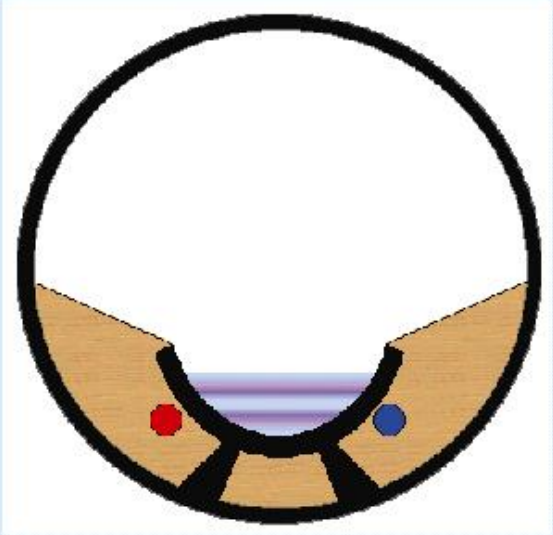
neutral
unabhängig
gemeinnützig

IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur
Institute for Underground Infrastructure



WÄRMEGEWINNUNG AUS ABWASSERKANÄLEN

Entwicklung eines Anforderungskatalogs für Kläranlagen- und Kanalnetzbetreiber gestützt auf Praxistests mit Wärmetauschern

Dr. Lutz Rometsch

Gelsenkirchen, Dezember 2004

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

Auftraggeber:

Ministerium für
Umwelt und Naturschutz,
Landwirtschaft Verbraucherschutz
des Landes NRW

Auftragnehmer:

IKT – Institut für Unterirdische Infrastruktur
Exterbruch 1
45886 Gelsenkirchen

Kooperationspartner:

Ryser Ingenieure AG
Engestraße 9
CH – 3000 Bern 26

Büro eam Energie + Umwelt
Lindenhofstraße 15
CH – 8001 Zürich

Projektleitung und –bearbeitung:

Dr. rer. oec. Lutz Rometsch

Dipl.-Ing. Christoph Bennerscheidt
Beat Kobel (Ryser Ingenieure AG)
Ernst A. Müller (Büro eam)

Wissenschaftliche Begleitung:

Dr.-Ing. Bert Bosseler

Der Verfasser dankt allen Projektbeteiligten für die Bereitstellung des umfangreichen Datenmaterials sowie die weitreichende Unterstützung bei der inhaltlichen Bearbeitung des Forschungsprojektes. Besonderer Dank gilt Herrn Wolfgang Herwig von den Technischen Betrieben Leverkusen sowie Herrn Wolfgang Gerwert von HEC, Dortmund, für die zahlreichen Anregungen und die fachliche Diskussion.

© 2005 All rights reserved by GEK mbH F:\PROJEKTE\0118 Wärmegewinnung aus Abwasserkanälen\Endbericht\docs\F0118-Abschlussbericht.doc

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung ... 9

1.1 Anlass und Zielsetzung der Studie ... 9

1.2 Aufbau der Arbeit ... 10

2 Der Energiesektor in Nordrhein-Westfalen ... 14

2.1 Energiepolitische Grundlagen ... 14

2.2 Energieproduktion und –verwendung ... 16

2.3 Treibhausgas-Emissionen ... 19

2.4 Handlungsbedarf und Untersuchungsgegenstand ... 23

3 Wärmerückgewinnung in Abwasserkanälen ... 24

3.1 Technologie der Wärmerückgewinnung in Abwasserkanälen ... 24

3.1.1 Funktionsweise von Abwasserwärmenutzungs-Anlagen ... 24
3.1.2 Betriebskennziffern zur Beschreibung von AWN-Anlagen ... 26
3.1.3 Bestandteile von Anlagen zur Nutzung von Abwasserwärme ... 27
3.1.3.1 Wärmetauscher ... 27
3.1.3.2 Wärmepumpen ... 30
3.1.3.3 Wärmetransportleitungen ... 32
3.1.4 Grundlegende Wärmetauschersysteme – Beitrag von Beat Kobel (Ryser Ingenieure AG) ... 34
3.1.5 Anwendungserfahrungen in der Schweiz – Beitrag von Beat Kobel (Ryser Ingenieure AG) ... 37
3.1.5.1 Einleitenden Vorbemerkungen ... 37
3.1.5.2 Praxisbeispiele aus der Schweiz ... 37
3.1.5.2.1 Binningen ... 38
3.1.5.2.2 Zwingen ... 41
3.1.5.2.3 Wipkingen ... 44
3.1.5.2.4 Basel ... 47
3.1.5.2.5 Muri ... 49
3.1.6 Empfehlung zur Dimensionierung von Wärmetauscher-Anlagen – Beitrag von Beat Kobel (Ryser Ingenieure AG) ... 53
3.1.6.1 Einleitende Vorbemerkungen ... 53
3.1.6.2 Wärmebedarf und Auslegung der Wärmepumpe ... 53
3.1.6.3 Zeitliche Verteilung des Abwasserabflusses ... 55
3.1.6.4 Auslegung des Wärmetauschers ... 56

3.2 Ökonomie der Wärmerückgewinnung in Abwasserkanalisationen ... 59

3.2.1 Volkswirtschaftliche Perspektive ... 59
3.2.2 Einzelwirtschaftliche Perspektive ... 60
3.2.3 Freiwillige Kooperation der Akteure ... 62
3.2.3.1 Spieltheoretische Grundlagen ... 62
3.2.3.2 Kooperation zwischen Netzbetreibern und Energieversorgern ... 66

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

4 Technische und akteursseitige Anforderungen 69

4.1 Technische Voraussetzungen für den Einbau von Wärmetauschern in Abwasserkanalisationen – Beitrag von Beat Kobel (Ryser Ingenieure AG) 69

4.1.1 Einleitende Vorbemerkungen 69
4.1.2 Darstellung der technischen Voraussetzungen 69
4.1.2.1 Art und Funktion des Kanals 69
4.1.2.2 Form und Material des Kanals 69
4.1.2.3 Größe des Kanals 70
4.1.2.4 Kanalgefälle 70
4.1.2.5 Kapazität des Kanals 70
4.1.2.6 Abwassermenