton- Fermenter	Nachgär- oder Gärrestanlage	Summe
		1500 m ³	1500 m ³	
	Anzahl	600	400	in t
mineralische Rohstoffe	Beton	308.743	205.828	514.571
	Mörtel		7.719	7.719
metallische Rohstoffe	Stahl unlegiert, niedrig legiert	11.578	929	12.507
	Stahl legiert, rostfrei	1.394		1.394
	Kupfer	268		268
Kunststoff und sonstige	Polystyrol	611		611
	PE (HD)	182		182
	PVC	354		354
Summe Mineralische Rohstoffe		308.743	213.547	522.290
Summe Metallische Rohstoffe		13.239	929	14.169
Summe Kunststoffe und sonstiges		1.147		1.147
Summe Insgesamt		323.129	214.476	537.605

Quelle: Eigene Berechnungen, abgeleitet aus den Daten von 2007-2009

Biogasanlagen haben eine Lebensdauer von rund 20 Jahren. Die mengenmäßig dominanten Betonbauwerke werden diese Zeitspanne vermutlich ohne größere Instandhaltungsmaßnahmen überstehen. Mechanische Bauteile wie Rührwerke oder auch Folienabdeckungen werden mindestens einmal innerhalb der 20 Jahren Nutzungsdauer ausgetauscht. Bei BHKW von Biogasanlagen wird in der Literatur eine Lebensdauer von fünf bis sieben Jahren angegeben. Der Ersatzaufwand einer Biogasanlage ist damit zumindest aus stofflicher Sicht eher gering. Es wird daher wie bei konventionellen Kraftwerken nur 10 % des Bestands an Beton und unlegiertem Stahl in die Abschätzung des Instandhaltungsbedarfs einbezogen. Bei einer jährlichen Abschreibung über die Lebensdauer (20 Jahre für 10 % des Beton und unlegierten Stahl, 10 Jahre für 100 % der restlichen Materialien), käme man auf durchschnittliche jährliche Materialbedarfe für die Instandhaltung der 4.950 Biogasanlagen von 31.722 Tonnen. Mit 21.743 t würde Beton den jährlichen Materialbedarf für Instandhaltung eindeutig dominieren.

Tab. 145: Jährlicher Materialbedarf für Instandhaltung von Biogasablagen (ohne BHKW)

	in Tonnen	Beton- Fermenter	Stahl- Fermenter	Nachgär- oder Gärrestanlage	Summe
		1500 m ³	1500 m ³	1500 m ³	
	Anzahl	6930	495	3300	in t
mineralische Rohstoffe	Beton	17.830	495	8.490	26.816
	Mörtel	0	9	318	327
metallische Rohstoffe	Stahl unlegiert, niedrig legiert	669	73	38	780
	Stahl legiert, rostfrei	1.610	212	0	1.822
	Kupfer	310	15	0	325
Kunststoff und sonstige	Polystyrol	706	0	0	706
	PE (HD)	210	118	0	328
	PVC	409	0	0	409
	Gummi	0	93	0	93
	Polyesterharz	0	118	0	118
Summe Mineralische Rohstoffe		17.830	504	8.809	27.143
Summe Metallische Rohstoffe		2.588	300	38	2.926
Summe Kunststoffe und sonstiges		1.325	328	0	1.653
Summe Insgesamt		21.743	1.132	8.847	31.722

Quelle: Eigene Berechnungen, abgeleitet über die technische Lebensdauer, in Tonnen

5.3 Kumulierter Materialaufwand der Energieinfrastruktur

Die Energieinfrastrukturen sind im besonderen Maße durch metallische Rohstoffe geprägt. Daher ist gerade bei Energieinfrastrukturen der kumulierte Materialaufwand im Vergleich zu den Materialaufwendungen ohne Beachtung der ökologischen Rücksäcke deutlich höher als z.B. bei Verkehrsinfrastrukturen. Zudem sind die Materialien, die in der Abschätzung des Materialbestandes und der jährlichen Flüsse der Energieinfrastrukturen erfasst sind, zum Teil mit einem hohen MIT-Koeffizient verbunden. In der Zusammenfassung der Ergebnisse wird an dieser Stelle nicht mehr jede Energieerzeugungstechnologie und jedes Energienetz separat in seiner Ausführlichkeit dargestellt, sondern subsumiert unter kumulierter Materialaufwand der Energieerzeugung und –verteilung.

Tab. 146: Kumulierter Materialaufwand der Energieerzeugungsinfrastruktur

in 1.000 Tonnen		MIT Koeffizient in t/t	Materialbestand Energieerzeugung	kum. MA Bestand	jährl. MA Neubau	kum. MA Neubau	jährl. MA Instandhaltung	kum. MA Instandhaltung
metallische Rohstoffe	Stahl un- bzw. niedriglegierter	1,47	10.448	15.359	491	721	55	81
	Stahl legiert oder rostfrei	17,94	1.872	33.584	114	2.047	47	835
	Gusseisen	7,63	522	3.980	45	346	9	72
	Kupfer	179,07	229	40.973	15	2.719	3	536
	Aluminium	18,98	209	3.965	12	233	2	47
	Messing	120,87	17	2.038	1	95	1	93
	Zinn	8.486	0	793	0	111	0	73
	Titan	95,00	1	82	0	0	0	2
	Palladium**	320.300	0	166	0	25	0	17
	Platin	320.300	0	706	0	107	0	71
	Blei	15,60	6	97	0	4	0	2
	Nickel	141,29	0	3	0	0	0	0
	Zink	21,76	7	141	0	7	0	4
	sonstige NE-Metalle*	1,00	17	17	2	2	0	0
mineralische Rohstoffe	Beton	1,33	67.967	90.396	2.837	3.773	162	215
	Mauerwerk	2,11	527	1.112	15	31	1	3
	Sand/Kies/Schotter	1,18	4.964	7.049	163	231	12	18
	Leichtbeton	1,33	87	197	9	20	0	0
	Zement	3,22	65	211	8	25	0	1
	Asbestzement**	3,22	125	401	0	0	3	10
	Asphalt/Bitumen**	1,50	47	71	1	2	0	0
	Keramik/Fliesen	2,88	12	35	1	2	0	1
Kunststoffe/sonstigen Rohstoffe	Mineralwolle	4,00	222	890	12	49	6	23
	GFK	6,22	385	4.178	30	330	0	4
	Gummi	5,70	8	8	0	0	0	0
	PE (HD)	2,52	73	183	3	8	2	6
	PP	2,09	7	14	0	0	0	0
	PVC	3,47	69	239	4	14	2	7
	Epoxidharz	13,73	33	451	1	16	0	2
	Sonstiges*	1,00	5.692	5.692	11	11	71	71
Summe Mineralische Rohstoffe			73.794	99.473	3.033	4.085	179	247
Summe Metallische Rohstoffe			13.328	101.905	681	6.417	118	1.833
Summe Kunststoffe und Sonstige Rohstoffe			6.489	11.656	62	428	82	113
Summe Insgesamt			93.611	213.033	3.776	10.930	379	2.194

Quelle: Eigene Abschätzung auf Basis von Wuppertal Institut (2003), *keine MIT-Koeffizienten vorhanden, ** für Palladium wird der MIT-Koeffizient von Platin verwendet, Asbestzement wird mit dem Koeffizienten von Zement berechnet, und für Asphalt/Bitumen wird vereinfachend der Koeffizient für schweres Heizöl genutzt.

Tab. 147: Kumulierter Materialaufwand der Energieverteilungsinfrastruktur

in 1.000 Tonnen		MIT Koeffizient in t/t	Materialbestand Energienetze	kum. MA Bestand	jährl. MA Neubau	kum. MA Neubau	jährl. MA Instandhaltung	kum. MA Instandhaltung
mineralische Rohstoffe	Beton	1,33	25.628	34.085	172	228	42	55
	Sand	1,18	584.988	830.683	15.606	22.160	1.816	2.579
	Zement	3,22	1.427	4.594	0	0	0	0
	Bitumen**	1,50	112	167	11	17	1	1
metallische Rohstoffe	Stahl	8,05	25.026	235.745	377	3.549	35	326
	Grauguss	7,63	220	324	0	0	0	0
	Duktiler Guss	7,63	645	948	0	0	0	0
	Kupfer	179,07	3.408	610.280	29	5.151	25	4.481
	Aluminium	18,98	1.817	34.488	30	571	18	346
	Blei	15,60	1.124	17.533	0	0	0	0
Kunststoffe/sonstige Rohstoffe	PVC	3,47	1.435	4.978	0	0	0	0
	PE	2,52	2.235	5.633	58	145	23	58
	PUR-Hartschaum	6,32	264	1.672	0	0	0	0
	Mineralwolle	4,00	61	245	0	0	0	0
	Holz	4,80	725	725	0	0	0	0
	Paraffinbasisches Öl, Silikonöl*	1,00	655	655	0	0	0	0
	Isolieröl/Haftmasse*	1,00	259	259	0	0	0	0
Summe Mineralische Rohstoffe			612.154	869.529	15.788	22.405	1.859	2.636
Summe Metallische Rohstoffe			32.240	899.318	436	9.272	78	5.153
Summe Kunststoffe und Sonstige Rohstoffe			5.634	14.167	58	145	23	58
Summe Insgesamt			650.029	1.783.014	16.282	31.822	1.960	7.847

Quelle: Eigene Abschätzung auf Basis von Wuppertal Institut (2003), *keine MIT-Koeffizienten vorhanden, ** für Bitumen wird vereinfachend der Koeffizient für schweres Heizöl genutzt.

Im kumulierten Materialaufwand des Bestandes sind die metallischen Rohstoffe aufgrund ihrer hohen ökologischen Rucksäcke jeweils in ähnlicher Größenordnung gebunden wie die mineralischen Rohstoffe (jeweils knapp 900 Mio. Tonnen in den Energienetzen und 100 Mio. Tonnen im Bestand der Energieerzeugungsinfrastruktur).

Die Interpretation der jährlichen Materialflüsse für Neubau und Instandsetzung mit ökologischen Rucksäcken vs. ohne ökologische Rucksäcke unterscheidet sich nicht grundlegend von den Ergebnissen der Bestandsgrößen. Mit Ausnahme des Neubaus von Energienetzen bilden metallische Rohstoffe in der Summe der kumulierten Materialaufwendungen für die jährlichen Flüsse jeweils die wichtigste Materialkategorie. Mineralische Rohstoffe, die in den jährlichen Flüssen ohne Beachtung der ökologischen Rucksäcke ähnlich wie im Bestand die Summe der Materialflüsse dominieren, verlieren unter Beachtung der vorgelagerten abiotischen Materialaufwendungen an Bedeutung.

5.4 Zusammenfassung Energieinfrastruktur

Tab. 146 und Tab. 147 fassen die Ergebnisse der Abschätzung des Materialbestandes der Energieinfrastruktur in Deutschland übersichtsartig zusammen. Aufgrund des enormen Sandbedarfs für die Bettung der Stromkabel und Gasleitungen ist die Energieverteilung mit einem Bestand von 650 Mio. Tonnen deutlich materialintensiver als die Energieerzeugungsanlagen (94 Mio. Tonnen). Ohne diesen Sandbedarf (585 Mio. Tonnen) wäre die Energieerzeugung materialintensiver als die Energieverteilung (65 Mio. Tonnen ohne Sand). In beiden Teilsystemen der Energieinfrastruktur sind neben Sand vor allem Beton und Stahl die bestimmenden Materialkategorien. In der Energieverteilung ist wenig überraschend der Bestand an Kupfer (3,4 Mio. Tonnen), Aluminium (1,8 Mio. Tonnen) und Blei (1,1 Mio. Tonnen), auch im Vergleich zu anderen untersuchten Infrastruktursystemen, sehr hoch. Im Bereich Energieverteilung kann der Betonverbrauch fast vollständig über die Fundamente für Hochspannungsmasten erklärt werden. Aber auch im Bereich Energieerzeugung trägt die Notwendigkeit der Erstellung von Fundamenten für regenerative Energieanlagen (Biogas und Windenergieanlagen) einen großen Anteil am Betonbedarf bei. Allgemein fällt auf, dass der Bestand an Anlagen für regenerative Energieerzeugung im Vergleich zu konventionellen Energieversorgungseinrichtungen in der Erstellungsphase mit einem hohen Materialeinsatz verbunden ist. Windenergieanlagen oder Wasserkraftanlagen sind mit ihren gespeicherten Mengen an Materialien von 14,5 Mio. Tonnen bzw. 15,5 Mio. Tonnen auf ähnlichem Niveau wie die Braun- und Steinkohlekraftwerke oder liegen sogar über den Kernkraftwerken. Bei der Interpretation dieser Daten ist jedoch zu beachten, dass die Materialintensität der Nutzenergie (pro kWh) bei fossil befeuerten Kraftwerken und Kernkraftwerke (KKW) deutlich über den Werten von Windenergieanlagen (WEA) und Wasserkraft liegen.

Über den Bedarf an Zink als Korrosionsschutz für Masten liegen keine Daten vor. Der hohe Anteil an Kunststoffmantelrohren im Bereich Wärmenetze ergibt einen hohen Anteil an PE-Kunststoff im Bereich Energieverteilung.

Tab. 148: Übersicht über den Materialbestand der Energieerzeugung (in Tonnen)

	in Tonnen	Steinkohle	Braunkohle	Erdgas	Wasserkraft	Windkraft	Kernenergie	BHKW	Biogas	Summe
metallische Rohstoffe	Stahl un- bzw. niedriglegierter	1.062.625	3.532.458	540.627	361.122	3.167.139	1.400.841	227.690	155.902	10.448.404
	Stahl legiert oder rostfrei	1.071.118	212.878	97.019	675	409.822	54.496	7.788	18.219	1.872.015
	Gusseisen	28.379	36.665	33.071		363.958	6.941	52.635		521.650
	Kupfer	20.096	26.842	14.487	16	123.459	31.680	8.986	3.246	228.812
	Aluminium	68.325	91.390	3.439	8	39.242	3.592	2.886		208.881
	Messing	7.036	9.385	439						16.860
	Zinn					7		86		94
	Titan						862			862
	Palladium							0,52		1
	Platin							2		2
	Blei	2.010	2.684	366		7	1.104	41		6.212
	Nickel							18		18
	Zink	3.013	3.256	219				13		6.502
sonstige NE-Metalle					17.415		0,27		17.416	
mineralische Rohstoffe	Beton	14.525.013	12.017.473	2.477.781	12.772.331	9.816.237	10.805.419	189.750	5.363.117	67.967.120
	Mauerwerk		440.531	17.560			68.946			527.037
	Sand/Kies/Schotter		4.952.556	11.560						4.964.116
	Leichtbeton					86.596				86.596
	Zement								65.447	65.447
	Asbestzement						124.685			124.685
	Asphalt/Bitumen	9.610	18.032	8.195			11.316			47.152
	Keramik/Fliesen	11.340	821							12.161
Kunststoffe/ sonstigen Rohstoffe	Mineralwolle	112.956	46.516	9.146			35.020	18.843		222.480
	GFK	15.803				369.645				385.447
	Gummi	3.418		439		3.153		330	929	8.269
	PE (HD)	4.520	60.197				421	4.155	3.281	72.574
	PP	2.264		3.000			1.336			6.599
	PVC	52.623		5.487			6.310	396	4.086	68.902
	Epoxidharz	5.988				26.876				32.864
	Sonstiges	26.673	151.012	1.975	5.453.100	44.642	6.268	396	8.234	5.692.300
Summe Mineralische Rohstoffe	14.545.963	17.429.412	2.515.096	12.772.331	9.902.833	11.010.365	189.750	5.428.564	73.794.315	
Summe Metallische Rohstoffe	2.262.602	3.915.559	689.667	361.820	4.121.050	1.499.516	300.146	177.367	13.327.728	
Summe Kunststoffe und sonstige Rohstoffe	224.245	257.724	20.048	5.453.100	444.316	49.354	24.120	16.530	6.489.436	
Summe Insgesamt	17.032.810	21.602.696	3.224.810	18.587.251	14.468.199	12.559.234	514.016	5.622.462	93.611.479	

Quelle: Eigene Abschätzung, Details zu Annahmen und zugrunde gelegten Quellen siehe vorherige Kapitel

Tab. 149: Übersicht über den Materialbestand der Energieverteilung (in Tonnen)

in Tonnen		Erdgas (Fernlei- tungnetz)	Erdgas (Regional- und Orts- netz)	Fernwärme	Nahwärme	Stromnetz (Kabel)	Strom- netz (Freilei- tung)	Masten (Freileitung)	Trans- format- oren	Summe
minerali- Rohstoffe	Beton		2.181.144	10.031.961				13.414.896		25.628.001
	Sand	120.243.333	202.575.400	10.078.826		252.090.449				584.988.007
	Zement		1.417.744	8.826						1.426.570
	Bitumen	107.994	0	3.626						111.619
metallische Rohstoffe	Stahl	12.512.879	4.147.494	833.021	709.175	551.683	254.844	4.499.189	1.517.710	25.025.997
	Grauguss		220.275							220.275
	Duktiler Guss		545.793	48.392	50.925					645.110
	Kupfer					2.441.633	570.298		396.120	3.408.050
	Aluminium					1.063.980	753.111			1.817.091
	Blei					1.123.912				1.123.912
Kunststoffe/ sonstige Rohstoffe	PVC					1.434.715				1.434.715
	PE	212.520	1.049.395	51.159	157.500	724.279	40.573			2.235.426
	PUR-			61.734	202.750					264.484
	Mineralwolle			61.356						61.356
	Holz							724.645		724.645
	Paraffinbasi- sches Öl, Silikonöl								654.700	654.700
	Isolieröl/ Haftmasse					259.148				259.148
	Sonstige									0
Summe Mineralische Rohstoffe		120.351.327	206.174.288	20.123.239	0	252.090.449	0	13.414.896	0	612.154.198
Summe Metallische Rohstoffe		12.512.879	4.913.562	881.414	760.100	5.181.208	1.578.253	4.499.189	1.913.830	32.240.435
Summe Kunststoffe und sonsti- ge Rohstoffe		212.520	1.049.395	174.250	360.250	2.418.142	40.573	724.645	654.700	5.634.475
Summe Insgesamt		133.076.726	212.137.244	21.178.902	1.120.350	259.689.799	1.618.826	18.638.730	2.568.530	650.029.107

Quelle: Eigene Abschätzung, Details zu Annahmen und zugrunde gelegten Quellen siehe vorherige Kapitel

Die jährlichen Materialbedarfe für den Neubau und die Erweiterung der verschiedenen Energieinfrastrukturen sind in den Tab. 148 und Tab. 149 übersichtsmäßig zusammengefasst.

Tab. 150: Jährlicher Materialbedarf für den Neubau von Einrichtungen der Energieerzeugung

in Tonnen		Steinkohle	Braunkohle	Erdgas	Windkraft	BHKW	Biogas	Summe
metallische Rohstoffe	Stahl un- bzw. niedriglegierter	70.331	115.988	9.500	247.738	34.499	12.507	490.562
	Stahl legiert oder rostfrei	72.078	6.990	1.705	30.764	1.180	1.394	114.111
	Gusseisen	1.905	1.204	581	33.700	7.975		45.365
	Kupfer	1.349	881	255	11.068	1.362	268	15.183
	Aluminium	4.595	3.001	60	4.185	437		12.279
	Messing	471	308	8				787
	Zinn				0	13		13
	Palladium					0,08		0,08
	Platin					0,33		0,33
	Rhodium					0,04		0,04
	Blei	135	88	6	0	6		236
	Nickel					3		3
	Zink	202	107	4		2		315
sonstige NE- Metalle				1.789				1.789
minerali- Rohstoffe	Beton	926.096	394.594	43.541	929.385	28.750	514.571	2.836.936
	Mauerwerk		14.465	309				14.773
	Sand/Kies/Schotte		162.617	203				162.820
	Leichtbeton				8.940			8.940
	Zement						7.719	7.719
	Asphalt/Bitumen	648	592	144				1.384
	Keramik/Fliesen	760	27					787
Kunststoff- sonstigen Rohstoffe	Mineralwolle	7.596	1.527	161		2.855		12.139
	GFK	1.063	0		29.420			30.483
	Gummi	230	0	8	207	50	0	495
	PE (HD)	303	1.977			630	182	3.092
	PP	152	0	53				205
	PVC	3.538	0	96		60	354	4.049
	Epoxidharz	403	0		732			1.135
	Sonstiges	1.792	4.958	35	3.291	60	611	10.747
Summe Mineralische Rohstoffe		927.503	572.295	44.196	938.325	28.750	522.290	3.033.359
Summe Metallische Rohstoffe		151.067	128.567	12.119	329.244	45.477	14.169	680.643
Summe Kunststoffe und sonstige Rohstoffe		15.078	8.462	352	33.651	3.653	1.147	62.345
Summe Insgesamt		1.093.648	709.325	56.668	1.301.220	77.881	537.605	3.776.347

Quelle: Eigene Abschätzung, Details zu Annahmen und zugrunde gelegten Quellen siehe vorherige Kapitel

Für Wasserkraftwerke und Kernkraftwerke wird kein Materialbedarf für Neubau abgeschätzt. Beide Spalten fehlen daher in Tab. 148. Die hohe Dynamik bei der Nutzung erneuerbarer Energiequellen spiegelt sich in den geschätzten Materialflüssen für Neubau wider. Der jährliche Materialbedarf für die Erstellung von WEA und Biogasanlagen, kombiniert mit der Erstellung von BHKW, übertrifft knapp den Materialbedarf der für die Erstellung neuer konventioneller Kraftwerke mit fossilen Energieträgern nötig ist. Zu großen Teilen ist der jährliche Materialbedarf, wie auch der Bestand, durch die benötigte Menge an Beton geprägt.

Tab. 151: Jährlicher Materialbedarf für den Neubau und Erweiterung der Energieverteilungsinfrastruktur

in Tonnen		Erdgas (Fernlei- tungsnetz)	Erdgas (Re- gional- und Ortsnetz)	Stromnetz (Kabel)	Stromnetz (Freileitung)	Masten (Freileitung)	Summe
Mineralische Rohstoffe	Beton		45.252			126.294	171.546
	Sand	3.172.366	6.410.700	6.022.490			15.605.556
	Bitumen	11.397					11.397
Metallische Rohstoffe	Stahl	330.126			5.035	41.621	376.782
	Kupfer			25.854	2.912		28.765
	Aluminium			16.731	13.373		30.104
Kunststoffe	PE	7.476	29.908	19.953	194		57.531
Summe Mineralische Rohstoffe		3.183.763	6.455.952	6.022.490	0	126.294	15.788.499
Summe Metallische Rohstoffe		330.126	0	42.585	21.320	41.621	435.651
Summe Kunststoffe und sonstige Rohstoffe		7.476	29.908	19.953	194	0	57.531
Summe Insgesamt		3.521.365	6.485.860	6.085.028	21.514	167.915	16.281.681

Quelle: Eigene Abschätzung, Details zu Annahmen und zugrunde gelegten Quellen siehe vorherige Kapitel

Der Materialbedarf für die Erweiterung der Energienetze ist mit knapp 16,3 Mio. Tonnen aufgrund der Sandbettung für Gas- und Stromleitungen deutlich höher als die des Neubaus von Energieerzeugungsanlagen. Ohne den Sandbedarf beträgt der jährliche Materialbedarf jedoch nur 676.000 Tonnen. Dieser Wert ergibt sich auch aus der Verwendung leichterer Materialien für die heutigen Zubauten im Versorgungsnetz der Gasinfrastruktur (PE-Rohre). Zudem wird angenommen, dass betonintensive Freileitungsneubauten fast nur noch im HS-Netz erfolgen. Für Wärmenetze waren entweder keine Informationen über den jährlichen Zuwachs verfügbar (Nahwärme), oder diese waren so gering (Fernwärme), dass auf eine Abschätzung der jährlichen Materialströme für Neubau und Erweiterung der Wärmenetze verzichtet wurde.

Da zumeist keine konkreten Daten für den jährlichen Aufwand für Instandhaltung bekannt sind, erfolgte die Abschätzung des jährlichen Materialbedarfs für Instandhaltung von Infrastrukturbestandteilen der Energieerzeugung über die jährliche materielle Abschreibung über die technische Lebensdauer. In der Praxis wird die Instandhaltung vermutlich weniger intensiv sein als über die Lebensdauer geschätzt, da gerade die Gebäudetechnik über ihre Lebensdauer hinweg nur in geringem Umfang ausgetauscht wird. Vielmehr wird vermutlich am Ende der Betriebsdauer (oder Jahre darüber hinaus) direkt ein Neubau anstelle der alten Anlage stattfinden. Deshalb werden die Materialanteile, die der Gebäudetechnik zugeschrieben werden können, bzw. pauschal die Mengen an Beton und Bewehrungsstahl jeweils nur mit 10 % ihrer Menge in die Abschreibung über die Lebensdauer mit einbezogen.

Im Bereich der WEA entwickelt sich die Technik und damit die Leistungsstärke noch so rasant, dass ältere kleinere Anlage schon vor dem Ende der technischen Lebensdauer durch neuere, leistungsstärkere Anlagen ausgetauscht werden. Dies geschieht dann häufig mit einem Komplettaustausch samt Mast und Fundament (Repowering).

Die Instandhaltung der Energienetze wird nicht über die technische Lebensdauer sondern vielmehr über monetäre Investitionszahlen abgeschätzt. Über die Instandhaltung von Wärmenetzen sind wie über deren Neubau keine Informationen verfügbar. Nach unseren Berechnungen ist die Instandhaltung der Energienetze mit jährlich knapp 2 Mio. Tonnen deutlich materialintensiver als die der Energieerzeugung mit jährlich zusammen 380.000 Tonnen.

Tab. 152: Jährlicher Materialbedarf für die Instandhaltung der Energieerzeugungsinfrastruktur

in Tonnen		Stein- kohle	Braun- kohle	Erdgas	Wasser- kraft	Kern- energie	BHKW	Biogas	Summe
metallische Rohstoffe	Stahl un- bzw. niedriglegierter	18.251	8.831	0	451	3.835	22.769	780	54.916
	Stahl legiert oder rostfrei	26.778	5.322	10.460	8	1.362	779	1.822	46.531
	Gusseisen	709	917	2.425		174	5.264		9.489
	Kupfer	502	415	86	0,2	766	899	325	2.993
	Aluminium	456	880	827	0,4	41	289		2.493
	Messing	176	235	362					773
	Zinn						9		9
	Titan					22			22
	Palladium						0,1		0,1
	Platin						0,2		0,2
	Rhodium						0,03		0,03
	Blei	50	67	5		28	4		154
	Nickel						2		2
	Zink	75	81	11			1		169
minerali- Rohstoffe	Beton	36.313	30.044	6.194	15.965	27.338	18.975	26.816	161.644
	Mauerwerk		1.101	44		172			1.318
	Sand/Kies/Schotter		12.381	29					12.410
	Zement							327	327
	Asbestzement					3.117			3.117
	Asphalt/Bitumen	24	45	20		28			118
	Keramik/Fliesen	284	4						287
Kunststoffe/ sonstigen Rohstoffe	Mineralwolle	2.711	847	6		182	1.884		5.630
	GFK	395	0						395
	Gummi	85	0	137			33	93	348
	PE (HD)	113	1.505			11	415	328	2.372
	PP	38	0	46		33			117
	PVC	1.263	0	229		158	40	409	2.098
	Epoxidharz	150	0						150
	Sonstiges	648	929	0	68.164	136	40	823	70.740
Summe Mineralische Rohstoffe		36.620	43.575	6.288	15.965	30.655	18.975	27.143	179.222
Summe Metallische Rohstoffe		46.998	16.747	14.177	460	6.227	30.015	2.926	117.550
Summe Kunststoffe und sonstige		5.403	3.281	417	68.164	520	2.412	1.653	81.850
Summe Insgesamt		89.021	63.603	20.882	84.590	37.403	51.402	31.722	378.622

Quelle: Eigene Abschätzung, Details zu Annahmen und zugrunde gelegten Quellen siehe vorherige Kapitel

Tab. 153: Jährlicher Materialbedarf für Instandhaltung Energienetze

in Tonnen		Erdgas (Fernlei- tungsnetz)	Erdgas (Regional- und Orts- netz)	Stromnetz (Kabel)	Stromnetz (Freileitung)	Masten (Freileitung)	Summe
Mineralische Rohstoffe	Beton		27.370			14.288	41.658
	Sand			1.816.143			1.816.143
	Bitumen	981					981
Metallische Rohstoffe	Stahl	28.406			1.051	5.103	34.560
	Kupfer			25.023			25.023
	Aluminium			15.425	2.819		18.244
Kunststoffe	PE	643	18.089	4.290			23.023
Summe Mineralische Rohstoffe		981	27.370	1.816.143	0	14.288	1.858.782
Summe Metallische Rohstoffe		28.406	0	40.448	3.870	5.103	77.827
Summe Kunststoffe und sonstige		643	18.089	4.290	0	0	23.023
Summe Insgesamt		30.030	45.460	1.860.881	3.870	19.391	1.959.632

Quelle: Eigene Abschätzung, Details zu Annahmen und zugrunde gelegten Quellen siehe vorherige Kapitel

6 Überblick über die jährlichen Materialflüsse unter Einbeziehung der Abbruchmengen und ihrer Behandlung / Verwertung

Aus den bisherigen Ergebnissen ist zwar ersichtlich, welche Mengen jährlich für den Neu- und Ausbau bzw. die Instandhaltung der meisten Bereichen der Verkehrs-, Wasser- und Abwasser- sowie der Energieinfrastruktur benötigt werden, aber nicht, welche Abbruchmengen entstehen und was mit diesen geschieht. Obwohl die Daten zur Menge der Abbruchmaterialien in der Regel nicht vorhanden sind, kann eine Materialflussbilanzierung helfen, die bekannten Stoffströme zu systematisieren und Informationslücken über verschiedene Output-Flüsse aufzuzeigen, ggfs. auch zu schließen. Weiterhin können vorhandene Daten zur Verwertung bei der Unterscheidung zwischen Primär- und Sekundärmaterial helfen.

Bei den Abfallströmen sind verschiedene Verbleib- bzw. Verwertungsmöglichkeiten denkbar:

- Internes Recycling: Materialien, die bei der Instandhaltung anfallen, werden rezykliert und direkt im eigenen Infrastruktursystem wiederverwendet. Ein Beispiel sind Asphalt-Deckschichten oder Sandbettungen.
- Externes Recycling: Materialien, die rezykliert werden, allerdings nicht zwingend in ihrem Herkunftsbereich als Sekundärmaterial verwendet werden. Dies ist häufig bei metallischen Rohstoffen der Fall.
- In situ Deponie bezeichnet den Verbleib nicht mehr verwendeter Materialkomponenten am Ort der letzten Verwendung, z.B. weil sie auf Grund hoher Kosten nicht geborgen werden und damit für eine Weiternutzung entfallen. Dies kann z.B. bei alten Abwasser- oder Wasserleitungen geschehen, wo Leitungen in geschlossener Bauweise ersetzt werden und die alten Rohre beim Einzug der neuen Rohre quasi gesprengt werden und häufig im Erdreich verbleiben.
- Deponie: Umfasst alle Materialien, die nicht wiederverwertet und nach ihrer Nutzungsphase in geeigneten Deponien entsorgt werden.
- Thermische Entsorgung/Verwertung: Abbruchmaterialien mit organischen Bestandteilen, vor allem Holz, Kunststoffe und Ähnliches werden thermisch entsorgt. Das betrifft z.B. Altholz; teerölimprägnierte Bahnschwellen, die nicht im Landschaftsbau eingesetzt werden, müssen als Sonderabfall in zugelassenen Anlagen thermisch entsorgt werden.

Die notwendigen Mengen zur Instandhaltung werden zumeist über die technische Lebensdauer ermittelt. Dieser in der Ökobilanzierung übliche Ansatz definiert dabei die jährliche technische Abschreibung als Ersatz des Altmaterials durch Neumaterial. Durch Materialsubstitution (PE-Rohre statt Graugussrohre etc.) muss den jährlichen Materialströmen für die Instandhaltung jedoch keine Abbruchmenge in gleicher Höhe gegenüberstehen. Aufgrund der hohen Unsicherheit über die Verwendung der Ab-

bruchmassen haben wir die Verwertungskategorien ohne Flussgrößen in den Abbildungen nicht mit einer Null sondern durch ein Fragezeichen gekennzeichnet. Künftige Untersuchungen zur dynamischen Modellierung künftiger Input- und Outputströme müssten die Altersstruktur und die Lebensdauer der Materialkohorten als Bestandteil der Infrastruktursysteme detaillierter erfassen.

Tab. 154 zeigt im Überblick welche Daten für die jeweiligen Infrastrukturbereiche erhoben werden konnten und welche nicht.

Tab. 154: Übersicht über die erfolgten Berechnungen

		Bestand	Erweiterung	Erneuerung/ Sanierung	Rückbau
Verkehrsinfrastruktur	Straßen	ja	ja	ja	Nein
	Ingenieurbauwerke Bundesfernstraßen	ja	nein	ja	Nein
	Schienen	ja	ja	ja	Nein
	Wasserstraßen	ja	ja	ja***	Nein
Wasserinfrastruktur	Talsperren	ja	ja	nein	Nein
	Wasserwerke	ja	nein	nein	Nein
	Leitungsnetz	ja	ja	ja	ja**
	Wasserspeicher	ja	ja	ja	Nein
Abwasserinfrastrukturen	Kanalnetz	ja	ja	ja	ja**
	Schächte	ja	ja	ja	ja**
	Regenentlastung	ja	Ja	Nein	Nein
	Kläranlagen	ja	Ja	Nein	Ja
Energieerzeugung	Steinkohle	ja	ja	ja	Nein
	Braunkohle	ja	ja	ja	Nein
	Erdgas	ja	ja	ja	Nein
	Wasserkraft	ja	nein	ja	Nein
	Windkraft	ja	ja	nein	ja*
	Kernenergie	ja	nein	ja	Ja
	BHKW	ja	ja	ja	Nein
	Biogas	ja	ja	ja	Nein
Energieverteilung	Stromnetz	ja	ja	ja	ja**
	Gasnetz	ja	ja	ja	ja**
	Fernwärme	ja	nein	nein	Nein
	Nahwärme	ja	nein	nein	Nein

*im Rahmen von Re-Powering

**im Rahmen von Erneuerung

***nicht vollständig

Quelle: Eigene Zusammenstellung

6.1 Straßeninfrastruktur

Große Teile der anfallenden Bauabfälle werden als erneutes Baumaterial im Straßenbau eingesetzt. Dies sind zum einen Materialien, die direkt auf der Straßenbaustelle anfallen, oder Bauabfälle aus dem Hochbau, die in Trag- und Frostschutzschichten eingesetzt werden können. Laut der Arbeitsgemeinschaft Kreislaufwirtschaftsträger Bau (ARGE KWTB 2007) fielen im Jahr 2004⁸⁵ ca. 200 Mio. Tonnen mineralische Bauabfälle an. Rund 64 % (128 Mio. Tonnen) der mineralischen Bauabfälle waren Bodenaushub, der häufig zur Verfüllung in Baugruben, aber auch zur Modellierung von Lärmschutzwällen, verwendet wird.⁸⁶ Weiterhin fielen 19,7 Mio. Tonnen Straßenaufbruch sowie 50,5 Mio. Tonnen Bauschutt und 1,9 Mio. Tonnen Baustellenabfälle an. Von den 19,7 Mio. Tonnen Straßenaufbruch wurden 93,4 % (18,4 Mio. Tonnen) recycelt. Die Recyclingrate im Bereich des Bauschutts ist dagegen geringer als beim Straßenaufbruch (31 Mio. Tonnen oder 62 %). Die recycelten Bauschuttabfälle (sogenannte RC-Baumaterialien, also Recycling-Baumaterialien) werden zu großen Teilen als Füllmaterial im Straßenbau eingesetzt. Ein hochwertiges Recycling im Hochbau findet derzeit nur unzureichend statt. Von den knapp 50 Mio. Tonnen RC-Baustoffen werden 33 Mio. Tonnen im Straßenbau verwendet. Das heißt von den rund 125 Mio. Tonnen mineralischen Rohstoffen, die nach unserer Berechnung jedes Jahr für den Aus- und Neubau sowie der Instandhaltung im Straßenbau aufgewendet werden müssen, können nach den Abfallstatistiken der ARGE KWTB 26,4 % durch RC-Baustoffe ersetzt werden. Allerdings sind in diesen Statistiken nur die Bauabfälle erfasst, die unter den Abfallbegriff fallen, d.h. die zunächst abgegeben werden und erst danach eine Aufbereitung erfahren. Bauabfälle, die direkt an Ort und Stelle recycelt werden, sind in diesen Statistiken dagegen nicht erfasst.

Damit ist zu vermuten, dass Teile der Straßenbauabfälle statistisch nicht ermittelt werden, da den Mengen an jährlichen Inputs für die Instandhaltung Abbruchmengen in ähnlicher Größenordnung gegenüber stehen müssten. Zwar kommt es auch vor, dass neuere Straßenschichten auf ältere gebaut werden und die Straßen damit in der Höhe wachsen. Ob damit aber die Diskrepanz zwischen der Menge an Materialien für Instandhaltung und dem offiziellen Straßenaufbruch zu erklären ist, muss in dieser Studie offen bleiben.

In den Daten des Ecolnvent-Reports „Building Material Disposal“ (Doka 2007) wird zumindest für die Schweiz von einer 100 % Recyclingquote für den Straßenaufbruch ausgegangen. Weiterhin wird für die Schweiz der Recyclinganteil, der direkt an der Baustelle erfolgt, mit rund 80 % angegeben. Übertrüge man diese Werte auf Deutschland würden ca. 98,5 Mio. Tonnen Straßenaufbruch in Deutschland pro Jahr anfallen (d.h. die Menge von 19,7 Mio. Tonnen aus der Statistik der ARGE KWTB wären identisch mit den 20 %). Zusammen mit den 33 Mio. Tonnen RC-Baustoffen aus Bauabfällen, die im Straßenbau eingesetzt werden, würden die anfallenden RC-Materialien die

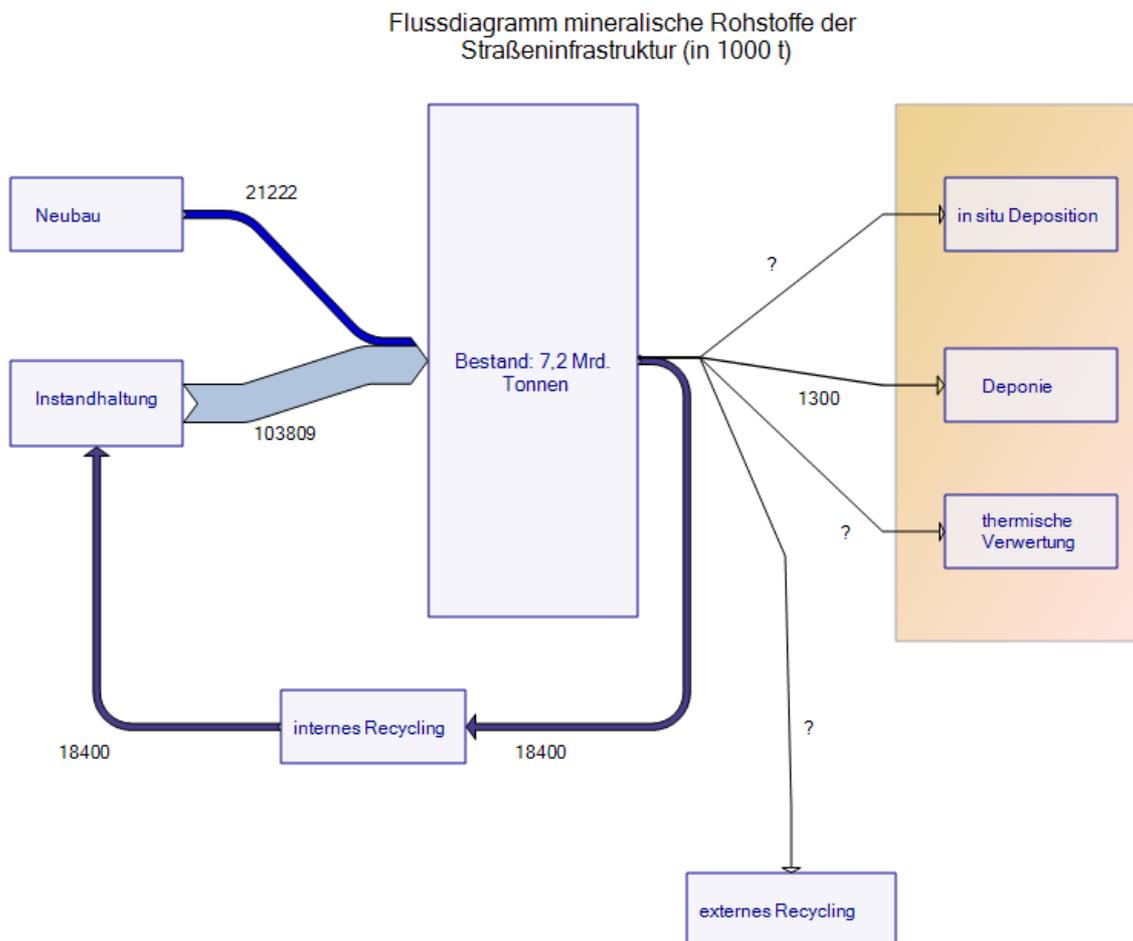
⁸⁵ Neuere Daten für Gesamtdeutschland liegen nicht vor.

⁸⁶ Die Verwendung ist regional sehr unterschiedlich und ist stark abhängig von den örtlichen Gegebenheiten (IFEU 2009).

hochgerechneten jährlichen benötigten Mengen an Baumaterialien im Straßenbau übertreffen. Dies würde wiederum bedeuten, dass keinerlei Primärmaterial im Straßenbau mehr eingesetzt werden müsste. Eine Schlussfolgerung, die nicht plausibel erscheint. Vielmehr werden vermutlich Materialien aus dem Straßenaufbruch auch für Baumaßnahmen verwendet, die nicht in unserer Abschätzung des Materialbestandes der Straßeninfrastruktur enthalten sind, z.B. Lärmschutzwälle an Bundesautobahnen.

Um diesen Unsicherheiten der Datensituation zu entsprechen, werden für die Output-Ströme in Abb. 12: "Flussdiagramm mineralische Rohstoffe Straßeninfrastruktur" nur die offiziellen Zahlen zum Anfall von Straßenaufbruch verwendet, der zu 93 % als RC-Baumaterial wieder im Straßenbau eingesetzt wird.

Abb. 12: Flussdiagramm mineralische Rohstoffe Straßeninfrastruktur

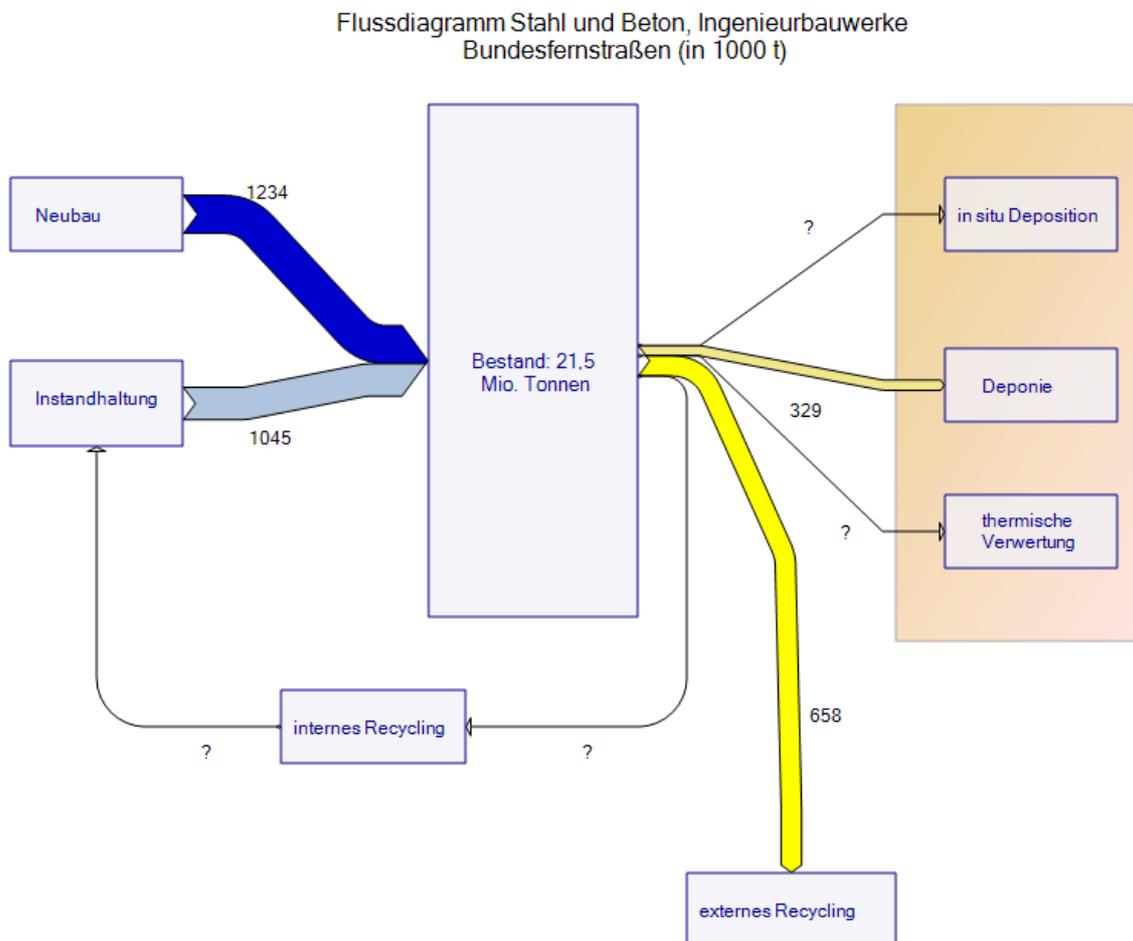


Quelle: Eigene Berechnung

6.2 Ingenieurbauwerke der Bundesfernstraßen

Über die anfallende Menge und die Art der Verwendung der Abbruchmassen in der Instandhaltung von Ingenieurbauwerken der Bundesfernstraßen liegen keinerlei Daten vor. Wir haben daher für die Ingenieurbauwerke der Bundesfernstraßen den Mengen für Instandhaltung entsprechende Abbruchmengen gegenübergestellt. Wir gehen dabei von einem 70 %-Recycling von Bewehrungs- und Spannstahl aus. Für Baustahl wird dagegen eine höhere Recyclingrate von 90 % vermutet. Für mineralische Rohstoffe, hier also Beton, wird die in der Bauabfallstatistik angegebene Recyclingquote von 62 % für Bauschutt unterstellt. Für die restlichen Mengen an Stahl und Beton wird eine Deponierung der Abbruchmassen unterstellt.

Abb. 13: Flussdiagramm für Stahl und Beton in Ingenieurbauwerken der Bundesfernstraßen



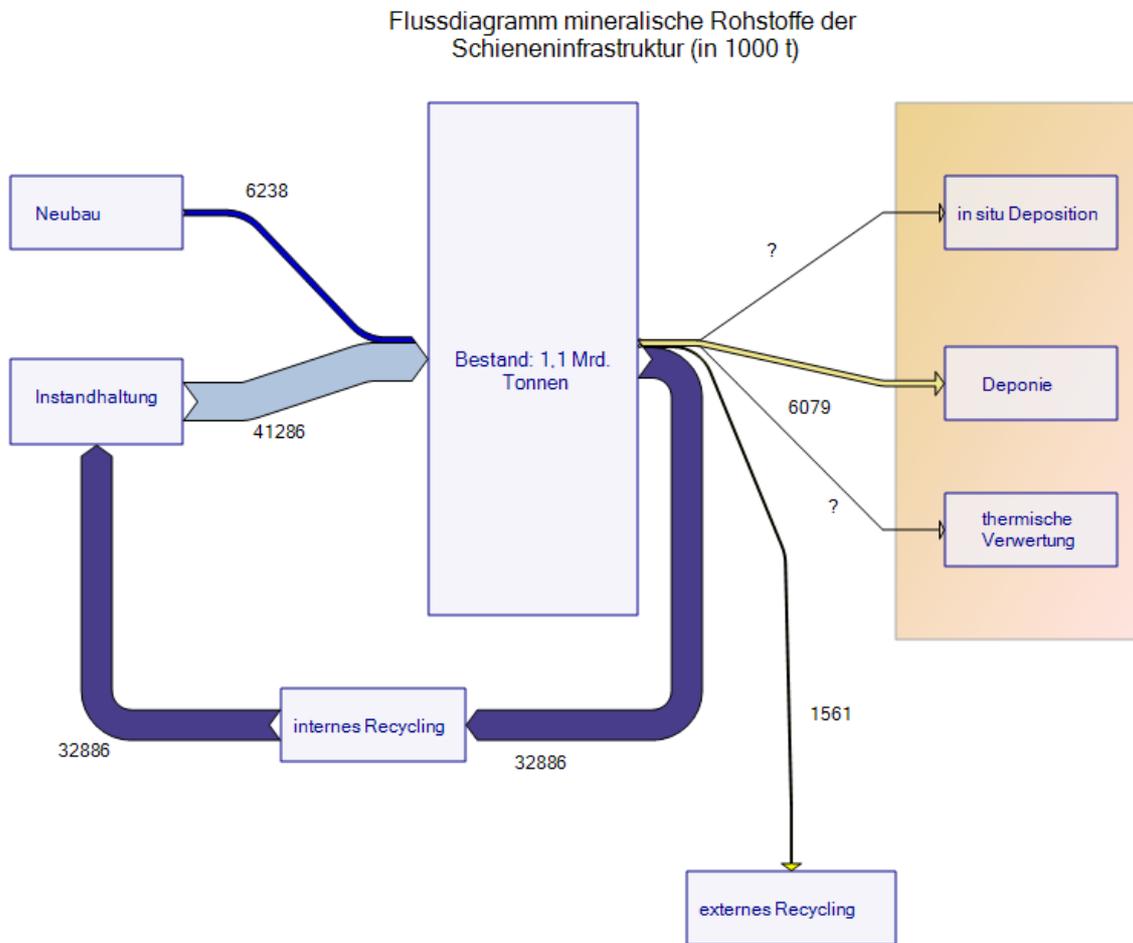
Quelle: Eigene Berechnung

6.3 Schieneninfrastruktur

Auch im Bereich der Schieneninfrastruktur sind über den Verbleib der Abbruchmassen durch Rückbau oder Instandhaltung nur wenige Informationen vorhanden. So ist z.B. unklar, welcher Anteil des jährlichen Austausches an Gleisschotter nach der Reinigung wieder als Gleisschotter verwendet wird. In Spielmann et al. (2007) wird der Anteil mit 80 % angegeben. Rund 20 % des mit Schwermetallen und Ölen kontaminierten Gragnitschotters wird danach deponiert. Für die Darstellung der Materialflüsse für Instandhaltung verwenden wir die Daten, die sich aus der technischen Lebensdauer ergeben. Wie im Kapitel 3.3 beschrieben, scheinen die über die Lebensdauer geschätzten Materialmengen für die Instandhaltung besser mit den Angaben der Deutschen Bahn hinsichtlich ihrer Aufwendungen zur Instandhaltung überein zustimmen, als über den jährlichen Ersatzbedarf aus Schmied/Mottschall (2010).

Neben einer 80 %igen internen Wiederverwertung des Schotters, gehen wir für die restlichen mineralischen Rohstoffe wie Schwellen, Mauerwerk etc. von einer Recyclingquote von 62 % aus. Die restlichen 38 % der mineralischen Abbruchmassen werden deponiert. Der Erneuerungsbedarf für Sand und Kies, der im Planum verbaut ist, wird nach unserer Abschätzung komplett intern wieder als Unterbau verwendet. Die rechnerischen Abbruchmengen der Ingenieurbauwerke der Schieneninfrastruktur werden analog zu den Ingenieurbauwerken der Straßeninfrastruktur behandelt. Daraus ergeben sich für die mineralischen Rohstoffe folgende Input- und Outputflüsse:

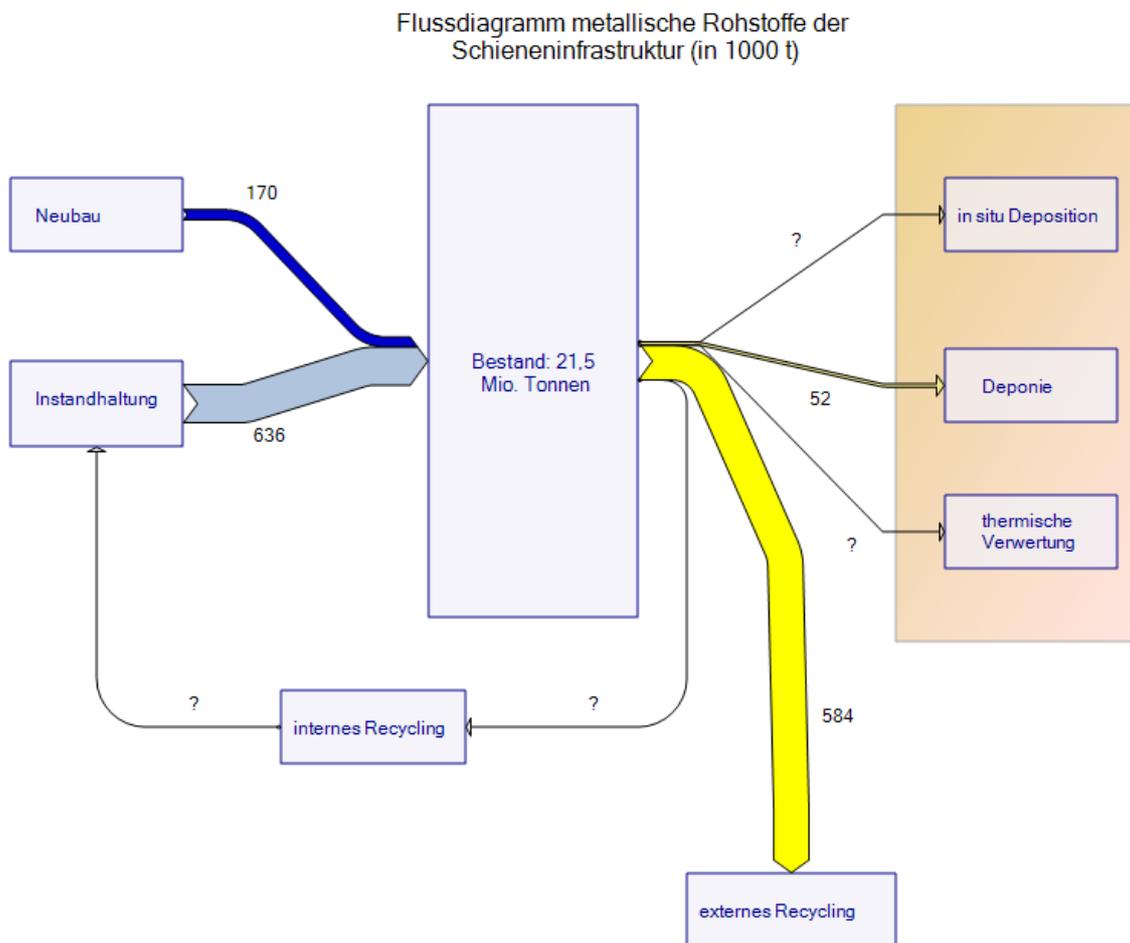
Abb. 14: Flussdiagramm der mineralischen Rohstoffe der Schieneninfrastruktur (ohne Metalle)



Quelle: Eigene Berechnung

Weiterhin gehen wir davon aus, dass sämtliche metallische Rohstoffe zu Teilen extern recycelt werden. Für den Primärstahl der Schienen sowie für die Menge an Kupfer und Bronze der Oberleitungen wird ein vollständiges Recycling unterstellt. Allerdings ist unklar, wie hoch der dissipative Verlust durch Abnutzung und vor allem durch das Abschleifen im Rahmen der Instandhaltung ist. Dieser wurde daher nicht berücksichtigt. Für die restliche Stahlfraktion für Signaltechnik, Masten etc. wird ein Recyclinganteil von 70 % unterstellt, für Aluminium von 90 %. Die nicht recycelten Metalle (in erster Linie Bewehrungsstahl der Gebäude) werden nach unserer Einschätzung mit Teilen des Bauschutts deponiert (Abb. 15):

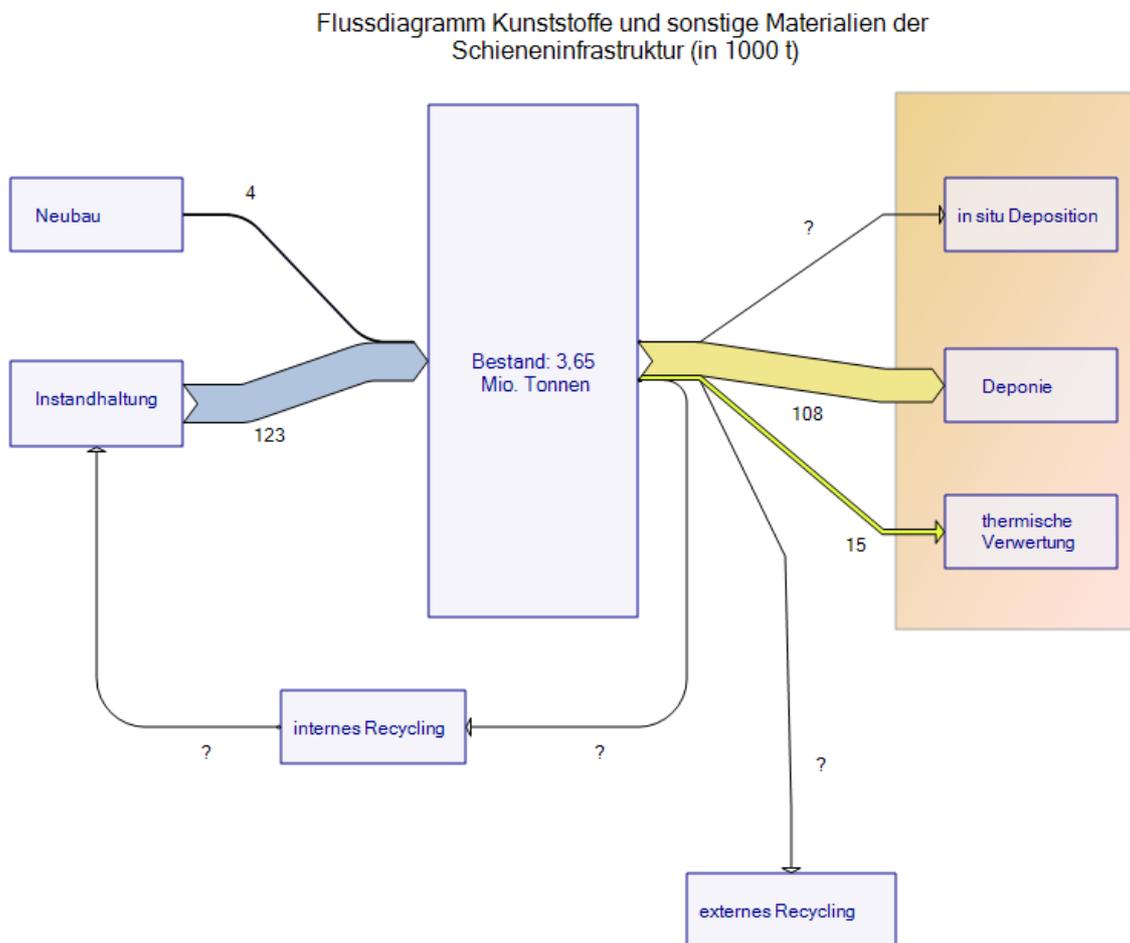
Abb. 15: Flussdiagramm der metallischen Rohstoffe der Schieneninfrastruktur



Quelle: Eigene Berechnung

Holzschwellen mit Teerölimprägnierung müssen seit einigen Jahren ordnungsgemäß entsorgt werden. Sie werden in der Regel deshalb entweder deponiert oder thermisch verwertet. Da keine Angaben zur genauen Entsorgung vorhanden sind, wird die Menge an anfallenden Holzabfällen dem Output-Fluss „Deponie“ zugerechnet. Von der Kunststofffraktion wird angenommen, dass sie thermisch verwertet wird (Abb. 16):

Abb. 16: Flussdiagramm Kunststoffe und sonstige Materialien der Schieneninfrastruktur



Quelle: Eigene Berechnung

6.4 Wasserstraßen

Die jährlichen Flüsse im Bereich der Infrastrukturen der Wasserstraßen werden bestimmt durch den (Ersatz-)Neubau der Ingenieurbauwerke sowie die Erweiterung der Umschlaganlagen.⁸⁷ Die Daten für die Instandhaltung sind höchstwahrscheinlich unterschätzt, da nur die Instandhaltung der Ingenieurbauwerke berechnet wurde.

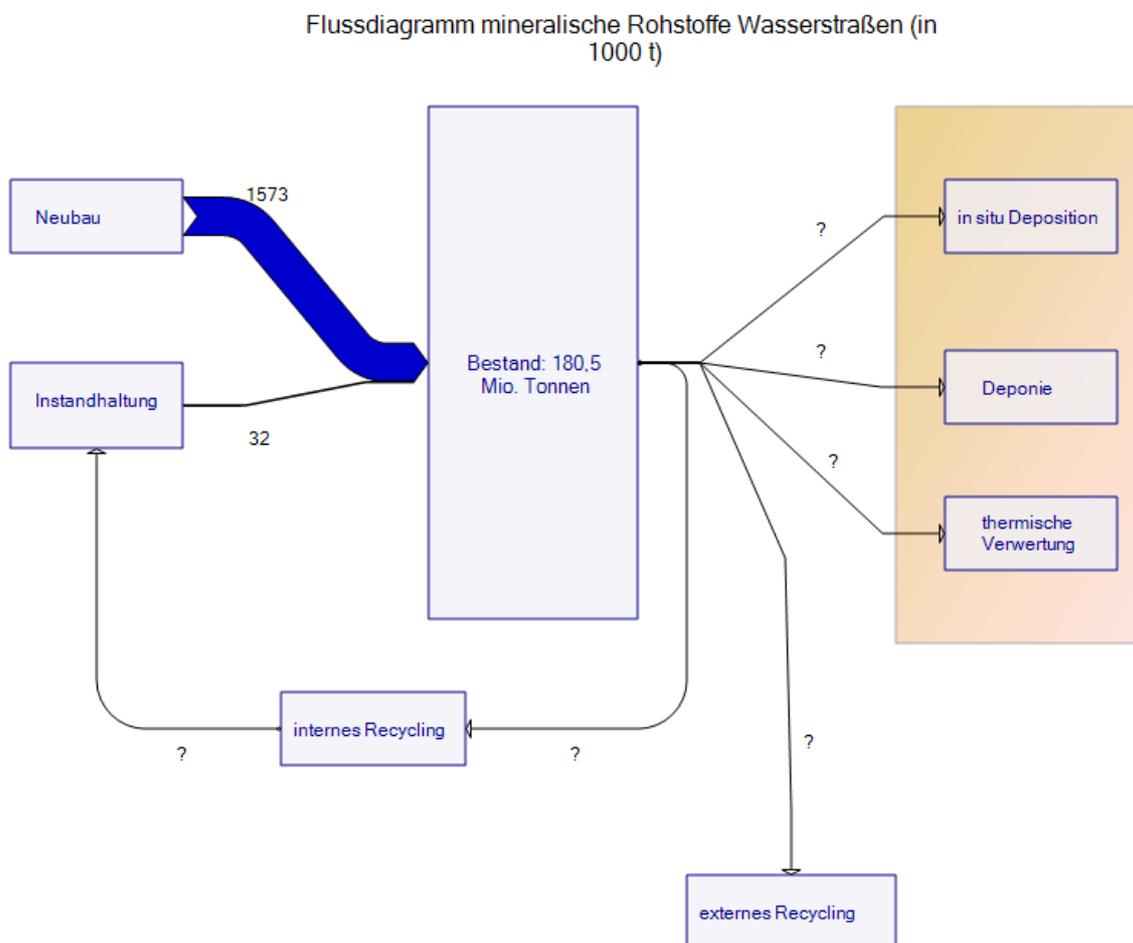
In den meisten Fällen erfolgt ein Neubau zusätzlich zu den alten Ingenieurbauwerken. In seltenen Fällen erfolgt ein Abbruch. Durch den Erdbau anfallende Massen werden in der Regel zwischen gelagert und wieder eingebaut. Für den Erdbau unbrauchbare Böden werden in Form von ökologischen Ausgleichsmaßnahmen auf dem Baugelände abgelagert, landschaftsgerecht gestaltet und begrünt (Quelle: Fockenberget al. 2005). Alternativ wird das Aushubmaterial auf dem Wasserweg abtransportiert, um einer

⁸⁷ Der Streckenausbau der Wasserstraßen wird mangels Daten nicht berücksichtigt.

Wiedernutzung zugeführt zu werden (Pogalens, Lenz 2008). Beim Abbau alter Schleusen anfallender Beton wird vor Ort mit dem Stemmbagger zerkleinert und als Recyclingmaterial z.T. für den Wegebau der neuen Schleuse wieder verwendet (Saathoff et al. 2009). Genauere Daten über die Anteile liegen jedoch nicht vor. Wegen der Langlebigkeit des Werkstoffs Stahl können viele Produkte oder Teile davon aufgearbeitet und weiterverwendet werden. So können Spundwände z.T., sofern sie nicht verbogen sind, aus dem Boden gezogen und an anderer Stelle wieder eingerammt werden.

Da über die Output-Massen keine verlässlichen Daten vorliegen und keine Hochrechnung der Instandhaltung über die Lebensdauer erfolgt ist, können diese in den Flussdiagrammen nicht berücksichtigt werden.

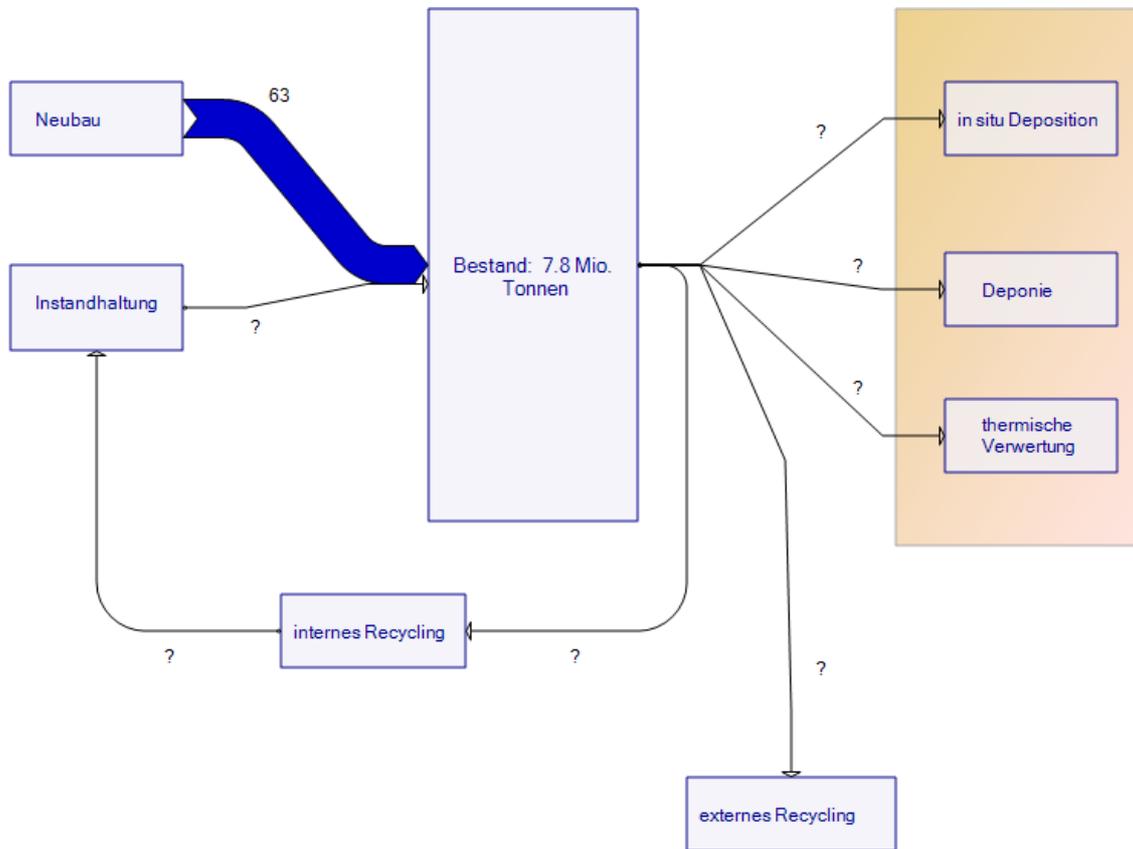
Abb. 17: Flussdiagramm der mineralischen Baustoffe in Wasserstraßen – Infrastrukturen



Quelle: Eigene Berechnungen

Abb. 18: Flussdiagramm der metallischen Rohstoffe in Wasserstraßen

Flussdiagramm metallische Rohstoffe Wasserstraßen (in 1000 t)



Quelle: Eigene Berechnungen

6.5 Wasserinfrastruktur

Tab. 155 gibt einen Überblick über den Bestand und die jährlichen Materialflüsse im Bereich der Wasserinfrastrukturen, basierend auf unseren Berechnungen.

Tab. 155: Jährliche Materialflüsse Wasserinfrastrukturen

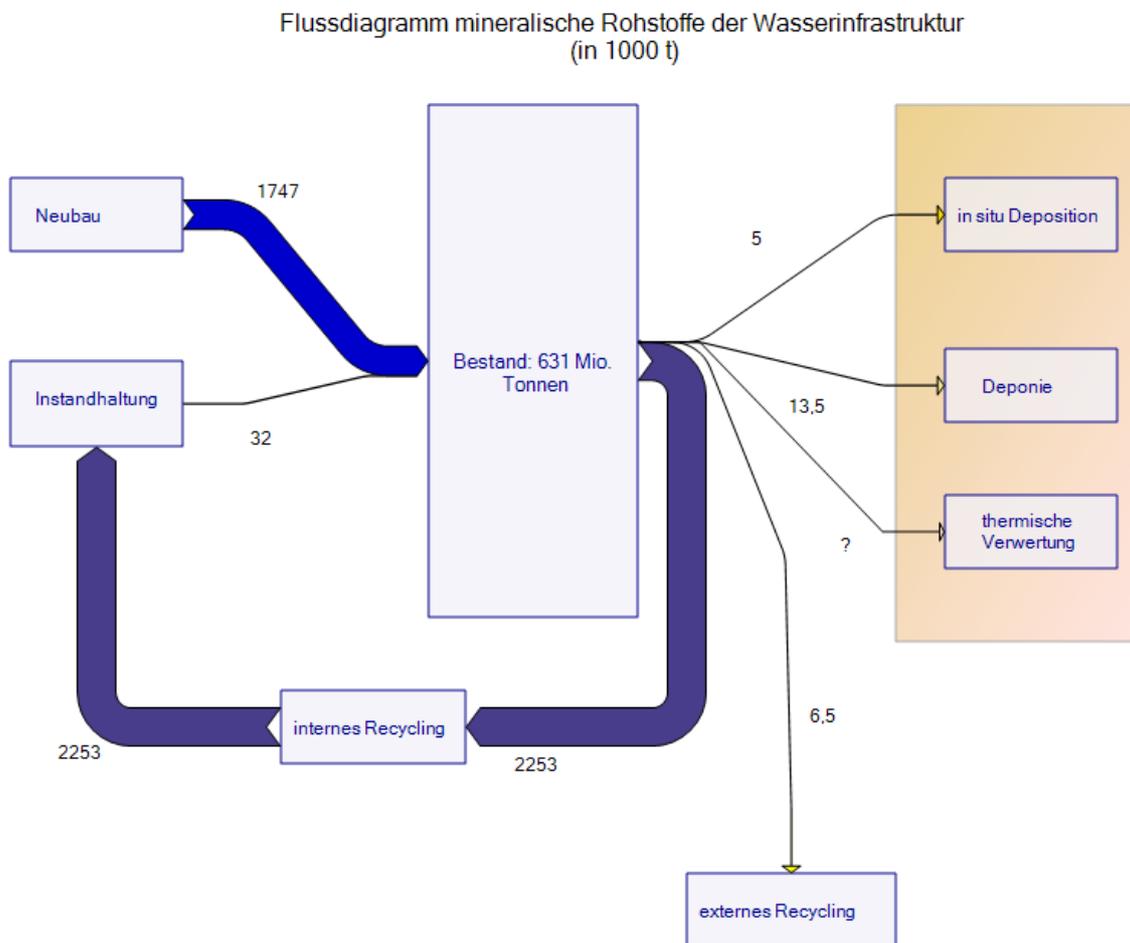
in 1.000t		Bestand	Input Neu- bau	Input Instand- haltung	Output In- standhaltung	davon Abbruch
mineralische Rohstoffe	Kies/Sand	423.642	1.525			
	Naturstein	55.458	144			
	Beton	148.747	73		6	4,8
	Faserzement	1.106			12	9,6
	Zementmörtel	688	5	32	7	5,6
	Quarzsand gesch. Vermicu- lit	893 62				
	Ziegel	577				
metallische Rohstoffe	Guss-/ Roheisen	8.215	13	24	80	64
	Stahl	3.781	11	42	16	12,8
	Kupfer	12				
	Zink	13				
Kunststoffe / Sonstige	PVC	641			5	4
	PE / PEHD	293	5	12	2	1,6
Summe mineralische Rohstoffe		631.173	1.747	32	25	20
Summe metallische Rohstoffe		12.021	24	66	96	76,8
Summe Kunststoffe / sonstige		934	5	12	7	5,6
Summe gesamt		644.128	1.776	110	128	102,4

Quelle: Eigene Berechnungen, Details in vorangegangenen Tabellen

Der jährliche Material-Input für Neubau und Erweiterung im Bereich der Wasserinfrastrukturen setzt sich zusammen aus dem Neubau von Talsperren (überwiegend für Hochwasserschutz-Zwecke), Wasserspeichern sowie einem sehr geringen Ausbau des Leitungsnetzes. Die jährlichen Materialflüsse zur Erneuerung und Instandhaltung umfassen die jährliche Erneuerung des Leitungsnetzes basierend auf einer geschätzten tatsächlichen Erneuerungsrate sowie der Instandhaltung der Wasserspeicher. Die Instandhaltung der Talsperren, Wasserwerke und des Leitungsnetzes wird aufgrund fehlender Daten und/oder sehr inhomogener Verfahren vernachlässigt.

Bezüglich der Verlegeverfahren im Rohrnetz kann unterstellt werden, dass 80 % der Erneuerung in offener Bauweise erfolgt (analog zum Kanalnetz). Damit verbleiben 20 % der erneuerten Rohrleitungen (etwa 25.000 Tonnen) in-situ im Bodenreich. Bezüglich der offenen Erneuerung unterstellen wir, dass die Altrohre gehoben und in Abhängigkeit vom Werkstoff einer Weiterverwertung oder Deponierung zugeführt werden. Prinzipiell gilt, dass bezüglich der Leitungsnetze der jährliche Materialinput durch Erneuerung unter dem jährlichen Materialoutput durch Erneuerung liegt, da Leitungen aus Zement, Beton und Gusseisen zunehmend gegen (leichtere) Kunststoff-Rohre ersetzt werden. Die Sandbettung der offenen Erneuerung wird wiederverwendet und ist als internes Recycling in Abb. 19 dargestellt.

Abb. 19: Flussdiagramm der jährlichen Materialflüsse in Wasserinfrastrukturen

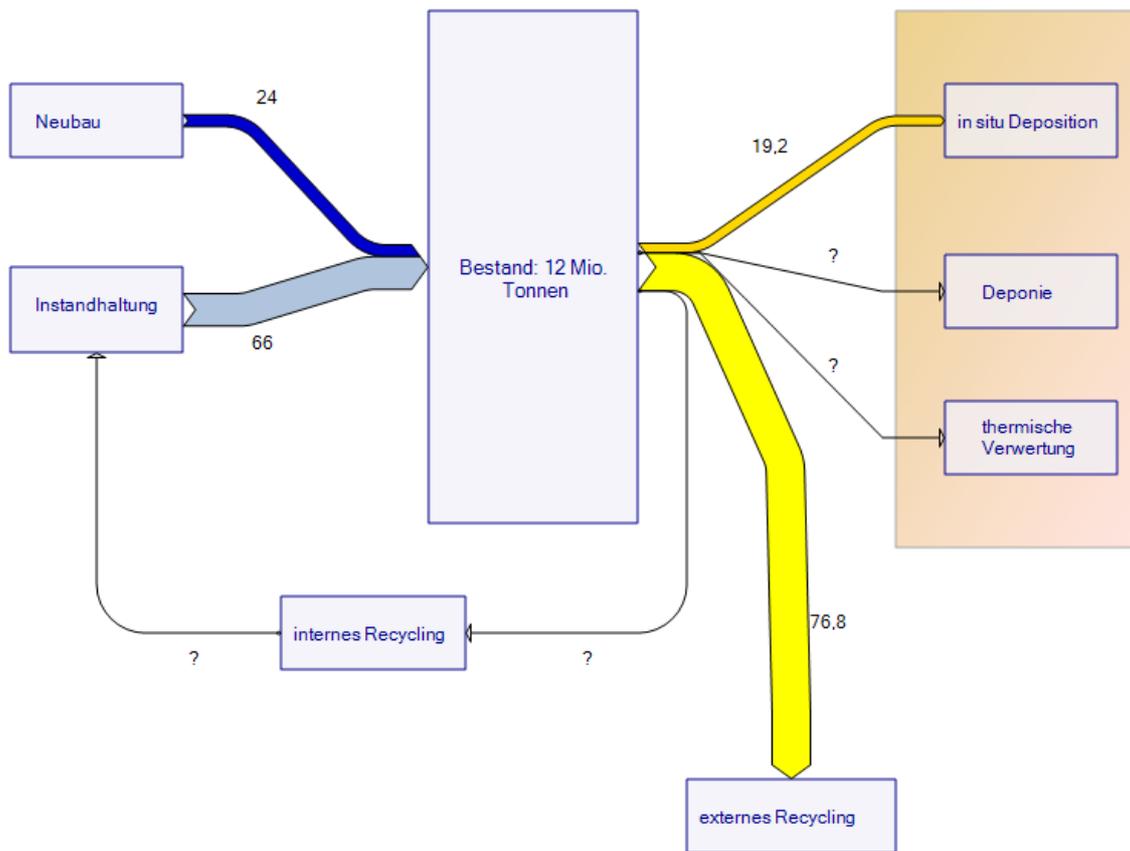


Quelle: Eigene Berechnungen

Analog zu den Ingenieurbauwerken wird für die mineralischen Rohstoffe (Beton und Zementmörtel) die in der Bauabfallstatistik angegebene Recyclingquote von 62 % für Bauschutt unterstellt. Für die restlichen Mengen wird eine Deponierung unterstellt. Knapp 10.000 Tonnen Faserzement werden durch den Ersatz der alten Asbestzementrohre gehoben und unseren Annahmen zufolge einer Deponierung zugeführt. Bzgl. der Rohrbettung wird eine direkte Wiederverwendung vor Ort angenommen.

Abb. 20: Flussdiagramm der metallischen Rohstoffe in Wasserinfrastrukturen

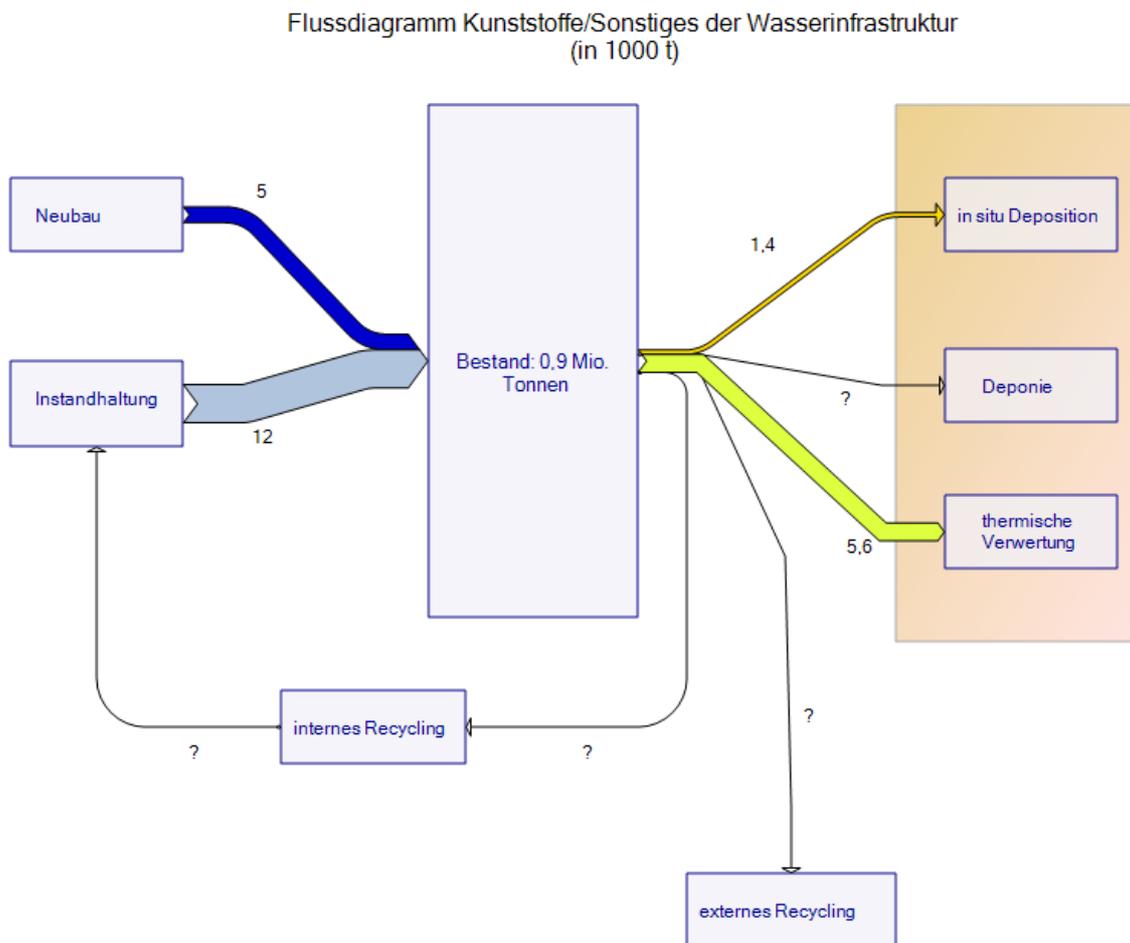
Flussdiagramm metallische Rohstoffe der Wasserinfrastruktur
(in 1000 t)



Quelle: Eigene Berechnungen

Die jährlichen Materialflüsse der metallischen Rohstoffe in Wasserinfrastrukturen werden bestimmt durch die Erweiterung und insbesondere Erneuerung der Leitungsnetze. Hier verbleiben wiederum bei geschlossener Erneuerung die Rohre im Boden, wohingegen bei offener Erneuerung eine Weiterverwertung von 100 % unterstellt wird (siehe auch Windsperger et al. 1999).

Abb. 21: Flussdiagramm der Kunststoffe und sonstigen Materialien in Wasserinfrastrukturen



Quelle: Eigene Berechnungen

Die jährlichen Materialflüsse von Kunststoffen sind bestimmt von der Erneuerung des Leitungsnetzes. Durch den zunehmenden Trend zur Verwendung von Kunststoffrohren ist hier der jährliche Materialinput höher als der Materialoutput. Letzterer kann wiederum in Abhängigkeit von der Verfahrensweise differenziert werden in 20 % in-situ-Verbleib sowie 80 % thermische Verwertung.

6.6 Abwasserinfrastruktur

Tab. 156 gibt einen Überblick über den Bestand und die jährlichen Materialflüsse im Bereich der Abwasserinfrastrukturen, basierend auf unseren Berechnungen.

Tab. 156: Jährliche Materialflüsse Abwasserinfrastrukturen

in 1.000 t		Bestand	Input Neu- bau	Output Neubau	Input Instand- haltung	Output In- standhaltung
mineralische Rohstoffe	Kies/Sand	734.897	11.449			
	Kalksandstein	3.571	4	21		
	Beton	326.765	3.202	612	561	650
	Kanalklinker	19.631				88
	Zementmörtel	5.459	9		2	24
	Glaswolle	89				
	Steinzeug	18.483	327		77	83
	Flachglas	7				
metallische Rohstoffe	Guss-/ Rohei- sen	347	7		1	1
	Stahl	7.734	36	28	5	
	Kupfer	81				
	Aluminium	18				
Kunststoffe / Sonstige	nicht diff.	720	70		39	2
Summe mineralische Rohstoffe		1.108.902	14.991	633	640	846
Summe metallische Rohstoffe		8.180	43	28	6	1
Summe Kunststoffe / sonstige		720	70	0	39	2
Summe gesamt		1.117.802	15.104	661	685	849

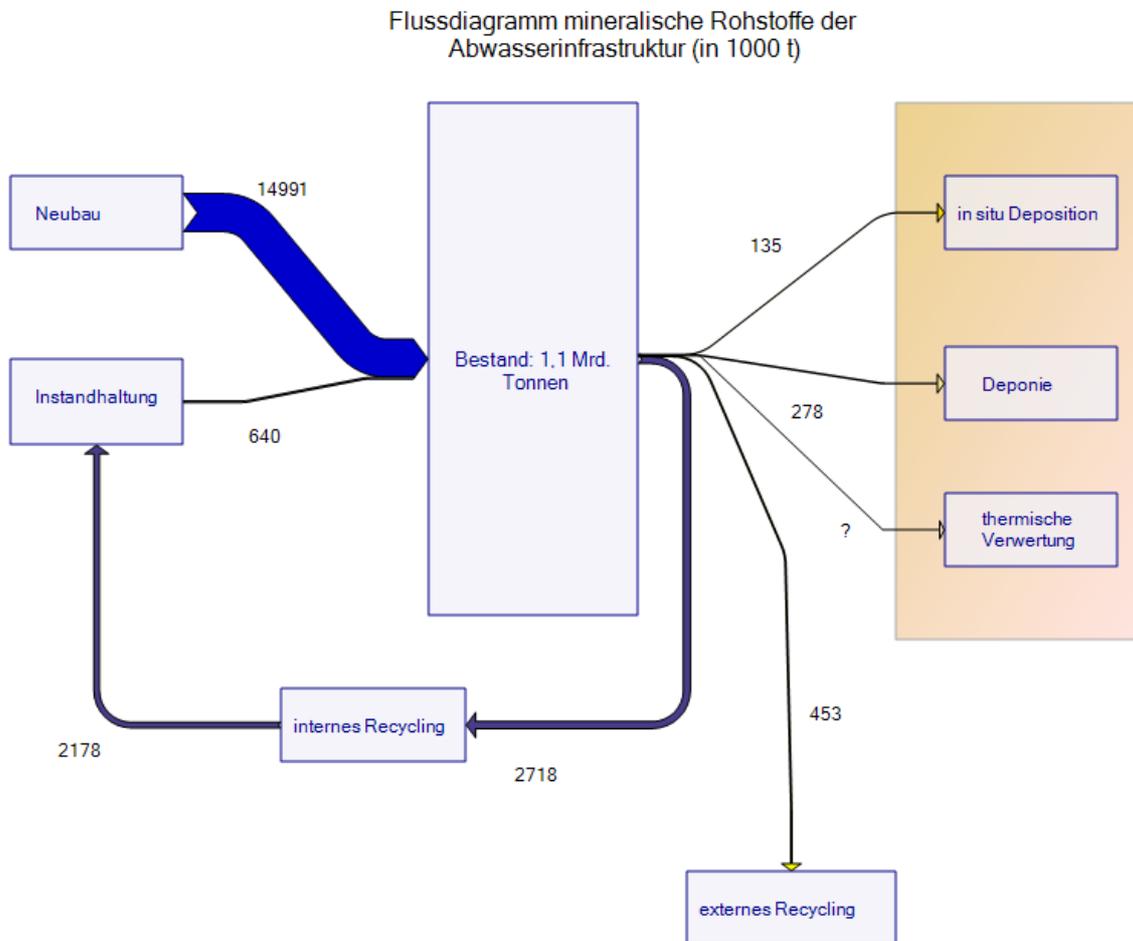
Quelle: Eigene Berechnungen, Details in vorangegangenen Tabellen

Der jährliche Material-Input für Neubau und Erweiterung im Bereich der Abwasserinfrastrukturen setzt sich zusammen aus der Erweiterung des Kanalnetzes und damit verbunden der Schächte, der Regenentlastung sowie der Zunahme der Anzahl der Kläranlagen. Darüber hinaus sinkt nach der offiziellen Statistik (Destatis 2009) die Anzahl der Kläranlagen in einzelnen Größenklassen, was einen (potenziellen) Rückbau der Kläranlagen zur Folge hat.⁸⁸

Die jährlichen Materialflüsse zur Erneuerung und Instandhaltung umfassen die jährliche Erneuerung des Kanalnetzes in offener (80 %) und geschlossener (20 %) Bauweise sowie die jährliche Erneuerung der zugehörigen Schächte. Im Zuge der geschlossenen Erneuerung des Kanalnetzes verbleiben die Rohre im Boden. Bezüglich der offenen Erneuerung unterstellen wir, dass die Altröhre gehoben und in Abhängigkeit vom Werkstoff einer Weiterverwertung oder Deponierung zugeführt werden. Prinzipiell gilt, dass für die Kanalisation der jährliche Materialinput durch Erneuerung unter dem jährlichen Materialoutput durch Erneuerung liegt, da Kanäle aus Mauerwerk, Steinzeug und Beton zunehmend gegen (leichtere) Kunststoff-Rohre ersetzt werden.

⁸⁸ Hier kann aufgrund fehlender Informationen nicht verlässlich ermittelt werden, ob diese Kläranlagen tatsächlich zurückgebaut werden.

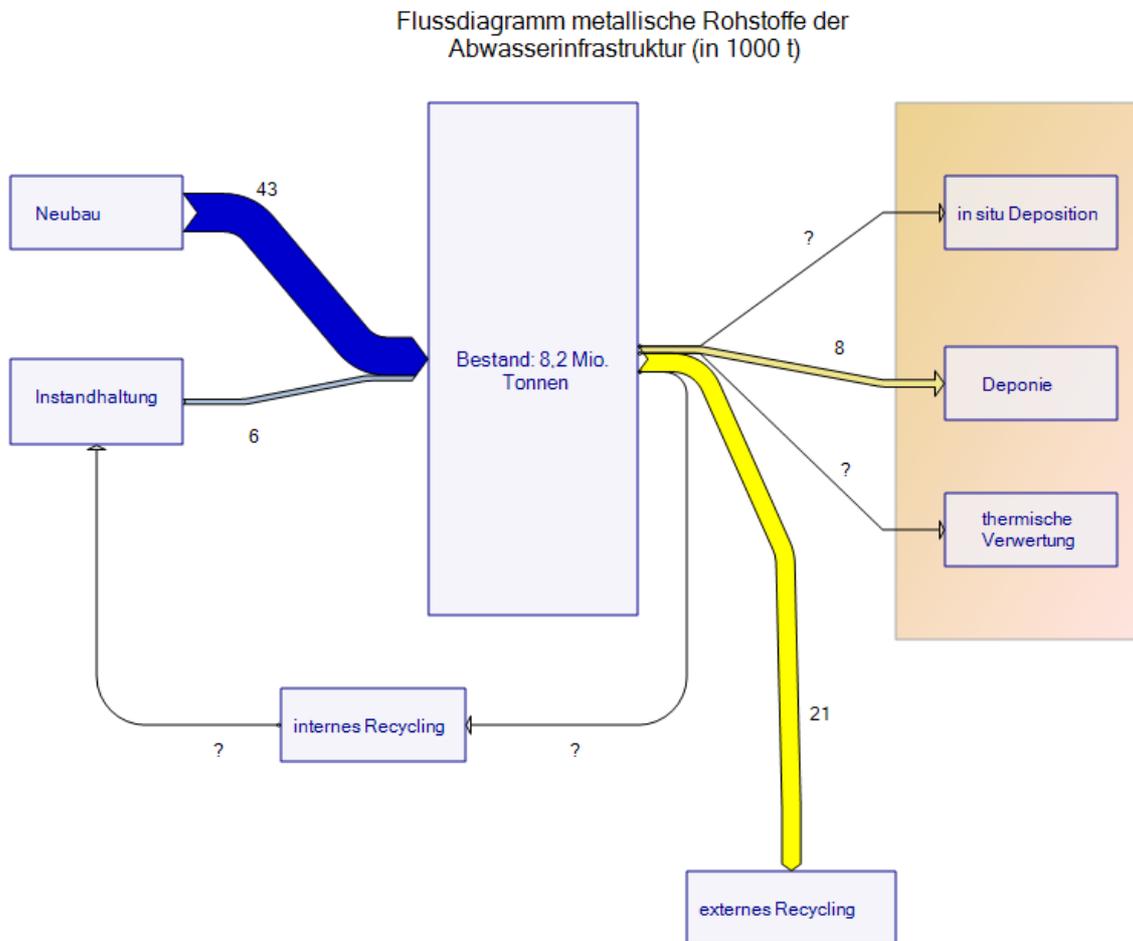
Abb. 22: Flussdiagramm der mineralischen Rohstoffe in Abwasserinfrastrukturen



Quelle: Eigene Berechnungen

Analog zu den Ingenieurbauwerken wird für die mineralischen Rohstoffe (Beton, Kalksandstein, Kanalklinker, Steinzeug und Zementmörtel) die in der Bauabfallstatistik angegebene Recyclingquote von 62 % für Bauschutt unterstellt. Für die restlichen Mengen wird eine Deponierung unterstellt. Bzgl. der Rohrbettung wird eine direkte Wiederverwendung vor Ort angenommen. Wie bei der Wasserinfrastruktur wird die Sandbettung für die offene Instandhaltung wiederverwendet und als internes Recycling gewertet.

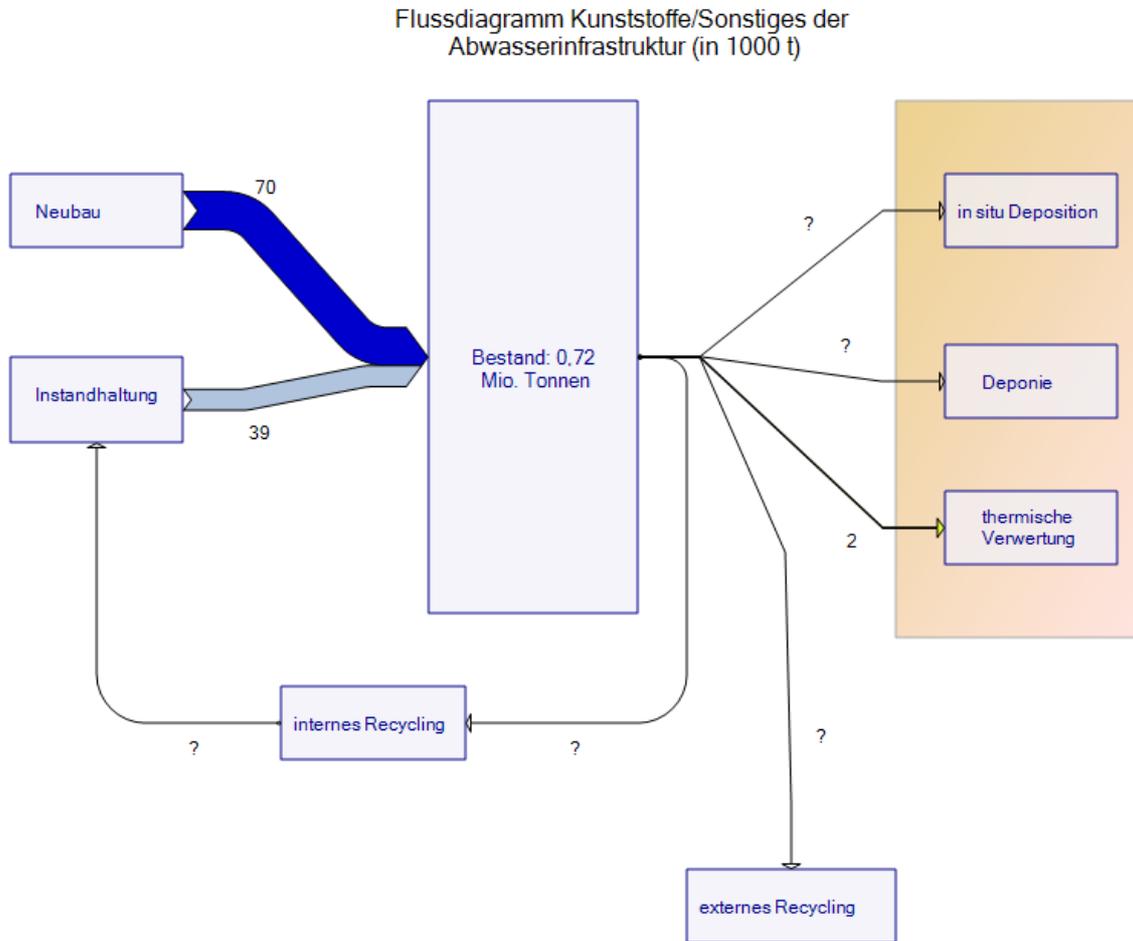
Abb. 23: Flussdiagramm der metallischen Rohstoffe in Abwasserinfrastrukturen



Quelle: Eigene Berechnungen

Die jährlichen Materialflüsse der metallischen Rohstoffe in Abwasserinfrastrukturen werden bestimmt durch den Rückbau der Kläranlagen. Hier gehen wir davon aus, dass die Stahlmassen aus dem Rückbau der Kläranlagen zu 70 % recycelt werden, während der Rest deponiert wird. Rund 1.000 Tonnen Gusseisen fallen jährlich durch die Erneuerung von Kanalschächten an. Diese können problemlos einem externen Recycling zugeführt werden.

Abb. 24: Flussdiagramm der Kunststoffe und sonstigen Materialien in Abwasserinfrastrukturen



Quelle: Eigene Berechnungen

Jährlich fallen nach unseren Berechnungen etwa 2.000 Tonnen Kunststoffe aus der Erneuerung des Kanalnetzes an, welche unseren Annahmen zufolge zu 100 % einer thermischen Verwertung zugeführt werden.

6.7 Energieverteilung

Wie schon in den Abschnitten zur Verkehrs- und Wasser/Abwasserinfrastruktur soll in diesem Kapitel ein Überblick geschaffen werden, welche Informationen über die Abbruchmengen und den Umgang mit diesen Materialmengen für den Bereich der Energieverteilung schon vorhanden sind und welche Informationen zur Beantwortung dieser Fragen noch gesammelt werden müssen. Bei den Gas- und Stromnetzen können wir anhand der monetären Investitionszahlen zwar einerseits zwischen Erneuerung/Erhaltung und andererseits Wartung/Instandhaltung differenzieren. Allerdings wissen wir nicht, wie die monetären Größen der Kategorie Wartung/Instandhaltung zwischen Wartung und Instandhaltung aufgeteilt werden. Während Wartung vor allem

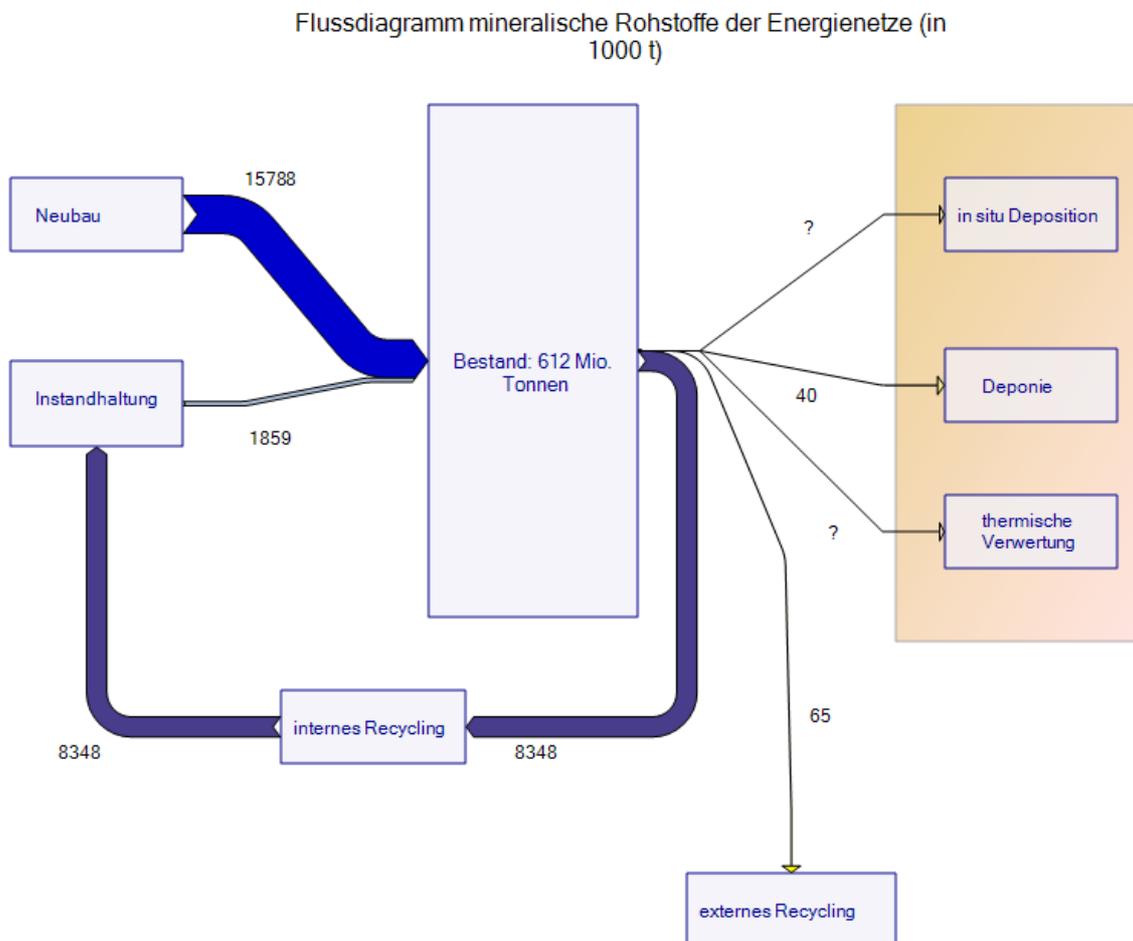
Lohnkosten bzw. regelmäßig anfallende Kosten beinhalten dürfte (z.B. regelmäßige Kontrollen der Erdgastrassen), sind Instandhaltungen auch mit stofflichen Aufwendungen verbunden. Für die Abschätzung der Materialmengen wäre eine Unterscheidung zwischen Instandhaltung und Wartung somit wichtig. Allerdings liegen diese Daten nicht vor. Die Daten der Energieverteilnetze beinhalten daher nur Abschätzungen für die Erneuerung/Ersatz-Investitionen. Für Wärmenetze werden keinerlei jährliche Materialflüsse abgeschätzt.

Wir schätzen, dass der Austausch der Energieverteilungsnetze im Gegensatz zur Wasser- und Abwasserinfrastruktur ohne in-situ-Deponierung durchgeführt wird. Das heißt, ein Verbleib der Stromkabel oder Gasleitungen im Erdreich nach ihrer Nutzung erfolgt nicht. Laut Gesprächen mit Vertretern von Netzbetreibern ist in den Nutzungsverträgen über die benötigten Flächen für Erdkabel und Gasleitungen der Rückbau der Altanlagen in der Regel festgeschrieben. Ob Fundamente von WEA bzw. Freileitungsmasten allerdings vollständig rückgebaut werden, ist in der Literatur umstritten. Wir gehen in dieser Studie von einem vollständigen Rückbau aus. Die Sandbettung für Kabel und Gasleitungen wird in unserer Abschätzung komplett nach der Erneuerung wiederverwendet.

Im Rahmen von Erneuerungsmaßnahmen werden in den Stromnetzen verstärkt Freileitungen durch Kabelleitungen im Erdreich ersetzt. Alte Gasleitungen aus Grauguss und duktilem Guss werden durch neue PE-Rohre ersetzt. Daher sind die abgeschätzten Materialmengen der Erneuerung nicht identisch mit den Abbruchmengen dieser Maßnahmen. Zudem entsteht durch den Anteilszuwachs an Kabelleitungen ein zusätzlicher Sandbedarf für Bettung, der dem Materialfluss für Instandhaltung zugerechnet werden muss.

Der unterstellte Recyclinganteil von 62 % bei mineralischen Rohstoffen, abgeleitet aus der von der ARGE KTBW (2007) publizierte Recyclingrate von 62 % für Bauschutt führt zu einer Aufteilung der Abbruchmengen von 65.000 Tonnen Recycling und 40.000 Tonnen Deponie. Weiterhin wird der Sand für die Sandbettung nach unserem Kenntnisstand nach dem Austausch von Kabeln und Rohren wiederverwendet. Wir gehen daher von einer vollständigen internen Kreislaufführung des verwendeten Sands aus.

Abb. 25: Materialflussdiagramm mineralische Rohstoffe der Energieverteilung



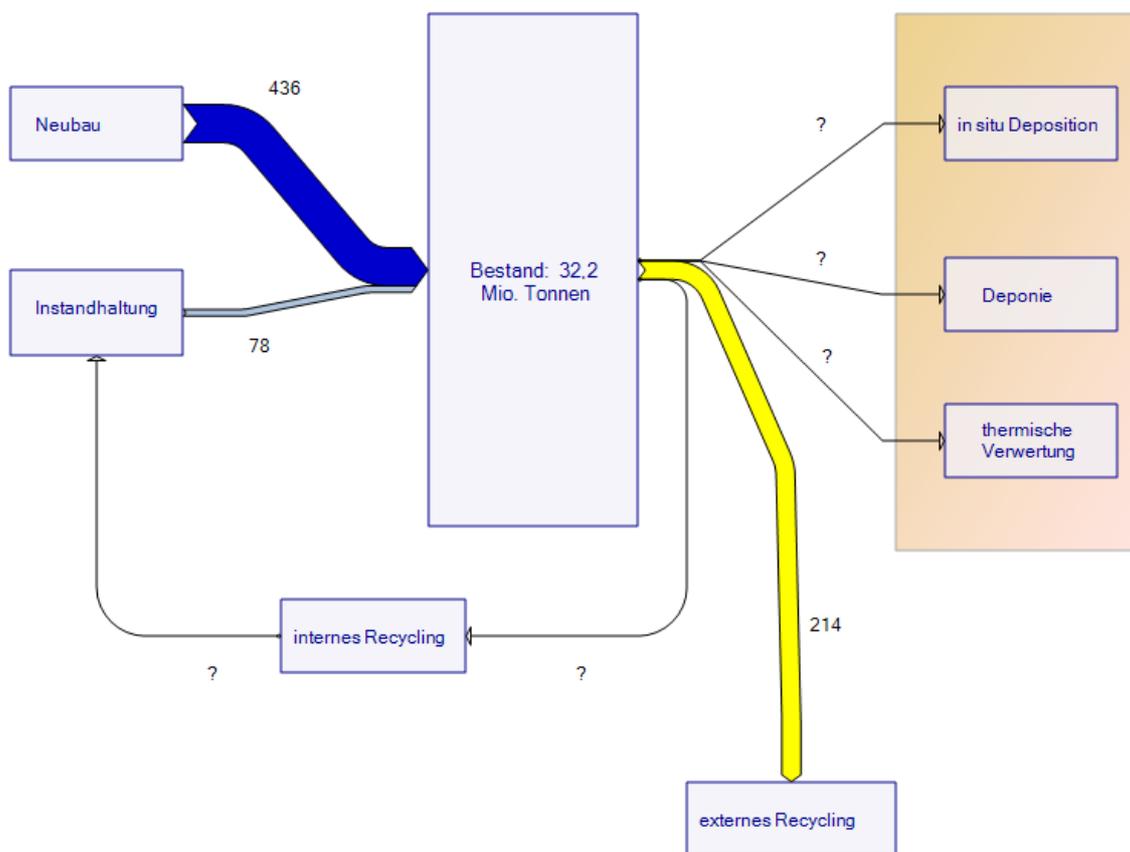
Quelle: Eigene Berechnung

Die metallischen Rohstoffe der Strom- und Gasnetze werden nach unserer Abschätzung nach ihrer Nutzung komplett recycelt. Der Grund liegt in der guten Separierung der einzelnen Bestandteile, die eine gute Erfassung der metallischen Rohstoffe bei der Erneuerung ermöglichen. Es spricht wenig dafür, dass Teilfraktionen dieser Rohre oder Kabel zusammen mit Bauschutt (wie im Hochbau) etc. deponiert werden.

Der höhere Abbruchanteil der metallischen Rohstoffe im Vergleich zu den Instandhaltungen erklärt sich aus dem Ersatz von alten Gasrohren aus Grauguss und duktilem Guss durch PE-Rohre im Mittel- und Niederdrucknetz der regionalen Versorgungsbetriebe.

Abb. 26: Materialflussdiagramm metallische Rohstoffe der Energieverteilung

Flussdiagramm metallische Rohstoffe Energienetze (in 1000 t)

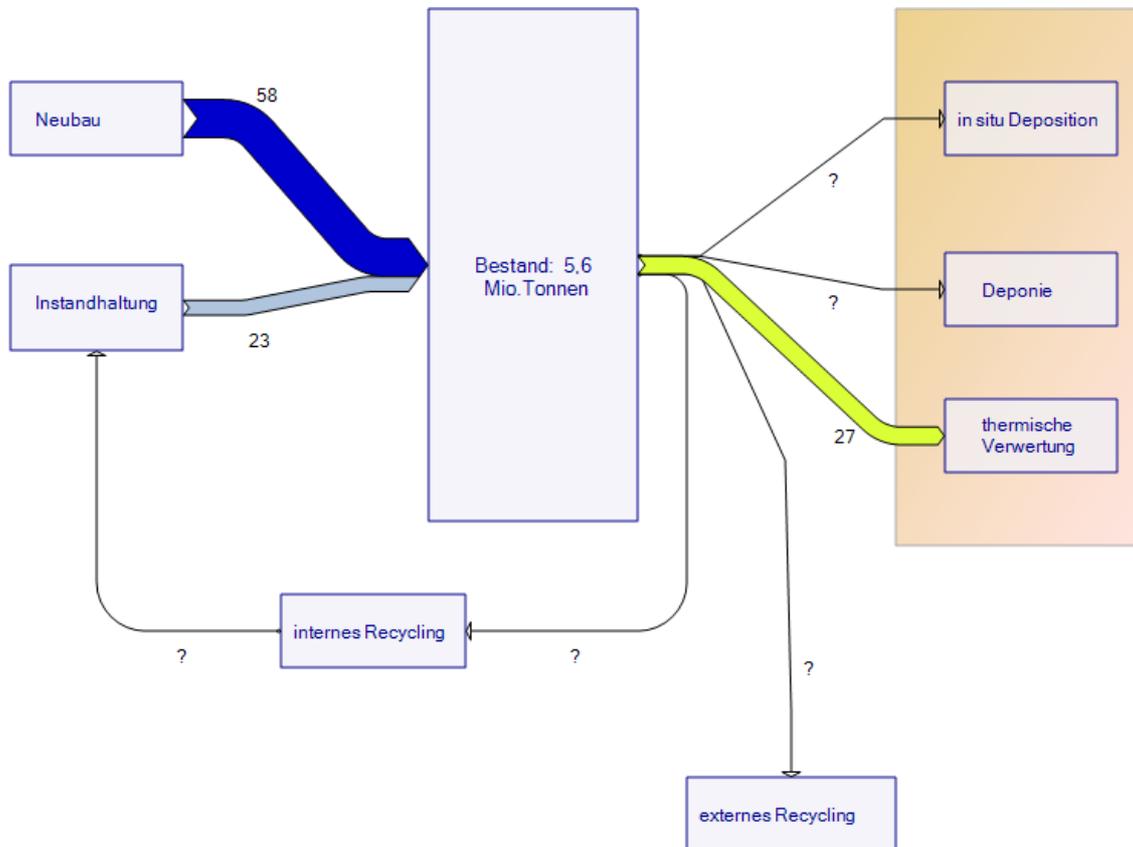


Quelle: Eigene Berechnungen

Die Kunststofffraktion bei Energienetzen besteht zumeist aus PE, in Form von Rohren und Folien bei Gasrohren, aber auch als Ummantelung von Kabeln. In der Abbruchmasse von Stromkabel sind zudem aus den älteren Kabeln Isolieröl und Haftmasse. Wir gehen bei den Kunststoffen und sonstigen Rohstoffen von einer thermischen Verwertung aus.

Abb. 27: Materialflussdiagramm Kunststoffe und sonstige Rohstoffe der Energieverteilung

Flussdiagramm Kunststoffe Energienetze (in 1000 t)



Quelle: Eigene Berechnungen

6.8 Energieerzeugung

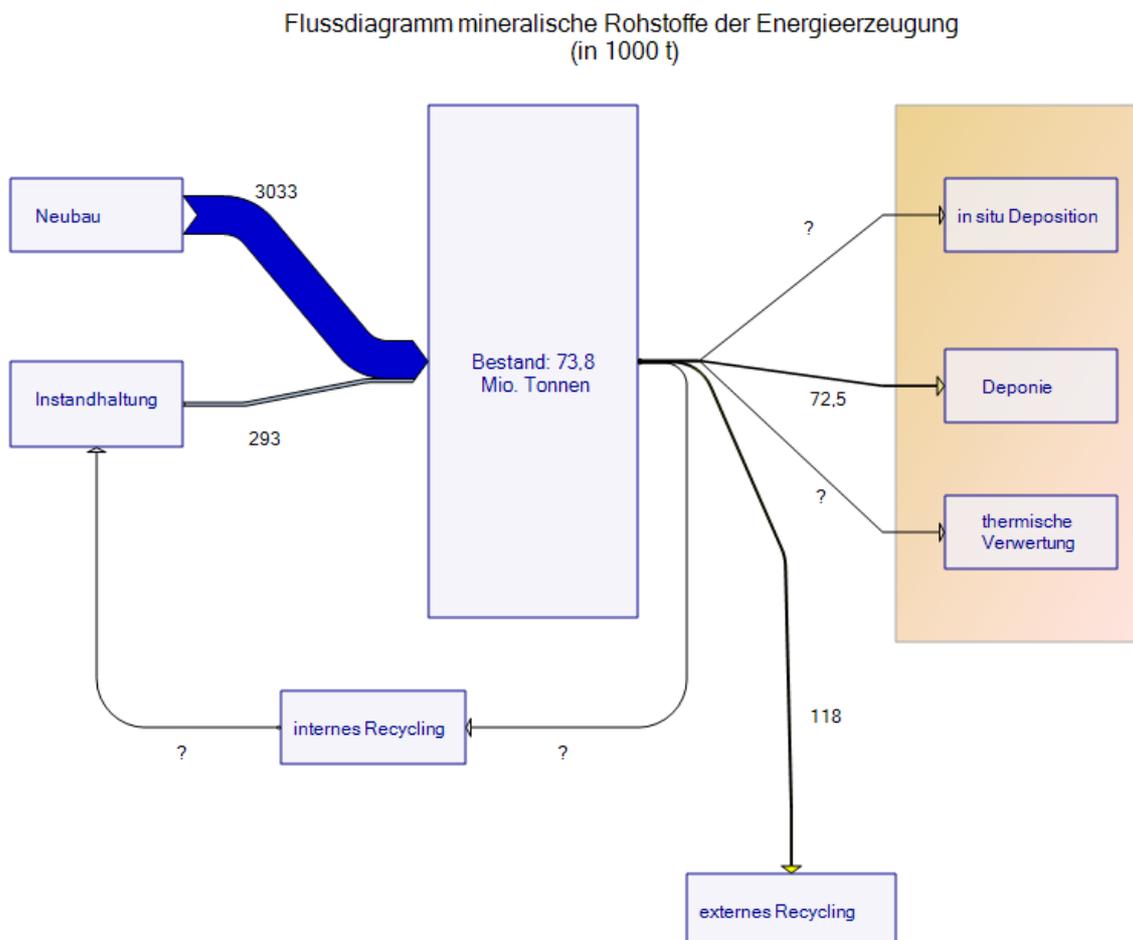
Für konventionelle Kraftwerke und Biogasanlagen sind die Materialaufwendungen für Erneuerung bzw. Instandhaltung über die technische Lebensdauer abgeschätzt, die nicht ohne weiteres mit realen Instandhaltungsmaßnahmen übereinstimmen müssen. Grundsätzlich wäre mit Ausnahme der Wasserkraftwerke und dem Großteil der Gaskraftwerke zwar möglich, über die Altersstruktur der Kraftwerke, WEA und Biogasanlagen eine Dynamisierung des Anlagenbestandes zu modellieren und damit den Ersatz von Kraftwerken realistischer abzuschätzen. Dies war jedoch in diesem Projekt zeitlich nicht zu leisten. Als Annäherung werden daher die jährlichen Materialflüsse, die über die Abschreibung der technischen Lebensdauer ermittelt wurden, jeweils als Ersatzinvestitionen gewertet. Um logisch konsistent zu bleiben, müssen diesen jährlichen Materialflüssen für die Instandhaltung eine ähnliche Menge an Abbruchmengen gegenüberstehen. Beton und Bewehrungsstahl, die üblicherweise in Gebäuden eingesetzt werden und bei der nur geringe Instandhaltungen in der Nutzungsphase angenommen

werden, sind nur mit 10 % ihrer Bestandsmenge in die Abschätzung des Instandhaltungsaufwandes übernommen worden.

Für WEA wird keine reguläre Instandhaltung abgeschätzt, allerdings fließen in die Instandhaltung die Materialflüsse der Repowering-Maßnahmen mit ein. In der Abbruchmenge sind wiederum die Ressourcen erfasst, die im Rahmen von Repowering durch den Abbau älter WEA anfallen. Für Wasserkraftanlagen werden keine Materialbedarfe für den Neubau abgeschätzt, da hierfür keine Daten vorliegen.

Da es sich zumeist um Gebäude mit entsprechender Maschinen- und Regelungstechnik handelt, werden die mineralischen Rohstoffe des Gebäudes wie normaler Bauschutt bewertet. Das heißt, wir gehen bei Abbruch bzw. Erneuerung alter Kraftwerke von einer Recyclingquote von 62 % aus, die restlichen 38 % der mineralischen Rohstoffe werden danach deponiert.

Abb. 28: Materialflussdiagramm mineralische Rohstoffe der Energieerzeugung

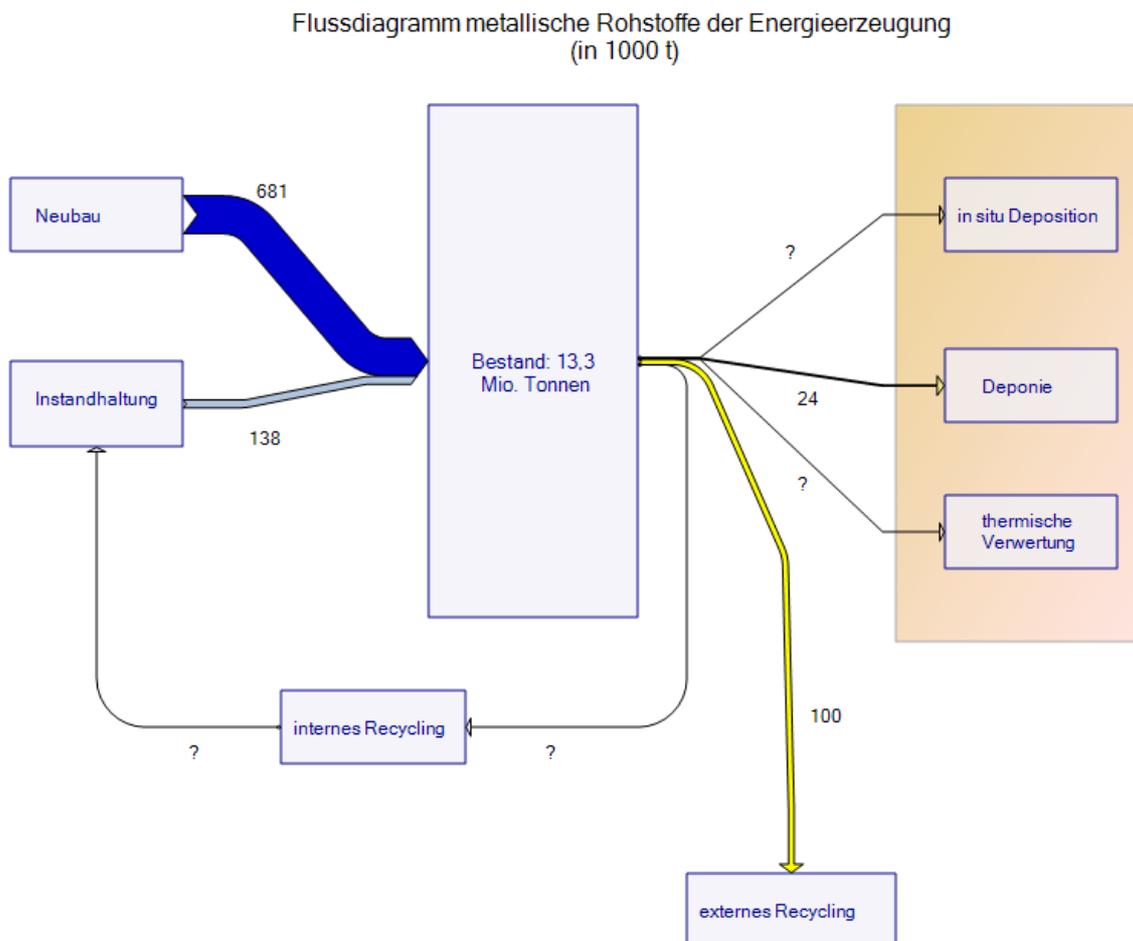


Quelle: Eigene Berechnungen

Für metallische Rohstoffe wird als Annahme getroffen, dass der Anteil des unlegierten bzw. niedriglegierten Stahls vor allem den Bewehrungsstahl der Gebäude umfasst. Bei

diesem gehen wir, wie Doka (2007), von einem Recyclinganteil von 70 % aus. Für die restlichen metallischen Rohstoffe wird vermutet, dass diese meist Bestandteil der Maschinen- und Steuerungstechnik darstellen und diese vor dem Rückbau eines Kraftwerks zuvor aus dem Gebäude entfernt werden. Damit ist grundsätzlich eine gute Erfassung dieser Metalle möglich, so dass wir von einer Recyclingquote von 90 % der restlichen Metalle ausgehen. Aus diesen Überlegungen heraus ergeben sich folgende Abbruchmengen metallischer Rohstoffe:

Abb. 29: Materialflussdiagramm metallische Rohstoffe der Energieerzeugung

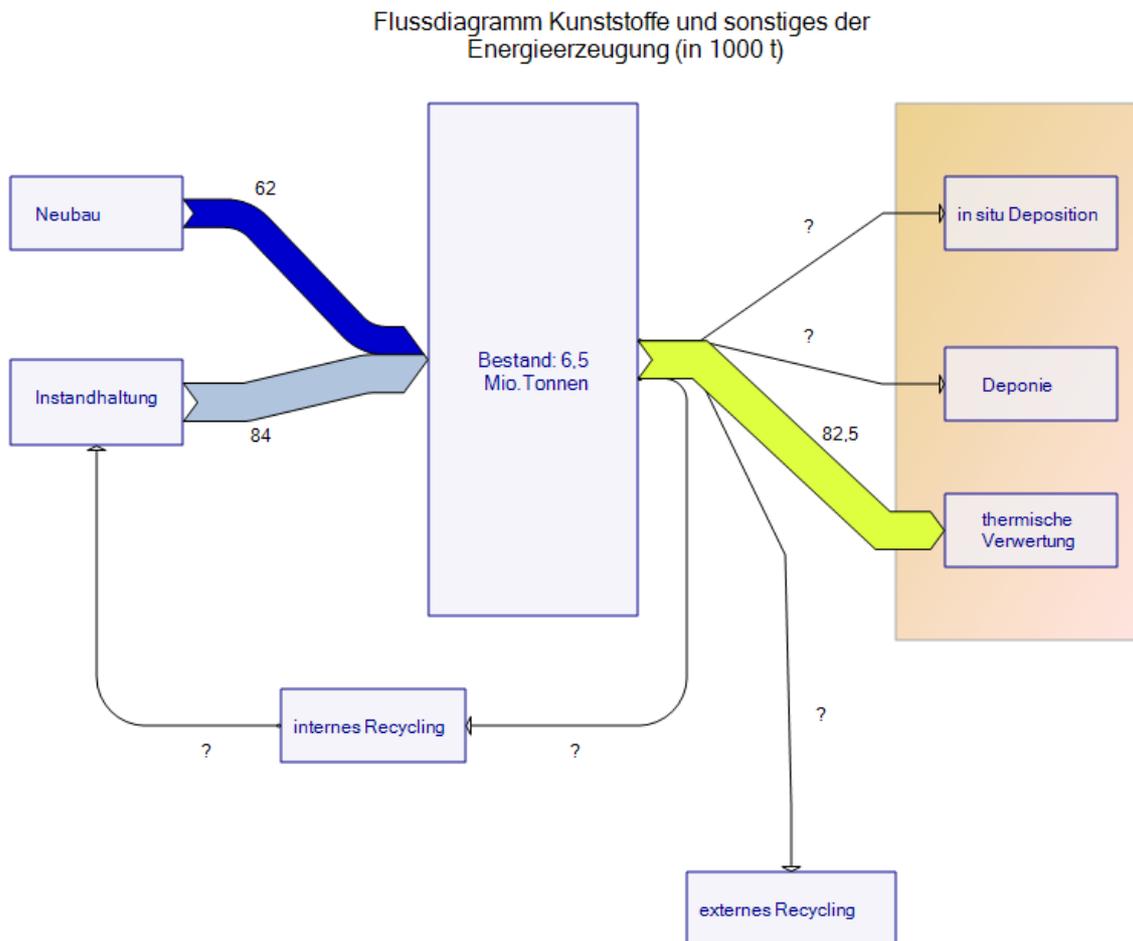


Quelle: Eigene Berechnungen

Die Kunststoffe und sonstigen Materialien im Bereich der Energieerzeugung umfassen vor allem Mineralwolle, PE und PVC. In geringeren Mengen sind in den Instandhaltungsflüssen auch noch Gummi, glasfaserverstärkter Kunststoff und eine nicht näher bestimmte Kategorie der sonstigen Materialien im Bereich der Wasserkraftanlagen enthalten. Es liegen keine Informationen über die Verwertungs- bzw. Behandlungswege dieser Stoffkategorien beim Rückbau von Energieerzeugungseinrichtungen vor. Wir

vermuten, dass diese Materialien vor allem thermisch verwertet werden und haben die Abbruchmengen der Kunststoffe und sonstigen Materialien entsprechend zugeordnet.

Abb. 30: Materialflussdiagramm Kunststoffe und sonstige Materialien der Energieerzeugung



Quelle: Eigene Berechnungen

7 Zusammenfassung und Handlungsempfehlungen

Die in diesem Projekt zusammengetragenen Ergebnisse zeigen, dass die Errichtung und Erhaltung von Infrastruktursystemen mit erheblichen Stoffströmen verbunden sind. Die erstellte Datenbasis der in Infrastrukturen gebundenen Materialspeicher und jährlich anfallenden Materialflüsse liefert die Grundlage, mit deren Hilfe gezielt Ansätze zur Ressourcenschonung abgeleitet und diskutiert werden können. Zudem liefern die Projektergebnisse Informationen, welche Materialien in welcher Menge bei einem Rückbau dieser Infrastrukturen potenziell als Recyclingmaterial zur Verfügung stehen würden. Sie können zudem dafür genutzt werden, die stoffliche Dimension bestimmter Ausbauziele (z.B. DENA-Netzstudien im Stromsektor) abzuschätzen.

Sowohl die Bestands- als auch die Flussgrößen wurden bis auf wenige Ausnahmen mittels eines bottom-up-Ansatzes erfasst, bei dem die Länge bzw. die Anzahl der einzelnen Referenzsysteme mit spezifischen Materialkoeffizienten verknüpft und auf den Gesamtbestand bzw. auf die jährliche Erweiterung / Erneuerung hochgerechnet wurden.

Für die einzelnen Infrastruktursysteme lagen Daten unterschiedlicher Güte und Detailtiefe vor. Während z.B. für die Schieneninfrastruktur oder Windenergieanlagen sehr genaue und ausführliche Materialdaten vorlagen, bis hin zum gespeicherten Bestand an Schmieröl oder Epoxidharz, lagen für andere Infrastrukturbereiche nur grundlegende Daten vor. So sind für Wasserkraftwerke nur Beton und die drei Massenmetalle Stahl, Kupfer und Aluminium explizit abgeschätzt. Für einzelne Infrastruktursysteme konnte zudem der Materialverbrauch, der mit dem Ausbau bzw. der Erneuerung dieser Systeme verbunden ist, aufgrund fehlender Daten nicht ermittelt werden (siehe Tab. 154). Die Unterschiede in der Qualität und Detailtiefe der Daten haben Auswirkung auf die Höhe des abgeschätzten Materialbestandes bzw. der jährlichen Materialflüsse und damit wiederum auf die Vergleichbarkeit der jeweiligen Infrastruktursysteme untereinander. Zusätzlich hat die Auswahl der Referenzsysteme, für die der Materialbestand abgeschätzt wurde, einen Einfluss auf die Ergebnisse. Während durch Schmied/Mottschall (2010) die Schieneninfrastruktur nahezu vollständig abgebildet werden konnte, war dies bei anderen Infrastruktursystemen nicht der Fall. So wurden z.B. für die Gasnetze bis auf pauschale Zuschläge für Regler und Schieber keine weiteren Einrichtungen der Netzinfrastruktur, wie Druckregelungsanlagen oder Leitstellen, mit in die Abschätzung einbezogen.

Die Materialbestände der deutschen **Straßeninfrastruktur** (über 7,3 Mrd. Tonnen) wurden über technische Straßenbaunormen, die den Aufbau verschiedener Straßenkategorien (Bundesautobahnen, Bundes-, Landes-, Kreis- und Gemeindestraßen) festlegen, für einen Quadratmeter Referenzstraße ermittelt und diese Werte auf der Basis von Referenzquerschnitten dann auf die bestehende Länge des deutschen Straßennetzes hochgerechnet. Die jährlichen Erneuerungsbedarfe wurden über die Nutzungs- bzw. Lebensdauer hochgerechnet. Die hier erfassten Materialmengen ergeben sich

allein aus der Betrachtung der Straßenflächen sowie der Ingenieurbauwerke an Bundesautobahnen. Andere Bereiche, die ebenfalls der Straßeninfrastruktur zugerechnet werden können, wie Fuß- und Radwege, Lärmschutzwände oder Schutzplanken waren nicht Teil der Analyse.

Der Materialbestand im Bereich der **Schieneinfrastruktur** (1,15 Mrd. Tonnen) konnte im Verlauf des Projektes dank der umfangreichen Daten eines parallel durchgeführten UBA-Projektes (Schmied/Mottscharl 2010) sehr umfassend ermittelt werden. Die Hochschätzung der gespeicherten Materialmengen in der **Wasserstraßeninfrastruktur** (rund 190 Mio. Tonnen), einschließlich Umschlaganlagen, basiert im Wesentlichen auf früheren Untersuchungen von Stiller (1995) und Manstein/Stiller (2000), welche am Wuppertal Institut durchgeführt wurden.

Die gespeicherte Menge an mineralischen Rohstoffen in der Straßeninfrastruktur übersteigt die der anderen Infrastruktursysteme deutlich. Zudem sind die jährlichen Stoffflüsse im Bereich der Verkehrsinfrastrukturen - im Gegensatz zu den anderen Infrastruktursystemen - vor allem durch die Instandhaltung der Infrastruktur bestimmt. So ist der jährliche Materialbedarf für die Instandhaltung im Straßenbau (104 Mio. Tonnen) fünfmal höher als der des Neu- und Ausbaus (21 Mio. Tonnen). Dabei sind Gemeindestraßen sowohl beim Neubau als auch bei der Instandsetzung in absoluten Größen auf Grund der Länge des Straßennetzes der größte Verursacher von Stoffflüssen⁸⁹. Auch im Schienennetz geht der Großteil der jährlichen Stoffströme in die Instandhaltung der Strecken. Eine Erweiterung findet nur noch in geringem Maße statt.

Der Materialbestand bei Wasserstraßen ist mit rund 190 Mio. Tonnen ebenfalls hoch und wird wie die anderen Infrastrukturbereiche durch mineralische Baustoffe dominiert. Die Datensituation lässt eine belastbare Analyse der Materialströme zur Instandhaltung von Wasserstraßen nicht zu. Daher konnte nur der Materialbestand für den Neu- und Ausbau abgeschätzt werden⁹⁰.

Im Bereich der **Wasser- und Abwasserinfrastruktur** wurden folgenden Referenzsysteme identifiziert und untersucht:

- Infrastrukturen der Wasserversorgung:
Talsperren, Wasserwerke, Wasserspeicher, Leitungsnetz
- Infrastrukturen der Abwasserentsorgung:
Kanalnetz, Schächte, Regenentlastung, Kläranlagen

Bezüglich der in der Wasser- und Abwasserinfrastruktur gebundenen Materialien ist auch hier die herausragende Bedeutung der mineralischen Baustoffe hervorzuheben, welche knapp 99 % der insgesamt knapp 1,8 Mrd. Tonnen Baustoffe ausmachen. Dies liegt vorwiegend an der Rohbettung der Leitungsnetze. Auch Beton (und hier vorwie-

⁸⁹ Pro Kilometer sind Autobahnen der ressourcenintensivste Straßentyp.

⁹⁰ Die Instandsetzung von z. B. Schleusen ist allerdings nur schwierig von einem Ausbau zu unterscheiden. Häufig wird bei einer Instandsetzung die Schleuse erweitert und ausgebaut.

gend Stahlbeton) spielt mit knapp 500 Mio. Tonnen bei der Konstruktion vieler Anlagen der Wasser- und Abwasserinfrastruktur eine große Rolle. Im Gegensatz dazu spielen Metalle (rund 20 Mio. Tonnen, davon überwiegend Stahl und Eisen) und Kunststoffe (< 2 Mio. Tonnen) nur eine untergeordnete Rolle. Als Hauptwerkstoffe im Leitungsbau sind sie zudem meist unterirdisch verbaut und damit schlecht zugänglich.

Die Veränderung des aktuellen Materialbestandes resultiert im Wesentlichen aus Neubau- / bzw. Rückbauaktivitäten und zu einem geringeren Maße aus unterschiedlichen Sanierungsverfahren.⁹¹ Jedoch konnten gerade die jährlichen Flüsse für Erneuerung und Instandhaltung häufig nicht belastbar ermittelt werden. Damit ist eine Vergleichbarkeit der ermittelten jährlichen Flüsse gerade mit anderen Infrastruktursystemen schwierig. Angesichts der lückenhaften Datengrundlagen sind die ermittelten jährlichen Materialflüsse mit etwa 1 % wahrscheinlich unterschätzt. Dies gilt insbesondere für durch Instandhaltung induzierte Materialflüsse. Durch den Einsatz neuer Materialien (verstärkte Verwendung von Kunststoff) liegt der Materialinput bei Erneuerungsaktivitäten teilweise sogar unter dem Material-Output. Bei der Interpretation der Ergebnisse ist zu berücksichtigen, dass eine Annäherung an tatsächliche Erneuerungsraten (statt erforderlicher Erneuerungsraten) die Grundlage für die Berechnungen stellt. Gerade im Bereich der Wasser- und Abwasserinfrastruktur wird der Investitionsbedarf in die Instandhaltung als sehr hoch eingeschätzt, was steigende jährliche Materialflüsse nach sich ziehen würde. Die Angaben über den Investitionsbedarf schwanken allerdings stark. Während Kluge et al. (2003) von 150 bis 250 Mrd. Euro sprechen, kommen Reidenbach et al. (2008) nur auf einen kommunalen Investitionsbedarf von 65 Mrd. Euro für Ersatzinvestitionen im Wasser- und Abwasserbereich.

Im Rahmen von MaRes wurden neun verschiedene Arten der **Stromerzeugung** untersucht.⁹² Nicht untersucht wurden zum einen Anlagen mit geringer Bedeutung für die deutsche Energieversorgung (z.B. geothermische Stromerzeugung) bzw. Energieerzeugungsarten, die häufig zunächst zur Eigenversorgung dienen (Photovoltaik). Im Bereich der Energieverteilungsinfrastruktur wurden die Daten für die Strom-, Gas- und Wärmenetze erfasst.

Die Materiallager der **Energieverteilungsnetze** (650 Mio. Tonnen) sind - bedingt durch die Sandbettung der Stromkabel und der Gas- und Fernwärmerohre - deutlich materialintensiver als die Erzeugungsinfrastruktur (88 Mio. Tonnen). Ohne den verbauten Sand (585 Mio. Tonnen) sind allerdings im Bestand der Energieerzeugungsinfrastrukturen höhere Mengen an Rohstoffen gespeichert. Wie auch im Bereich der Wasser- und Abwasserinfrastruktur bestimmen neben Sand vor allem Beton (94 Mio. Tonnen) und Stahl (37 Mio. Tonnen) die Materialbestände der Energieinfrastrukturen.

⁹¹ In der Sanierung unterscheiden wir Reparatur, Instandhaltung und Erneuerung.

⁹² Dies sind konventionelle Kraftwerke (Stein- und Braunkohle), Gaskraftwerke, Kernkraftwerke, und im Bereich der erneuerbaren Energiequellen Wasserkraft- und Windenergieanlagen (on-shore) sowie Biogasanlagen. Zusätzlich wurden noch Heizkraftwerke und Blockheizkraftwerke abgeschätzt.

Konventionelle Kraftwerke sind in ihrer Mehrzahl am Ende ihrer Lebensdauer angelangt und müssen entweder ausgetauscht oder durch andere **Energieerzeugungssysteme** ersetzt werden – z.B. dezentral auf Grundlage erneuerbarer Energiequellen. Damit sind relevante Ressourcenaufwendungen verbunden. Unsere Analysen zeigen, dass auch dezentrale Einrichtungen mit hohen Stoffströmen für die Erstellung der Anlagen verbunden sind. Allerdings wird dies bspw. bei Windenergieanlagen in der Nutzungsphase mehr als kompensiert, da bis auf notwendige Instandsetzungen nur geringe Stoffströme induziert werden und pro kWh erzeugter Energie deutlich weniger Ressourcen beansprucht werden als bei fossilen Kraftwerken.

Mit dem Ausbau dezentraler Energieerzeugungsanlagen und einer regionalen Verschiebung des Angebots (Offshore Windenergie im Norden Deutschlands) muss mit verstärkten Investitionen für den Leitungsbau auf allen Spannungsebenen gerechnet werden. Insgesamt sind die jährlichen Materialströme im Bereich der Energienetze und der regenerativen Energieerzeugungseinrichtungen noch deutlich mehr durch Ausbau und Erweiterung als durch Erneuerung und Instandhaltung geprägt.

Der Materialbestand der drei Infrastruktursysteme ergibt nach unseren Abschätzungen zusammen einen Wert von 11,13 Mrd. Tonnen. Zu fast 99 % werden diese Bestandsmengen durch mineralische Rohstoffe bestimmt. Der größte Teil der mineralischen Rohstoffe besteht aus Sand und Kies, der zum einen als Unterschicht in der Verkehrsinfrastruktur genutzt wird, zum anderen als Kabel- und Rohrbettung in der Wasser-/Abwasserinfrastruktur sowie bei den Energienetzen verwendet wird. Die Hälfte des Betonbestandes ist in den Infrastrukturen der Abwasser- und Wasserwirtschaft gebunden.

Tab. 157: Übersicht über den Materialbestand an mineralischen Rohstoffen

in 1.000 t	Beton	Sand, Kies, Splitt	Schotter	Zement	sonstige min. Bau- stoffe	Summe
Verkehrsinfrastruktur	262.959	7.184.286	953.750		185.106	8.586.101
Straßeninfrastruktur		6.484.083	639.814		102.383	7.226.281
Ingenieurbauwerke Bundesfernstraßen	57.191					57.191
Schieneninfrastruktur	137.565	670.515	313.935		99	1.122.114
Wasserstraßen	68.203	29.688			82.624	180.515
Wasser- und Abwasserinfrastruktur	475.512	1.163.003		6.147	95.413	1.740.075
Wasserinfrastruktur	148.747	424.535		688	57.203	631.173
Abwasserinfrastruktur	326.765	738.468		5.459	38.210	1.108.902
Energieinfrastruktur	93.682	589.952		1.492	823	685.949
Energienetze	25.628	584.988		1.427	112	612.154
Energieerzeugung	68.054	4.964		65	711	73.794
Summe	832.153	8.937.241	953.750	7.639	281.342	11.012.124

Quelle: Eigene Berechnung

Rund 100 Mio. Tonnen metallische Rohstoffe sind nach unseren Berechnungen in den drei Infrastruktursystemen gespeichert. Der überwiegende Teil davon besteht aus Stahl und Eisen mit fast 92 Mio. Tonnen. Metallische Rohstoffe sind vor allem in der Schieneninfrastruktur und den Energienetzen gespeichert. Wesentliche Mengen von über 10 Mio. Tonnen sind zudem jeweils in der Wasserinfrastruktur und in den Anlagen der Energieerzeugung zu finden.

Tab. 158: Übersicht über den Materialbestand an metallischen Rohstoffen

in 1.000 t	Stahl/Eisen	Kupfer	Aluminium	andere Metalle	Summe
Verkehrsinfrastruktur	33.003	436	134	46	33.619
Straßeninfrastruktur					0
Ingenieurbauwerke Bundesfernstraßen	4.380				4.380
Schieneninfrastruktur	20.848	436	134	46	21.464
Wasserstraßen	7.775				7.775
Wasser- und Abwasserinfrastruktur	20.077	93	18	13	20.201
Wasserinfrastruktur	11.996	12		13	12.021
Abwasserinfrastruktur	8.081	81	18		8.180
Energieinfrastruktur	38.733	3.637	2.026	1.172	45.568
Energienetze	25.891	3.408	1.817	1.124	32.240
Energieerzeugung	12.842	229	209	48	13.328
Summe	91.813	4.166	2.178	1.231	99.388

Quelle: Eigene Berechnung

Die Energieerzeugung und Energienetze sind über die hohen Bestände an Dämmmaterial, PE-Rohren und glasfaserverstärkter Kunststoff (GFK) die mit Abstand größten Materiallager im Bereich der Kunststoffe und sonstige Materialien. Die Verkehrsinfrastruktur, in Form der Schieneninfrastruktur, ist vor allem über den Bestand an Holzschwellen im Gesamtbestand der „Kunststoffe und sonstigen Materialien“ vertreten.

Tab. 159: Übersicht über den Materialbestand an Kunststoffen und sonstigen Materialien

in 1000 t	Kunststoffe	Dämm- Mat.	Holz	Sonstiges	Summe
Verkehrsinfrastruktur	2.282	0	2.979	273	5.534
Straßeninfrastruktur					0
Ingenieurbauwerke Bundesfernstraßen					0
Schieneninfrastruktur	398		2.979	273	3.650
Wasserstraßen	1.884				1.884
Wasser- und Abwasserinfrastruktur	1.654	0	0	0	1.654
Wasserinfrastruktur	934				934
Abwasserinfrastruktur	720				720
Energieinfrastruktur	3.818	548	725	7.033	12.124
Energienetze	3.670	326	725	914	5.634
Energieerzeugung	148	222		6.119	6.489
Summe	7.755	548	3.704	7.305	19.312

Quelle: Eigene Berechnungen

Neben den Verkehrsinfrastrukturen, die über ihre Unterbauten hohe Bestände an mineralischen Rohstoffe binden, sind im Bestand vor allem die Netzinfrastrukturen von Bedeutung, deren Netze im Erdreich und damit im überwiegenden Teil in Sandbettung verlegt sind. Diese Sandmengen können und werden aber gut im Kreislauf geführt, so dass an dieser Stelle meist nur ein Bedarf durch Neubau entsteht.

Tab. 160: Übersicht über den jährlichen Materialbedarf an mineralischen Rohstoffen für den Neu- und Ausbau

in 1.000 t	Beton	Sand, Kies, Splitt	Schotter	Zement	sonstige min. Bau- stoffe	Summe
Verkehrsinfrastruktur	3.684	21.379	4.685	0	428	30.177
Straßeninfrastruktur		18.958	1.846		418	21.222
Ingenieurbauwerke Bundesfernstr.	1.145					1.145
Schieneninfrastruktur	1.461	1.936	2.840		1	6.238
Wasserstraßen	1.079	485			9	1.573
Wasser- und Abwasserinfrastruktur	3.275	12.974	0	14	471	16.738
Wasserinfrastruktur	73	1.525		5	144	1.747
Abwasserinfrastruktur	3.202	11.449		9	327	14.991
Energieinfrastruktur	3.017	15.768	0	8	28	18.822
Energienetze	172	15.606			11	15.788
Energieerzeugung	2.846	163		8	17	3.033
Summe	9.977	50.122	4.685	22	928	65.735

Quelle: Eigene Berechnungen

Für den Neubau von Infrastrukturen werden nach unserer Berechnung pro Jahr ca. 66 Mio. Tonnen mineralischer Rohstoffe benötigt, davon rund die Hälfte in der Verkehrsinfrastruktur. Wie im Bestand ist der jährliche Verbrauch an mineralischen Rohstoffen vor allem durch Sand, Kies und Splitt (75 % der Gesamtmenge) bestimmt.

Tab. 161: Übersicht über den jährlichen Materialbedarf an metallischen Rohstoffen für Neu- und Ausbau

in 1.000 t	Stahl/Eisen	Kupfer	Aluminium	andere Metalle	Summe
Verkehrsinfrastruktur	315	5	2	1	322
Straßeninfrastruktur					0
Ingenieurbauwerke Bundesfernstr.	89				89
Schieneninfrastruktur	163	5	2	1	170
Wasserstraßen	63				63
Wasser- und Abwasserinfrastruktur	67	0	0	0	67
Wasserinfrastruktur	24				24
Abwasserinfrastruktur	43				43
Energieinfrastruktur	1.027	44	42	3	1.116
Energienetze	377	29	30	0	436
Energieerzeugung	650	15	12	3	681
Summe	1.409	48	44	4	1.505

Quelle: Eigene Berechnung

Für den Ausbau der Netze werden pro Jahr ca. 1,5 Mio. Tonnen metallischer Rohstoffe benötigt. Der Großteil dieser Metalle wird zum Ausbau der Energienetze aber vor allem der Energieerzeugungseinrichtungen benötigt. Rund die Hälfte der 681.000 Tonnen an metallischen Rohstoffen für den Aus- und Neubau von Anlagen der Energieerzeugung ist unseren Berechnungen nach dem jährlichen Zuwachs von Windenergieanlagen zuzuschreiben.

Tab. 162: Übersicht über den jährlichen Materialbedarf an Kunststoffen und sonstigen Rohstoffen für den Neu- und Ausbau

in 1.000 t	Kunststoffe	Dämm-Mat.	Holz	Sonstiges	Summe
Verkehrsinfrastruktur	4	0	0	0	4
Straßeninfrastruktur					0
Ingenieurbauwerke Bundesfernstr.					0
Schieneninfrastruktur	4		0	0	4
Wasserstraßen					0
Wasser- und Abwasserinfrastruktur	75	0	0	0	75
Wasserinfrastruktur	5				5
Abwasserinfrastruktur	70				70
Energieinfrastruktur	65	12	0	43	120
Energienetze	58	0			58
Energieerzeugung	7	12		43	62
Summe	144	12	0	43	199

Quelle: Eigene Berechnung

Der jährliche Bedarf an Kunststoffen und sonstigen Materialien ist mit 200.000 Tonnen vergleichsweise gering. Er wird vor allem durch den Ausbau der Gas- und Abwasser-netze mit PE-Rohren und den Bedarf an glasfaserverstärkter Kunststoff für die Roto-ren der neu errichteten Windenergieanlagen bestimmt.

Während die Datenqualität der Materialbestände und der jährlichen Mengen für den Aus- und Neubau zum großen Teil als recht gut eingeschätzt wird, sind die Unsicher-heiten bei der Abschätzung der jährlichen Materialmengen für die Instandhaltung als deutlich höher einzustufen. Ein Vergleich der einzelnen Infrastruktursysteme ist mit den genannten Einschränkungen der Datenqualität und Berechnungsmethoden vorzu-nehmen.

Nach unseren Berechnungen sind pro Jahr rund 148 Mio. Tonnen an mineralischen Rohstoffen notwendig, um die drei Infrastruktursysteme instand zu halten. Die größte Menge ergibt sich aus der Instandhaltung der Straßeninfrastruktur, die fast vollständig die jährlichen Materialmengen für Instandhaltung verursachen. Allerdings werden dafür im hohen Maße RC-Baustoffe verwendet.

Tab. 163: Übersicht über den jährlichen Materialbedarf an mineralischen Rohstoffen für die Instandhaltung

in 1.000 t	Beton	Sand, Kies, Splitt	Schotter	Zement	sonstige min. Bau- stoffe	Summe
Verkehrsinfrastruktur	3.513	109.857	28.813	0	3.149	145.331
Straßeninfrastruktur		97.462	3.198		3.149	103.809
Ingenieurbauwerke Bundesfernstr.	964					964
Schieneninfrastruktur	2.517	12.395	25.614		0	40.526
Wasserstraßen	32					32
Wasser- und Abwasserinfrastruktur	561	0	0	34	77	672
Wasserinfrastruktur				32		32
Abwasserinfrastruktur	561			2	77	640
Energieinfrastruktur	203	1.829	0	0	6	2.038
Energienetze	42	1.816			1	1.859
Energieerzeugung	162	12		0	5	179
Summe	4.277	111.686	28.813	34	3.232	148.042

Quelle: Eigene Berechnung

Metallische Rohstoffe für die Instandhaltung fallen vor allem in der Schieneninfrastruktur und den Anlagen der Energieerzeugungseinrichtungen an. Dort werden über die Abschreibung der technischen Lebensdauer hohe Instandhaltungsbedarfe für Schienen und Kraftwerksgebäude mit ihrem Bewehrungsstahl unterstellt.

Tab. 164: Übersicht über den jährlichen Materialbedarf an metallischen Rohstoffen für die Instandhaltung

in 1.000 t	Stahl/Eisen	Kupfer	Aluminium	andere Metalle	Summe
Verkehrsinfrastruktur	690	20	2	5	717
Straßeninfrastruktur					0
Ingenieurbauwerke Bundesfernstr.	81				81
Schieneninfrastruktur	610	20	2	5	636
Wasserstraßen					0
Wasser- und Abwasserinfrastruktur	72	0	0	0	72
Wasserinfrastruktur	66				66
Abwasserinfrastruktur	6				6
Energieinfrastruktur	145	28	21	1	195
Energienetze	35	25	18		78
Energieerzeugung	111	3	2	1	118
Summe	908	48	23	6	984

Quelle: Eigene Berechnung

Tab. 165: Übersicht über den jährlichen Materialbedarf an Kunststoffen und sonstigen Rohstoffen für die Instandhaltung

in 1.000 t	Kunststoffe	Dämm-Mat.	Holz	Sonstiges	Summe
Verkehrsinfrastruktur	15	0	99	9	123
Straßeninfrastruktur					0
Ingenieurbauwerke Bundesfernstr.					0
Schieneninfrastruktur	15		99	9	123
Wasserstraßen					0
Wasser- und Abwasserinfrastruktur	51	0	0	0	51
Wasserinfrastruktur	12				12
Abwasserinfrastruktur	39				39
Energieinfrastruktur	28	6	0	72	105
Ergienetze	23	0			23
Energieerzeugung	5	6		72	82
Summe	94	6	99	81	279

Quelle: Eigene Berechnung

Der Materialbedarf für Kunststoff und sonstige Materialien aus der Instandhaltung (Tab. 165) ist höher als für den Neubau (Tab. 162). Die Differenz erklärt sich aus dem Bedarf von fast 100.000 Tonnen Holz in der Schieneninfrastruktur.

Um die Größenordnungen der jährlichen Materialbedarfe besser einschätzen zu können, sind in Tab. 165 für Stahl, Kupfer und Aluminium sowie für mineralische Rohstoffe die jährlichen Produktionsmengen (mineralische Rohstoffe) bzw. Gesamtverbräuche (Metalle) den Anteilen des Verbrauchs der drei Infrastruktursysteme an diesen Gesamtmengen gegenübergestellt worden.

Für die Gegenüberstellung wurde als Annahme getroffen, dass die Produktionsmengen der mineralische Rohstoffe zu je 50 % in den Tief- und Hochbau gehen und umfassen damit 50 % der Gesamtproduktion der Branche Kies/Sand und Naturstein im Jahr 2008 (MIRO 2009). Die Zahlen zum Gesamtverbrauch an Metallen stammen von der BGR (2007) und beziehen sich auf das Jahr 2006.

Tab. 166: Anteil des jährlichen Materialbedarfs der drei Infrastruktursysteme am Gesamtverbrauch bzw –produktion an ausgewählten Rohstoffen

	Eisen und Stahl	Kupfer	Aluminium	Mineralische Rohstoffe
	in 1.000 t	in 1.000 t	in 1.000 t	in 1.000 t
Gesamtproduktion bzw. Gesamtverbrauch	38.400	1.398	3.384	478.000
jährlicher Materialbedarf Infrastruktursysteme	1.519	95	69	183.647
Anteil in %	4,0 %	6,8 %	2,0 %	38,4 %

Quelle: Mineralische Rohstoffe: (MIRO 2009), Metallische Rohstoffe: BGR (2007).

Der jährliche Materialbedarf der drei Infrastruktursysteme an mineralischen Rohstoffen umfasst nur die Kategorien „Sand/Kies/Splitt“ und „Schotter“, da die restlichen mineralischen Rohstoffe verarbeitete Güter darstellen. Während der Anteil der drei Infrastruktursysteme am jährlichen Verbrauch von metallischen Rohstoffen in Deutschland im 1-promille Bereich liegt, ist der Anteil bei mineralischen Rohstoffen sehr hoch. Allerdings muss der Anteil an mineralischen Rohstoffen, die als Sekundärmaterial im Straßenbau zum Einsatz kommen, realistischerweise abgerechnet werden. Der genaue Umfang der RC-Baustoffe am jährlichen Materialbedarf mineralischer Rohstoffe im Straßenbau ist aber nicht bekannt.

Handlungsempfehlungen

Ein zunehmendes Materiallager in Infrastrukturen hat generell wachsende stoffliche und finanzielle Aufwendungen für die Instandhaltung und Erneuerung zur Folge. Deshalb sollte ein weiterer Aus- und Neubau grundsätzlich hinterfragt werden. Eine Begrenzung des Umfangs der Infrastruktursysteme ist eine notwendige Voraussetzung, sowohl stetig wachsende Unterhaltungskosten in den Griff zu bekommen, als auch zunehmenden Verbrauch natürlicher Ressourcen zu begrenzen.

Im Straßenbau könnte eine Überprüfung der Baunormen in Zusammenarbeit mit Straßenbauingenieuren und anderen Experten (z.B. Straßensicherheit) enorme Einsparpotentiale an mineralischen Rohstoffen ergeben (z.B. wäre eine Reduzierung der Straßenbreite bei Neubauprojekten und Sanierungen denkbar). Generell sollten Ressourcenaspekte in Investitionsentscheidungen von Infrastrukturen integriert werden und möglichst ressourcenschonende Technologien eingesetzt werden.

Soweit technisch möglich und ökotoxikologisch unbedenklich sollte für notwendige Instandhaltungs- und Ausbauarbeiten Recyclingmaterial verwendet werden. Auch bei der Sanierung von Infrastrukturen am Ende ihrer Lebensdauer (z.B. Brücken und Tunnel) sollten Verfahren mit einer möglichst geringen Ressourcenintensität eingesetzt

werden. Für den Rückbau von Infrastrukturen ist – soweit ökotoxikologisch und strahlungstechnisch unbedenklich – ein größtmöglicher Anteil an Recycling anzustreben.

Für leitungsgebundene Infrastrukturen empfiehlt sich ein proaktives Flächenmanagement unter Nutzung der Bebauungsreserven im Bestand (Brachflächen, Baulücken, leer stehende und unterausgelastete Flächen), um den weiteren Ausbau der Leitungslängen zu vermeiden oder zu verringern. Bei Stadtumbauprozessen sollte der Erhalt oder eine Erhöhung der baulichen Dichte angestrebt werden, da die Effizienz von technischen Infrastrukturen zumindest im Wasser- und Abwasserbereich direkt davon abhängig ist. Daraus folgt, dass eine sinnvolle Rückbaustrategie von den Netzen her einem dispersen Rückbau vorzuziehen ist.

Aufbauend auf den Erfahrungen im Projekt konzentriert sich der weitere Forschungsbedarf auf die Verbesserung der Datenbasis. Ein Teil der Hochrechnungen beruht auf Schätzungen, andere Infrastrukturbereiche mussten gänzlich unberücksichtigt bleiben, da entsprechende Daten nicht vorhanden oder öffentlich nicht zugänglich sind. Die Aufzeichnung von Lage und Typ (inkl. Materialgehalt) erdverlegter Leitungen in kommunalen Katastern sowie eine material- und ortsspezifische Inventarisierung und regelmäßige Fortschreibung des Materialbestands von Unternehmen der Verkehrs-, Wasser- und Energiewirtschaft würde in Zukunft eine genauere Abschätzung der stofflichen Bestände und Flüsse erlauben (insbesondere im Hinblick auf ihre spätere Verwertbarkeit). Desgleichen wäre anzustreben, dass die Netzagentur berechtigt ist, in Abstimmung mit den Netzbetreibern, die vorhandenen Daten anonymisiert zur Verfügung zu stellen und so für wissenschaftliche und statistische Zwecke nutzbar zu machen. Insbesondere die jährlichen Materialflüsse für die Erneuerung und Instandhaltung von Infrastrukturen bedürfen einer genaueren Quantifizierung. Sinnvoll wäre daher bspw. die Zusammenarbeit mit Versorgungsunternehmen, um die Daten für ihr spezifisches Versorgungsgebiet (ländlich, städtisch) genauer zu erfassen und die in dieser Studie getroffenen Annahmen empirisch zu überprüfen.

Für eine mögliche Reduzierung des Instandhaltungsaufwandes wäre mittels Ökobilanzierung/Materialintensitätsanalyse zu überprüfen, inwieweit alternative Konstruktionsweisen (z.B. Betondeckschichten statt Asphaltdeckschicht im Straßenbau) den Instandhaltungsbedarf reduzieren können und lebenszyklusweit besser abschneiden.

Um die künftig zu erwartenden Mengen für Neubau und Instandhaltung einerseits und Bauabfälle und Bauabbruch andererseits prognostizieren zu können, ist eine dynamische Modellierung der Materialflüsse erforderlich. Dazu wären weitere Analysen zur Altersstruktur der deutschen Infrastruktursysteme notwendig. Auch sollte mit hinreichender Flächendeckung untersucht werden, inwieweit Infrastrukturen bereits zurückgebaut werden, inwieweit Altsysteme aus dem Erdreich entfernt werden und welche Veränderungspotenziale hier zu erwarten sind.

Auf der Grundlage des vorliegenden Inventars der Materiallager in den wesentlichen Infrastruktursystemen sollte eine weitere Entwicklung von Informations- und Managementsystemen für ein potentiell „Urban Mining“ erfolgen, um so einen optimierten Einsatz von Sekundärmaterial aus und im Hoch- und Tiefbau zu ermöglichen.

8 Literatur

Verkehrsnetze

- Adler, W. (2004): Berichtsmodule Verkehr und Umwelt: Band 14 der Schriftenreihe Beiträge zu den Umweltökonomischen Gesamtrechnungen, Kurzfassung. Wiesbaden: Statistisches Bundesamt.
- Arbeitsgemeinschaft Kreislaufwirtschaftsträger Bau (ARGE KWTB) (2007): 5. Monitoring-Bericht Bauabfälle (Erhebung 2004). http://www.arge-kwtb.de/Downloads/Monitoring-Bericht-KWTB_5.pdf (27.01.2011)
- Bahn TV (2008): <http://www.bahntv-online.de/btvo/site/index.php?s=3800&ids=141640>; (20.05.08).
- Buchert, M. / Fritsche, U. R. / Jenseit, W. / Rausch, L. / Deilmann, C. / Schiller, G. / Siedentop, S. / Lipkow, A. (2004): Nachhaltiges Bauen und Wohnen in Deutschland: Stoffflussbezogene Bausteine für ein nationales Konzept der nachhaltigen Entwicklung – Verknüpfung des Bereiches Bauen und Wohnen mit dem komplementären Bereich „öffentliche Infrastruktur“. UBA-FB 000543. Berlin: Umweltbundesamt.
- Bundesanstalt für Straßenwesen (2009): Sicherheit geht vor – Straßentunnel in Deutschland. Herausgeber BMVBS und BAST.
- Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) (2009a): Verkehrsinvestitionsbericht 2008. Bundesdrucksache 16/11850.
- Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) (2009b): http://www.bmvbs.de/DE/VerkehrUndMobilitaet/Verkehrstraeger/Strasse/SicherheitVonBruecken/sicherheit-von-bruecken_node.html (27.01.2011).
- Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) (2008a): Längenstatistik der Straßen des überörtlichen Verkehrs. http://www.lbm.rlp.de/Dokumente/pdf/DOKU_700_00048.pdf
- Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) (2008b): Verkehr in Zahlen 2008/2009. Hamburg: Deutscher Verkehrs- Verlag GmbH.
- Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) (2008c): Wasserstraßen als Verkehrswege. <http://www.bmvbs.de/Verkehr/Wasser-,1466.912502/Wasserstrassen-als-Verkehrsweg.htm>
- Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) (2008d): Straßenbaubericht 2008; Bonn: BMVBS.
- Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) (2008e): Wasserstraßen als Verkehrswege; <http://www.bmvbs.de/Verkehr/-,1466/Wasser.htm> (07.07.2008).
- Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) (2008f): Übersichtskarte Bundeswasserstraßen. <http://www.bmvbs.de/cae/servlet/contentblob/35212/publicationFile/10771/uebersichtskarte-bundeswasserstrassen.pdf>
- Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Stadtentwicklung (BMVBS) (2007): Bundeswasserstraßen. Investitionen 2000; http://www.bmvbs.bund.de/SharedDocs/DE/Bilder/edit2_238.html?nn=36138

- Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) (2006): Bericht über die Qualität, Dauerhaftigkeit und Sicherheit von Spannbetonbrücken; Bonn: BMVBS.
- Bundesministerium für Verkehr, Bau und Wohnungswesen BMV (2005): Verkehr in Zahlen 2005/2006. Hamburg: Deutscher Verkehrs-Verlag GmbH.
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) (2006): Wasserwirtschaft in Deutschland; Teil 1: Grundlagen; Berlin.
- Corbat Holding SA (2008): Geschichte und Entwicklung der Holzschwelle; <http://www.corbat-holding.ch/documents/showFile.asp?ID=1420> (20.05.08).
- DB Netz AG (2007): Geschäftsbericht 2007; Berlin.
- Der Elsner – Handbuch für Straßen- und Verkehrswesen (vers. Jahrgänge). Otto Elsner.
- Els, W. (2009): Neubau der Kaiserschleuse in Bremerhaven. Vortrag auf dem 15. Darmstädter Geotechnik-Kolloquium an der TU Darmstadt, 13.3.2008. In BauPortal 6/2009.
- Erdmann, L. / Handke, V. / Klinski, S. / Behrendt, S. / Scharp, M. (2004): Nachhaltige Bestandsbewirtschaftung nicht erneuerbarer knapper Ressourcen. Handlungsoptionen und Steuerungsinstrumente am Beispiel von Kupfer und Blei. Werkstattbericht Nr. 68. Berlin: IZT – Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung.
- Fendrich, L. (2007) (Hrsg.): Handbuch Eisenbahninfrastruktur; Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.
- Fiedler, J. (2005): Bahnwesen; 5. Auflage; Werner-Verlag, 2005.
- Fockenberg, K. / Blasch, G. / Sinnhuber, V. (2005): Bau der Schleuse Uelzen II am Elbe-Seiten-Kanal. In: Tiefbau 1/2005, 4-12
- Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe „Mineralstoffe im Straßenbau“ (2004): Technische Lieferbedingungen für Baustoffe und Böden zur Herstellung von Schichten ohne Bindemittel im Straßenbau. Ausgabe 2004. FGSV 697. Köln: FGSV Verlag.
- Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe „Sonderaufgaben“ (2002): Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Tragschichten im Straßenbau. Ausgabe 1995/Fassung 2002. FGSV 999. Köln: FGSV Verlag.
- Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe „Asphaltstraßen“ (2001): Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Fahrbahndecken aus Asphalt. Ausgabe 2001. FGSV 799. Köln: FGSV Verlag.
- Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe „Fahrzeug und Fahrbahn“ (2001): Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaues von Verkehrsflächen; Ausgabe 2001; FGSV 499; Köln: FGSV Verlag.
- Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe „Straßenentwurf“ (1996): Richtlinien für die Anlage von Straßen – Teil: Querschnitte. (RAS-Q) Ausgabe 1996. FGSV 295. Köln: FGSV Verlag.
- Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe „Mineralstoffe im Straßenbau“ (1994): TL Min-StB 2000; Technische Lieferbedingungen für Mineralstoffe im Straßenbau; Köln: FGSV-Verlag.

- Frischknecht, R. / Bollens, U. / Bosshart, S. / Ciot, M. / Ciseri, L. / Doka, G. / Hischer, R. / Martin, A. / Dones, R. / Ganter, U. (1996): Ökoinventare von Energiesystemen: Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Energiesystemen und den Einbezug von Energiesystemen in Ökobilanzen für die Schweiz.
- Köser, H. / Herbst, G. / Konitzer, E. / Rozycki, C. v. (2002): Ökobilanzierung von Schienenverkehrssystemen am Beispiel des ICE-Verkehrs. Phase 1, Teil 1 (Datenerhebung). Abschlussbericht der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg im Auftrag der Deutschen Bahn AG. Halle: 2002.
- Leuenberger, C. / Spittel, U. (2001): Luftreinhaltung bei Baustellentransporten.
- Lünser, H. (1999) Ökobilanzen im Brückenbau. Eine Umweltbezogene, ganzheitliche Bewertung. (Basel, Bosten, Berlin: Birkhäuser).
- Maibach, M. / Peter, D. / Seiler, B. (1999): Ökoinventar Transport: Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Transportsystemen und den Einbezug von Transportsystemen in Ökobilanzen. Technischer Schlussbericht. INFRAS, Zürich.
- Manstein, C. /Stiller, H. (2000): Anwendung der Materialintensitätsanalyse nach dem MIPS-Konzept auf österreichische Verkehrsträgersysteme. Studie des Vereins Faktor4+ im Auftrag des österreichischen Ministeriums für Wissenschaft und Verkehr, Klagenfurt.
- Neubauamt Hannover (2010a): Neubau der Schleuse Bolzum. http://www.nba-hannover.wsv.de/baumassnahmen/aktuelle_baumassnahmen/neubau_schleuse_minden/index.html
- Neubauamt Hannover (2010b): Neubau der Schleuse Dörverden. http://www.nba-hannover.wsv.de/baumassnahmen/aktuelle_baumassnahmen/neubau_schleuse_doerverden/index.html
- Neubauamt Hannover (2010c): Neubau der Schleuse Minden. http://www.nba-hannover.wsv.de/baumassnahmen/aktuelle_baumassnahmen/neubau_schleuse_minden/index.html
- Pogalens, D. / Lenz, E.-U. (2008): Sicherung und Ausbau des Seitenkanals Ladenburg am Neckar. In: Tiefbau 9/2008, 518-523.
- Reidenbach, M. / Bracher, T. / Grabow, B. / Schneider, S. / Seidel-Schulze, A. (2008): Investitionsrückstand und Investitionsbedarf der Kommunen. Edition Difü. Berlin.
- Rübensam, J. / Hellmann L. / Staroste, D. / Stoltz, J. (2005): Bericht zum Forschungs- und Entwicklungsvorhaben FE 09.121/2000/MGB des Bundesministerium für Verkehr Bau und Wohnungswesen: Untersuchung zur Wirtschaftlichkeit und Bautechnischen Bewährung von Fahrbahnbefestigungen aus Asphalt auf bestehenden Bundesautobahnen. Heft 914, Forschung Straßenbau- und Straßenverkehrstechnik,. Bremerhaven: Wirtschaftsverlag NW Verlag für neue Wissenschaft GmbH.
- Saathoff, J. / Hönig, C. / Klingebiel, B. / Hempelt, L. / Asam, P. / Backhaus, A. / Stroyer, U. (2009): Neubau der Schleuse Süfeld Süd - Verkehrsfreigabe. In: Tiefbau 2/2009, 66-72.
- Schmied, M. / Mottschall, M. (2010): Treibhausgasemissionen durch die Schieneninfrastruktur und Schienenfahrzeuge in Deutschland. Endbericht des UBA-Projektes FKZ 36301244, unveröffentlicht.

- Schmidt-Bleek, F. / Bringezu, S. / Hinterberger, F. / Liedtke, C. / Spangenberg, J. / Stiller, H. / Welfens, M. J. (1998): MAIA - Handbuch der Materialintensitätsanalyse nach dem MIPS-Konzept. Birkhäuser Verlag, Berlin, Basel, Boston, 1998.
- Schneider, S. (2008): Der kommunale Investitionsbedarf und seine Finanzierungsmöglichkeiten. In: DfK – Deutsche Zeitschrift für Kommunalwissenschaft. 47.Jg, 2008/II, S. 55-76.
- Spielmann, M. / Bauer, C. / Dones, R. / Tuchschnid, M. (2007): Transport Services. Ecoinvent report No. 14. Villigen.
- Statistisches Bundesamt (Destatis) (2010): Statistisches Jahrbuch 2010. Wiesbaden.
- Statistisches Bundesamt (Destatis) (2008a): Statistisches Jahrbuch 2008. Wiesbaden.
- Statistisches Bundesamt (Destatis) (2008b): Eisenbahnverkehr. Betriebsdaten des Schienenverkehrs. Wiesbaden.
- Statistisches Bundesamt (Destatis) (2006): Verkehr in Deutschland 2006. Wiesbaden.
- Statistisches Bundesamt (Destatis) (2005a): Berichtsmodul Verkehr und Umwelt – Band 14 der Schriftenreihe „Beiträge zu den Umweltökonomischen Gesamtrechnungen“; Wiesbaden.
- Statistisches Bundesamt (Destatis) (2005b): Land- und Forstwirtschaft, Fischerei: Bodenfläche nach Art der tatsächlichen Nutzung. Fachserie 3/ Reihe 5.1, Wiesbaden.
- Stiller, H. (1995): Materialintensitätsanalysen von Transportleistungen (2). Binnenschifffahrt. Wuppertal Papers 41. Wuppertal: Wuppertal Institut.
- Stuttgarter Zeitung online vom 15.05.2008: Neckar-Schleusen werden ausgebaut.
- Tölle, L. o.J.: Wasserstraßenkreuz Magdeburg. Erfahrungen und Erkenntnisse beim Bau und nach der Inbetriebnahme.
- Ulbricht, M. (2006): Stoffströme im Tiefbau. Quantifizierung des Ressourcenverbrauchs der deutschen Straßeninfrastruktur. Studienarbeit in der Abteilung Sicherheitstechnik der Bergischen Universität Wuppertal, durchgeführt am Wuppertal Institut. unveröffentlicht.
- UIC (2010): Barron, T. / Martinetti, G. (Systra Conseil): High Speed Railway contribution to sustainable mobility. Gutachten im Auftrag der Internationalen Union of Railways (UIC). Zürich: 2010.
- Vihermaa, L. / Lettenmeier, M. / Saari, A. (2006): Natural resource consumption in rail transport: A note analysing of two Finnish railway line; in: *Transportation Research Part D*, Vol.11 (2006), No. 3, S. 227-232.
- Von Rozycki, C. / Köser, H. / Schwarz H. (2003): Ecology Profile of the German High-speed Rail Passenger Transport System ICE. In: *International Journal of Life Cycle Assessment*, 8(2), S. 83-91.
- Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes WSV (2007): Zweite Moselschleuse. http://www.wsv.de/aktuelles/projekte/zweite_moselschleuse/index.html
- Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes WSV (2008): Bauwerke und Anlagen an Bundeswasserstraßen; http://www.wsv.de/wasserstrassen/bauwerke_und_anlagen/index.html (07.07.2008)
- Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes WSV (2009): Gliederung Bundeswasserstraßen; http://www.wsv.de/wasserstrassen/gliederung_bundeswasserstrassen/index.html (15.03.2009)

- Weisner, A. (2003): Betonanforderungen und Betontechnologie beim Neubau der Doppelschleuse Hohenwarthe am Wasserstraßenkreuz Magdeburg. Beton-Informationen 1.2003.
- Werner, F. (2008): Ökologische Bilanzierung von Eisenbahnschwellen: Vergleich von Schwellen aus Buchenholz, Eichenholz, Beton und Stahl. Eine Studie von Umwelt & Entwicklung im Auftrag der Studiengesellschaft Holzschwellenoberbau e.V. Zürich: 2008.
- Wittmer, D. (2006): Kupfer im regionalen Ressourcenhaushalt. Ein methodischer Beitrag zur Exploration urbaner Lagerstätten. Dissertation an der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich.
- Wuppertal Institut (2003): MIT-Wertetabelle: Materialintensität von Materialien und Energieträgern im Überblick. http://www.wupperinst.org/uploads/tx_wibeitrag/MIT_v2.pdf (27.01.2011).
- ZTV T-StB 95: Die „Zusätzlichen Technischen Vertragsbedingungen und Richtlinien für Tragschichten im Straßenbau“; Ausgabe 1995/Fassung 2002, behandelt Tragschichten ohne Bindemittel, Tragschichten mit hydraulischen Bindemitteln und Asphalttragschichten.
- ZTV P-StB 2000: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Pflasterdecken und Plattenbelägen

Wasserver- und Entsorgung

- Althaus, H.-J. / Chudacoff, M. / Hischier, R. / Jungbluth, N. / Osses, M. / Primas, A. (2007): Life Cycle Inventories of Chemicals. Ecoinvent Report No. 8, v 2.0 EMPA Dübendorf, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, CH, from www.ecoinvent.org.
- ATT / BDEW / DBVW / DVGW / DWA / VKU (Arbeitsgemeinschaft Trinkwassertalsperren / Bundesverband der deutschen Gas- und Wasserwirtschaft / Deutscher Bund der verbandlichen Wasserwirtschaft / Deutsche Vereinigung des Gas- und Wasserfaches / Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall / Verband kommunaler Unternehmen) (2008): Branchenbild der deutschen Wasserwirtschaft 2008; Bonn: Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH.
- Baccini, P. / Brunner, P. H. (1991): Metabolism of the Anthroposphere; Berlin et al.: Springer.
- Baccini, P. / Kytzia, S. / Oswald, F. (2001): Restructuring Urban Systems. In: Moavenzadeh, F. / Hanaki, K. / Baccini, P. (Hg.): Future Cities: Dynamics and Sustainability; Boston: MIT Press.
- Bauer, C. / Bolliger, R. / Tuchschnid, M. / Faist-Emmenegger, M. (2007): Wasserkraft. Ecoinvent report No.6-VIII. Villigen.
- Bayer, E. / Bose, T. / Kampen, R. / Klose, N. (2004): Betonbauwerke in Abwasseranlagen. Planung, Bau, Instandhaltung. 4. Üb. Aufl. Düsseldorf: Verlag Bau + Technik 2004.
- Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU) (2009a): Staatliche Wasserspeicher in Bayern. http://www.lfu.bayern.de/wasser/fachinformationen/staatliche_wasserspeicher/index.htm
- Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU) (2009b): Wasserspeicher. <http://www.lfu.bayern.de/wasser/fachinformationen/trinkwasserspeicherung/wasserspeicher/index.htm>
- Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU) (2010): Quellschüttung. http://www.lfu.bayern.de/wasser/fachinformationen/grundwasser_quellschuetzung/index.htm

- Berger, C. / Lohaus, J. (2005): Zustand der Kanalisation in Deutschland - Ergebnisse der DWA-Umfrage 2004, *KA Abwasser Abfall*, Vol. 52, Nr. 5, S. 528–539.
- Blum, A. / Stutzriemer, S. (2007): Recycled Construction Minerals for Urban Infrastructure in Germany; Non-technical Issues; *Minerals & Energy* Vol. 22, Nr. 3-4, S. 148-158.
- Boermans-Schwarz, T. (1998): Materialintensitäts-Analyse von Anlagen zur Nutzung von Regenwasser im Haushalt im Kontext einer nachhaltigen Wasserwirtschaft; Diplomarbeit am Fachbereich Sicherheitstechnik der Bergischen Universität Gesamthochschule Wuppertal.
- Bringezu, S. (1998): Bewertung zentraler und dezentraler Abwasserbehandlungssysteme mit den Mitteln der Stoffflussanalyse; in: Wilderer, P. A. / Arnold, E. / Schreff, D. (Hg.): Dezentrale Abwasserbehandlung für ländliche und urbane Gebiete (Abwassertechnisches Seminar).
- Bringezu, S. (2000): Die Analyse der Materialintensität von Infrastrukturen; Wuppertal Papers Nr. 102, Wuppertal.
- Buchert, M. / Fritsche, U. R. / Jenseit, W. / Rausch, L. / Deilmann, C. / Schiller, G. / Siedentop, S. / Lipkow, A. (2004): Nachhaltiges Bauen und Wohnen, Stoffflussbezogene Bausteine für ein nationales Konzept der nachhaltigen Entwicklung - Verknüpfung des Bereiches Bauen und Wohnen mit dem komplementären Bereich "Öffentliche Infrastruktur", Herausgegeben von Umweltbundesamt (UBA), (UBA Texte, 01/04).
- Bundesverband Gas und Wasser BGW (1993): 105. BGW-Wasserstatistik.
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) (Hg.) (2006): Wasserwirtschaft in Deutschland, Teil 1: Grundlagen; Berlin.
- Bundesverband Erneuerbare Energien BEE (2009): Stromversorgung 2020. Wege in eine moderne Energiewirtschaft. Berlin.
- Dachroth, W. (2002): Handbuch der Baugeologie und Geotechnik. 3. erw. + üb. Aufl.. Berlin et al. : Springer.
- Dennison, F. J. / Azapagic, A. / Clift, R. / Colbourne, J. S. (1999): Life Cycle Assessment: Comparing Strategic Options for the Mains Infrastructure – Part I, *Water Science and Technology*, Vol. 39, Nr. 10-11, S. 315 – 319.
- Deutsche Vereinigung des Gas- und Wasserfaches DVGW (2002): DVGW-Schadenstatistik Wasser. Auswertungen für die Erhebungsjahre 1997-1999. Wasser-Information Nr. 67. Bonn: DVGW.
- Deutsche Vereinigung des Gas- und Wasserfaches e.V. DVGW (2004): Technische Regeln Wasserverteilungsanlagen (TRWV) Teil 1: Planung. Technische Regel Arbeitsblatt W 400-1. Bonn, Oktober 2004.
- Deutsche Vereinigung des Gas- und Wasserfaches DVGW (2005): Wasserspeicherung - Planung, Bau, Betrieb und Instandhaltung von Wasserbehältern in der Trinkwasserversorgung. Technische Regel Arbeitsblatt W 300. Bonn, Juni 2005.
- Deutsches TalsperrenKomitee (DTK) (2001): Dams in Germany; Essen: Verlag Glückauf GmbH.
- Deutsches TalsperrenKomitee (DTK) (2003): Journalistenhandbuch zum Wasserbau. Erläuterungen und Ansprechpartner zu den Themen Talsperren, Wasserkraft, Hochwasser u.ä.; <http://www.talsperrenkomitee.de/Journalistenhandbuch.pdf> (07.07.2008).

- Doka, G. (2007): Wastewater Treatment. Life Cycle Inventories of Waste Treatment Services. Ecoinvent report No. 13, Part IV. Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf.
- Frank, T. / Habedank, C. / Lindenau, V. (2006): Rohrwerkstoffe in der öffentlichen Abwasserentsorgung. Verbreitung, Erfahrung und mögliche Kostensenkungspotenziale; UNITRACC-Artikel vom 20.10.2006; <http://www.unitracc.de> (07.07.2008).
- Gerdes, A. / Wittmann, F.H. (2003): Langzeitverhalten von zementgebundenen Beschichtungen in Trinkwasserbehältern. In: 6th International Conference on Materials Science and Restoration, 1-14.
- Gillar, M. (2008): Schachtsanierung. Verfahren und Qualitätssicherung; Vortrag am Tag der Forschung des IKT Institut für Unterirdische Infrastruktur am 03.06.2008 in Gelsenkirchen.
- Hahmann, S. / Becher, M. (2008): Bereitstellung von Löschwasser. In: *energie wasser praxis* 11/2008, 42-44.
- Harting, K. (2006): Abwasserdruckleitungen. Möglichkeiten und Verfahren zur Reinigung. Kurzbericht. Gelsenkirchen: Institut für Unterirdische Infrastruktur IKT.
- Hillenbrand, T. (2009): Analyse und Bewertung neuer urbaner Wasserinfrastruktursysteme. Dissertation, Karlsruhe.
- Hosang, W. / Bischof, W. (1998): Abwassertechnik; Leipzig: Teubner Verlag. Hillenbrand 2009.
- IKT Institut für Unterirdische Infrastruktur (2004): IKT-eNewsletter-Reihe "Struktur der Abwasserwirtschaft in Nordrhein-Westfalen".
- IKT Institut für Unterirdische Infrastruktur (2006): IKT-Marktumfrage: Kanalinvestitionen steigen 2007 um 10%; UNITRACC-Artikel vom 08.12.2006; <http://www.unitracc.de> (07.07.2008).
- Imhoff, K. / Imhoff, K. R. (2007): Taschenbuch der Stadtentwässerung, 30. Auflage; München: Oldenbourg Industrieverlag.
- International Commission on Large Dams (ICOLD) (2003): World Register of Dams.
- Jekel, M. / Remy, C. / Ruhland, A. (2006): Ecological Assessment of Alternative Sanitation Concepts with Life Cycle Assessment. Final Report for Subtask 5 of the Demonstration Project "Sanitation Concepts for Separate Treatment of Urine, Faeces and Greywater" (SCST).
- Klinger, J. (2007): Beschreibung der Wasser- und Stoffflüsse in einem urbanen Raum unter besonderer Berücksichtigung von Kanalleckagen. Dissertation an der Fakultät für Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften der Universität Karlsruhe.
- Kluge, T. / Scheele, U. (2003): Transformationsprozesse in netzgebundenen Infrastruktursektoren. Neue Problemlagen und Regulationserfordernisse; Berlin: Deutsches Institut für Urbanistik (netWORKS Papers, 1).
- Koziol, M. / Veit, A. / Walther, J. (2006): Stehen wir vor einem Systemwechsel in der Wasserver- und Abwasserentsorgung? Sektorale Randbedingungen und Optionen im stadttechnischen Transformationsprozess. netWORKS-Paper Nr. 22.
- Kunststoffrohrverband e.V. KRV 2002: Kunststoffrohrsysteme für die Trinkwasserversorgung. Bonn.
- Landestalsperrenverwaltung des Freistaates Sachsen (LTV) (2007): Talsperren in Sachsen; Pirna: LTV Sachsen.

- Landestalsperrenverwaltung des Freistaates Sachsen LTV (2009): Ausgewählte Bauvorhaben. <http://www.ltv.smul.sachsen.de/bauvorhaben/>
- Landestalsperrenverwaltung des Freistaates Sachsen LTV (2010): Neubau des Hochwasserrückhaltebeckens Neuwürschnitz. http://www.smul.sachsen.de/ltv/download/LTV_FL_Buergerinfo_Neuwuerschnitz_27.4.pdf
- Landeswasserverbandstag Brandenburg e.V. (LWT) (2005): Lagebericht 2005. Trinkwasserversorgung / Abwasserentsorgung im Dienste der Kunden; Berlin.
- Lassaux, S. / Renzoni, R. / Germain, A. (2007): Life Cycle Assessment of Water from the Pumping Station to the Wastewater Treatment Plant. In: *International Journal of Life Cycle Assessment* 12 (2), 118-126.
- Markus, D. / Manstein, C. / Liedtke, C. (1996): Materialintensitätsanalysen von Grund-, Werk- und Baustoffen (4). Der Werkstoff PVC. Materialintensität eines Trinkwasserrohrs; Wuppertal Paper 63, Wuppertal: Wuppertal Institut.
- Merkel, G. (2004): Trinkwasserbehälter. Planung, Bau, Betrieb, Schutz und Instandsetzung; München: Oldenbourg Industrieverlag.
- Merkel, G. (2008): Technik der Wasserversorgung. Praxisgrundlagen für Führungskräfte; München: Oldenbourg Industrieverlag.
- Mutschmann J. / Stimmelmayer, F. (2007): Taschenbuch der Wasserversorgung; München: Oldenbourg Industrieverlag.
- Preußner, J. (2007): Neue strategische Entwicklungen zum Bau von Hochwasserspeichern. http://www.wwar.bayern.de/projekte_und_programme/doc/drachensee/symposium/ppreusser.pdf
- Puhl, R. (2007): Handbuch Schacht. Technik, Grundlagen, Marktübersicht; Herausgegeben vom IKT Institut für unterirdische Infrastruktur Gelsenkirchen.
- Reckerzügl, T. (1997): Vergleichende Materialintensitäts-Analyse zur Frage der zentralen oder dezentralen Abwasserbehandlung anhand unterschiedlicher Anlagenkonzepte; Diplomarbeit an der Universität-Gesamthochschule Paderborn, Abteilung Höxter, erstellt am Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie.
- Regierungspräsidium Freiburg (2008): Hochwasserrückhaltebecken Wolterdingen / Breg. Integriertes Donauprogramm. Freiburg 2008.
- Reidenbach, M. / Bracher, T. / Grabow, B. / Schneider, S. / Seidel-Schulze, A. (2008): Investitionsrückstand und Investitionsbedarf der Kommunen Ausmaß, Ursachen, Folgen, Strategien. Edition Difü. Berlin.
- Reineck, T. (2007): Berstlining-Verfahren in der Großstadt, mit Sicherheit kein Widerspruch. In: RSV-Sonderdruck: 25 Jahre Rohrleitungserneuerung mit Berstverfahren. Essen.
- Rißler, P. (1998): Talsperrenpraxis; München: Oldenbourg Industrieverlag.
- Roscher, H. (2000): Zustandsbewertung städtischer Wasserrohrleitungen zur Vorbereitung der Rehabilitation. In: *Rohrbau* 2000, Weimar 6./7.12.2000 Tagungsband 9, S. 5 – 14.
- Roscher, H. (2006): Talsperren und Fernwasserversorgungssysteme in Thüringen.
- Sachverständigenbüro Fischer (2009): Kanalbauwerke. www.sachverstaendigenbuero-fischer.de (07.03.2009).

- Schulze, D. (1998): Die Wasserspeicherung: Planung, Bau und Betrieb von Erdbehältern. Schriftenreihe Wasserversorgungs- und Abwassertechnik. Essen: Vulkan-Verlag.
- Siedentop, S. / Schiller, G. / Koziol, M. / Walther, J. / Gutsche, J.-M. (2006): Siedlungsentwicklung und Infrastrukturfolgekosten – Bilanzierung und Strategieentwicklung. Enderbericht.
- Statistisches Bundesamt (Destatis) (Hg.) (2009): Öffentliche Wasserversorgung und Abwasserbeseitigung 2007; Fachserie 19 Reihe 2.1.; Wiesbaden: Statistisches Bundesamt.
- Statistisches Bundesamt (Destatis) (Hg.) (1994): Öffentliche Wasserversorgung und Abwasserbeseitigung 1991. Fachserie 19 Reihe 2.1.; Wiesbaden: Statistisches Bundesamt.
- Stein, D. / Stein, R. (2004): Fachinformationssystem Instandhaltung von Kanalisationen; <http://www.unitracc.de> (07.07.2008).
- Stein, D. / Falk, C. (2004): Sanierung von Schächten; UNITRACC-Artikel vom 19.02.2004; <http://www.unitracc.de> (07.07.2008).
- Talsperrenbetrieb Sachsen-Anhalt (2010): Talsperrenbetrieb Sachsen-Anhalt.
- Thüringer Fernwasser (2010): Der Rückbau der Talsperre Krebsbach – Das erste Projekt seiner Art in Deutschland. www.thueringer-fernwasser.de
- Tietz, H.-P. (2006): Systeme der Ver- und Entsorgung; Wiesbaden: Teubner Verlag.
- Tillman, A.-M. / Svingby, M. / Lundström, H. (1998): Life Cycle Assessment of Municipal Waste water Systems. In: *International Journal of Life Cycle Analysis* 3 (3), 145-157.
- Venkatesh, G. / Hammervold, J. / Brattebo, H. (2009): Combined MFA-LCS for Analysis of Wastewater Pipeline Networks. Case Study of Oslo, Norway. In: *Journal of Industrial Ecology* 13 (4), 532-550.
- Wagner, V. (2007): Sanierung von Pumpwerken und Schächten; Präsentation auf der 16. Sprechertagung der ÖWAV-Kanal- und Kläranlagen-Nachbarschaften.
- Waniek, R. (2008): IKT-Marktumfrage 2007; UNITRACC-Artikel vom 16.01.2008; <http://www.unitracc.de> (07.07.2008).
- Westerhof, C. (2001): Einführung eines Ressourcenmanagementsystems bei den Stadtwerken Düsseldorf; Diplomarbeit an der Fachhochschule Braunschweig / Wolfenbüttel, Fachbereich Transport und Verkehrswesen.
- Wilderer, P. A. / Merkl, G. (Hg.) (2001): Wasserversorgung in der Zukunft unter besonderer Berücksichtigung der Wasserspeicherung. Berichte aus Wassergüte- und Abfallwirtschaft; TU München.
- Windesperger, A. / Steinlechner, S. / Schneider, F. (1999): Investigation on European Life Cycle Assessment Studies of Pipes made of Different Materials for Water Supply and Sewer Systems – A Critical Comparison; Final Report. St. Pölten, Österreich: Institut für Industrielle Ökologie.
- Zesch, H. (2009): Übersicht der Techniken und Erfahrungen in der Kanalsanierung. In: *3R International* 48 (10), 562-571.
- Zimmermann, P. / Doka, G. / Huber, F. / Labhardt, A. / Ménard, M. (1996): Ökoinventare von Entsorgungsprozessen. Grundlagen zur Integration der Entsorgung in Ökobilanzen; ESU-Reihe 1/96; Zürich: Institut für Energietechnik an der ETH Zürich.

Energieerzeugung und -verteilung

- Arbeitsgemeinschaft für Wärme und Heizkraftwirtschaft e.V. (AGFW) (2007): AGFW-Branchenreport 2007; Frankfurt/Main: AGFW.
- Arbeitsgemeinschaft für Wärme und Heizkraftwirtschaft e.V. (AGFW) (2005): Perspektiven der Fernwärme und der Kraft-Wärme-Kopplung. Ergebnisse und Schlussfolgerungen aus der AGFW-Studie „Pluralistische Wärmeversorgung.
- AXPO (2010): Umweltdeklaration Niederdruckwasserkraftwerk Wildegg-Brugg.
- Bauer, C. / Bolliger, R. / Tuchs Schmid, M. / Faist-Emmenegger, M. (2007): Wasserkraft. Ecoinvent report No.6-VIII. Villigen.
- Bauer, C. (2008): Life Cycle Assessment of Fossil and Biomass Power Generation Chains. An analysis carried out for ALSTOM Power Services. PSI Bericht Nr. 08-05. Villigen.
- Baumgartner, W. / Doka, G. (1998): Energiebilanzen von Kleinwasserkraftwerken. Bundesamt für Energiewirtschaft Bern.
- BDEW (2009): Energiemarkt Deutschland. Zahlen und Fakten zur Gas -, Strom- und Fernwärmeversorgung.
- BDEW (2008a): Presseinformation vom 19.2.2008. http://www.bdew.de/bdew.nsf/id/DE_PM_20080219_20_Kraftwerke_im_Bau?open&I=DE&ccm=250010010020
- BDEW (2008b): Investitionen der deutschen Stromversorger.
- Brakelmann, H. (2004): Netzverstärkungs-Trassen zur Übertragung von Windenergie: Freileitung oder Kabel?. Studie im Auftrag des Bundesverbandes Wind Energie e.V.
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) (2011): Erneuerbare Energien 2010. Daten des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland im Jahr 2010 auf der Grundlage der Angaben der Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat). Vorläufige Angaben, Stand 23. März 2011. http://www.erneuerbare-energien.de/files/bilder/allgemein/application/pdf/ee_in_zahlen_2010_bf.pdf
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) (2008): Kurzinfo Wasserkraft.
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) (2004): Erneuerbare Energien – Innovationen für die Zukunft. http://www.dlr.de/tt/Portaldata/41/Resources/dokumente/institut/system/publications/broschuere_ee_innov_zukunft.pdf
- Bundesnetzagentur (2009): Monitoringbericht 2008. Bonn.
- Bundesnetzagentur (2008): Monitoringbericht 2007. Bonn.
- Bundesnetzagentur (2006): Untersuchungsbericht über die Versorgungsstörungen im Netzgebiet des RWE im Münsterland vom 25.11.2005. Bonn.
- Bundesverband WindEnergie e.V. (BWE) (o.J.): Konstruktiver Aufbau. Das Fundament; <http://www.wind-energie.de/de/technik/konstruktiver-aufbau/fundament/> (27.01.2011).
- Bundesverband Windenergie (2010): <http://www.wind-energie.de/de/materialien/folien-sammlung/#1698> (Zugriff 15.01.2010).
- Burger, B. / Bauer, C. (2007): Windkraft. Ecoinvent report No. 6-XIII. Villigen.

- Besier, R. (2007): Veränderung der Fernwärmerohrnetze in Deutschland. Rohrnetzstatistik 2006 der AGFW; *EuroHeat&Power*, Vol. 36, Nr. 11, S. 32-35.
- Besier, R. (2006): Veränderung der Fernwärmerohrnetze in Deutschland. Rohrnetzstatistik 2005 der AGFW; *EuroHeat&Power*, Vol. 35, Nr. 9, S. 52-55.
- Briem, S. / Blesl, M. / Fahl, U. / Ohl, M. / Moerschner, J. / Eltrop, L. / Voß, A. (2004): Lebenszyklusanalysen ausgewählter zukünftiger Stromerzeugungstechniken. Stuttgart: Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, Universität Stuttgart, 2004.
- DBFZ (2010): Monitoring zur Wirkung des Erneuerbare-Energie-Gesetz (EEG) auf die Entwicklung der Stromerzeugung aus Biomasse.. Zwischenbericht März 2010.
- Deutsche Wind.Guard (2005): Potenzialanalyse „Repowering in Deutschland“ Enderbericht. Studie im Auftrag WAB Windenergieagentur Bremerhaven.
- DEWI (2009): Status der Windenergienutzung in Deutschland zum 31.12.2008. http://www.wind-energie.de/fileadmin/dokumente/statistiken/WE%20Deutschland/DEWI-Statistik_gesamt_2009.pdf (Zugriff 15.10.2010)
- Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena) (2005): Energiewirtschaftliche Planung für die Netzintegration von Windenergie in Deutschland an Land und Offshore bis zum Jahr 2020.
- Doka, G. (2007): Building material disposal. Ecoinvent report. No. 13-V. Villigen.
- Dones, R. (2007): Kernenergie. Ecoinvent report No. 6-VII. Villigen.
- Dones, R. / Bauer, C. / Röder, A. (2007): Kohle. Ecoinvent report No. 6-VI. Villigen.
- Drenckhan, A. / Eger, M. / Estermann, A. S. (2006): Entry-Exit-System – Aufgaben für das Gaswirtschaftsjahr 2006/2007. *Energie/Wasser-Praxis*, Vol. 57, Heft 12 (Jahresrevue). S. 60-63.
- Edelmann, W. / Schleiss, K. / Engeli, H. / Baier, U. (2001): Ökobilanz der Stromgewinnung aus landwirtschaftlichem Biogas. Schlussbericht im Auftrag des Amtes für Energie. Bern.
- Effenberger, M. / Bachmaier, H. / Kränsel, E. / Lehner, A. / Gronauer, A. (2009): Wissenschaftliche Begleitung der Pilotbetriebe zur Biogasproduktion in Bayern. Abschlussbericht.
- E.ON Ruhrgas AG (2007): Erdgaswirtschaft im Überblick. Markt, Leistung, Perspektive.
- E.ON (2006): Stade. Stilllegung und Rückbau eines Kernkraftwerks – vom Kernkraftwerk zur „Grünen Wiese“.
- Ernst, H. (2008): Vom Feigenblättchen und Spartenzweig zum Königsweg. Zukunft des Strom- und Wärmemarktes; *EuroHeat&Power*, Vol. 37, Nr. 4, S. 11-29.
- Etscheid, G. (2008): Es gärt; *DIE ZEIT*, Nr. 21, S. 30.
- Faist-Emmenegger, M. / Heck, T. / Jungbluth, N. / Tuchschnid, M. (2007): Erdgas. Ecoinvent report No. 6-V. Villigen.
- Frischknecht, R. / Tuchschnid, M. / Faist-Emmenegger, M. (2007): Strommix und Stromnetz. Ecoinvent report No. 6-XVI. Villigen.
- Frischknecht, R. / Hofstetter, P. / Knoepfel, I. / Ménard, M. (1994): Ökoinventare für Energiesysteme. Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Energiesystemen und den Einbezug von Energiesystemen in Ökobilanzen für die Schweiz; im Auftrag des Bundesamtes für Energiewirtschaft und des nationalen Energie-Forschungs-Fonds; ETH Zürich, Zürich.

- Fritsche, U. R. / Schmidt, K. (2008): Handbuch zu GEMIS 4.5. Globales Emissions-Modell Integrierter Systeme (GEMIS). Darmstadt.
- Forschungsstelle für Energiewirtschaft FfE (1996): Ganzheitliche energetische Bilanzierung der Energiebereitstellung (GaBiE). München.
- Fraunhofer Institut UMSICHT / bremer energie institut (2004): Fernwärme-Infrastruktur; Teil 4 des 3. Band „Zukunft der KWK und der Fernwärme, modellgestützte Hochrechnungen, vergleichende Betrachtungen, zukünftige Anforderungen“ des Projektes „Pluralistische Wärmeversorgung“.
- Geuder, M. (2004): Energetische Bewertung von Windkraftanlagen. Diplomarbeit an der Fachhochschule Würzburg-Schweinfurt.
- Gores, S. (2010): Markt für Blockheizkraftwerke. Absatz 2009 und aktuelle Entwicklung. <http://www.bkwk.de/aktuelles/presse/2010-12-13%20BHKW-Marktentwicklung.pdf>
- Hahn, B. (2003): Zuverlässigkeit, Wartung und Betriebskosten von Windkraftanlagen.
- Heck, T. (2007): Wärme-Kraft-Kopplung. Ecoinvent report No. 6-XIV. Villigen.
- Hennings, W. / Bauknecht, D. / Preuschoff, S. (2006): Ökobilanzen für den Sektor Strom und Gas. Studie im Rahmen des BMBF-Verbundprojektes „Integrierte Mikrosysteme der Versorgung“.
- Hirschberger, S. / Bauer, C. / Burgherr, P. / Biollaz, S. / Durisch, W. / Foskolos, K. / Hardegger, P. / Meier, A. / Schenler, W. / Schulz, T. / Stucki, S. / Vogel, F. (2005): Neue erneuerbare Energien und neue Nuklearanlagen: Potenziale und Kosten. PSI Bericht Nr. 05-04. Paul Scherrer Institut. Villigen.
- Hornbacher, D. / Mairitsch, K. (2007): Aufbereitung von Biogas zur Einspeisung in das Erdgasnetz; *EuroHeat&Power*, Vol. 36, Nr. 1-2, S. 42-46.
- Institut für Energetik und Umwelt / Stefan Klinski / DBI Gas- und Umwelttechnik / Fraunhofer Institut UMSICHT / Gaswärme-Institut (2006): Einspeisung von Biogas in das Erdgasnetz; Endbericht des Projektes "Evaluierung der Möglichkeiten zur Einspeisung von Biogas in das Erdgasnetz"; Herausgegeben von der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR); FNR: Gülzow.
- IER / DLR / LEE / FfE (2004): Lebenszyklusanalyse ausgewählter zukünftiger Stromerzeugungstechniken. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Arbeit.
- Jensch, W. (1988): Vergleich von Energiesystemen unterschiedlicher Zentralisierung. IfE-Schriftenreihe Heft 22. München.
- Jungbluth, N. / Faist-Emmenegger, M. / Dinkel, F. / Stettler, C. / Doka, G. / Chudacoff, M. / Dauriat, A. / Gansounou, E. / Spielmann, M. / Sutter, J. / Kljun, N. / Keller, M. / Schleiss, K. (2007): Life Cycle Inventories of Bioenergy. Ecoinvent report No. 17. Villigen.
- Kehrbaum, R. (1995): Perspektiven eines Recycling von Windkraftanlagen. In: DEWI Magazin Nr. 7, August 1995, S. 35-38.
- Manstein, C. (1996): Das Elektrizitätsmodul im MIPS-Konzept – Material-Analyse der bundesdeutschen Stromversorgung (öffentliches Netz) im Jahr 1991, Wuppertal Paper Nr. 51, Wuppertal: Wuppertal Institut.
- Manstein, C. (1995): Quantifizierung und Zurechnung anthropogener Stoffströme im Energiebereich. Diplomarbeit an der Bergischen Universität Wuppertal.

- Marheinecke, T. (2001): Lebenszyklusanalyse fossiler, nuklearer und regenerativer Stromerzeugungstechniken. Forschungsbericht Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung der Universität Stuttgart, Band 87.
- Martinez, E. / Sanz, F. / Pellegrini, S. / Jiménez, E. / Blanco, J. (2009): Life-cycle assessment of a 2-MW rated power wind turbine: CML method. In: *International Journal of Life Cycle Assessment* (14), pp: 52-63.
- Mayer-Spohn, O. / Wissel, A. / Voß, A. / Fahl, U. / Blesl, M. (2007): Lebenszyklusanalyse ausgewählter Stromerzeugungstechniken. Aktualisierte Fassung des Arbeitsberichtes.
- Nitsch, J. (2008): „Leitstudie 2008“. Weiterentwicklung der „Ausbaustrategie Erneuerbare Energien“ vor dem Hintergrund der aktuellen Klimaschutzziele Deutschlands und Europas. Studie im Auftrag des BMU.
- Nitsch, J. et al. DLR / ifeu / Wuppertal Institut (2004): Ökologisch optimierter Ausbau der Nutzung erneuerbarer Energien in Deutschland. Forschungsvorhaben für das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit.
- Olzem, B. (2010): Produktion, Aufbereitung und Einspeisung von Biogas, Aktueller Stand in Deutschland. In: Forum. New Power 4/2010, S. 4-6.
- Oswald, B. R. (2005): Vorlesung Elektrische Energieversorgung I – Skript Freileitung (Korrigierte Ausgabe 2005); Universität Hannover Institut für Energieversorgung und Hochspannungstechnik.
- Paul, H.U. (2007): Kabel oder Freileitung? Informationsveranstaltung zum Ausbau des Hoch- und Höchstspannungsnetz, 20.9.2007 Groß Dungen.
- Ramesohl, S. / Scholwin, F. / Hofmann, F. / Urban, W. / Burmeister, F. (2006): Analyse und Bewertung der Nutzung von Biogas, Teil 1: Potenziale, Kosten und Emissionen; *BWK - Das Energie Fachmagazin*, Vol. 58, Nr. 3. S. 45-49.
- Ravenmark, D. / Normark, B. 2005: Unsichtbar und umweltschonend. Unterirdische Energieübertragung mit HVDC Light. In: *ABB Technik* 4/2005.
- Salzer, C. 2008: Die Materialintensität der europäischen Elektrizitätserzeugung. Eine Bilanzierung nach dem MIPS-Konzept. Bachelorarbeit an der Bauhaus-Universität Weimar.
- Schmitz, K. (2008): Hauptbericht der Fernwärmeversorgung 2006; *EuroHeat&Power*, Vol. 36, Nr. 1-2, S.28-32.
- Seebach, A. / Böse, C. / Walter, S. (2007): Aufbereitung und Einspeisung von Biogas in das Erdgasnetz; *EuroHeat&Power*, Vol. 36, Nr. 9, S. 42-45.
- Soukup, O. (2008): Erstellung von Produktökobilanzen auf der Basis von Stoffstromnetzen für die Bereitstellung von Biogas zur Einspeisung in das Erdgasnetz. Diplomarbeit an der Leuphana-Universität Lüneburg.
- Steinbrich, K. (2005): Untersuchungen zum frequenzabhängigen Übertragungsverhalten von Energiekabeln. Dissertation am Fachbereich Ingenieurwissenschaften der Universität Duisburg-Essen.
- Tryfonidou, R. (2006): Energetische Analyse eines Offshore-Windparks unter Berücksichtigung der Netzintegration. Dissertation an der Fakultät für Maschinenbau der Ruhr-Universität Bochum.
- Umweltbundesamt Deutschland (2006): Datenbank der in Betrieb befindlichen Kraftwerke; Verband der Netzbetreiber (VDN) (2007): Daten und Fakten Stromnetze in Deutschland 2007.

- Vestas (2006): Life cycle assessment of electricity produced from onshore sited wind power plants based on Vestas V82-1.65 MW turbines.
- Voß, A. / Blesl, M. (2005): Wachstumspotenzial der Nah-/Fernwärme in Deutschland bis 2020; *EuroHeat&Power*, Vol. 34, Nr. 4, S. 18-30.
- Wagner H.J. (2004): Wie sauber sind die weißen Riesen? Ganzheitliche Energiebilanz von Windkraftanlagen. In: *maschinenbau* RUBIN 2004. S. 6-11.
- Winkens, H. P. (1994): Fernwärmespeicherung, -transport und -verteilung. IKARUS. Instrumente für Klimagas-Reduktionsstrategien. Teilprojekt 4 „Umwandlungssektor“. Forschungszentrum Jülich.
- Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie / Fraunhofer Institut UMSICHT / IFEU (2008): Nachhaltige Flächennutzung und nachwachsende Rohstoffe; Endbericht des F+E-Vorhaben „Optionen einer nachhaltigen Flächennutzung und Ressourcenschutzstrategien unter besonderer Berücksichtigung der nachhaltigen Versorgung mit nachwachsenden Rohstoffen“; UBA Vorhaben Z 6 – 91 054/82 Forschungskennzahl (FKZ) 205 93 153; (08.06.2008).
- Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie / Institut für Energetik und Umwelt / Fraunhofer Institut UMSICHT / Gaswärme-Institut (2005): Analyse und Bewertung der Nutzungsmöglichkeiten von Biomasse. Wuppertal: Wuppertal Institut.

Ohne thematische Zuordnung

- BGR (2007): Bundesrepublik Deutschland, Rohstoffsituation 2006, Hannover.
- MIRO (2009): Die Kies-/Sand- und Naturstein-Industrie im Zeitraum 2009/2010. http://www.bv-miro.org/d/Situation_Branche_Home_2009-2010.pdf (27.01.2011).
- Scharp, M. (2010): IuK-Infrastrukturen: Mobilfunk. Endbericht. UBA-Projekt Materialeffizienz und Ressourcenschonung, FKZ 370793300.

9 Anhang

Teilnehmerliste ExpertInnen-Workshop am 27. Januar 2010
in der Berlin-Brandenburgischen Akademie der Wissenschaften

Teilnehmer	Institution, E-Mail
Bringezu, Dr. Stefan	Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie FG 3 Stoffströme und Ressourcenmanagement
Brinkmann, Anna	Umweltbundesamt, I 3.1 Umwelt und Verkehr
Deilmann, Clemens	Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung
Fekkak, Miriam	Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie FG 3 Stoffströme und Ressourcenmanagement
Fritsche, Uwe R.	Öko-Institut e.V. Energie und Klimaschutz
Gerber, Dr. Ulf	TU Dresden Professur für Gestaltung von Bahnanlagen
Hennicke, Prof. Dr. Peter	Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie
Herkner, Thomas	BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V.
Hillenbrand, Dr. Thomas	Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung ISI Geschäftsfeld Wasserwirtschaft
Hillmann, Roderich	Bundesanstalt für Straßenwesen
Hintemann, Ralf	Borderstep Institut
Klassert, Dr. Anton	DKI Deutsches Kupferinstitut
Klusmann, Dr. Bernd	BITKOM e.V. Technologie Green IT Beratungsbüro
Köhn, Marina	Umweltbundesamt, Z 7-B Informationstechnik
König, Dr. Florian	BITKOM e.V. Kommunikation Green IT Beratungsbüro
Koziol, Prof. Dr. Matthias	Brandenburgische Technische Universität Cottbus Institut für Städtebau und Landschaftsplanung
Link, Dr. Heike	DIW Berlin Abteilung Energie, Verkehr, Umwelt
Löwe, Christian	Umweltbundesamt, III 1.1 Produktbezogener Umweltschutz
Müller, Felix	Umweltbundesamt, III 2.2 Stoffkreisläufe, Mineralindustrie
Penn-Bressel, Gertrude	Umweltbundesamt, FGL I 2.3
Sardison, Dr. Markus	Telefonica O2 Environmental Management External Communications
Scharp, Dr. Michael	Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung
Schiller, Georg	Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung
Schmied, Martin	Öko-Institut e.V. Infrastruktur und Unternehmen
Steger, Sören	Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie FG 3 Stoffströme und Ressourcenmanagement

Stoffregen, Alexander	PE International
Tananow, Dr. Oliver	Telefonica O2 Blitzschutz, Network, Regional Engineering Build North-East
Vollmer, Carla	Umweltbundesamt, I 2.3 Erneuerbare Energien
Wachsmann, Ulrike	Umweltbundesamt, I 2.2 Energiestrategien und Szenarien
Wehmeier, Dr. Thomas	Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung Referat I 5 Verkehr und Umwelt
Woitass, Alexander	VDI Zentrum Ressourceneffizienz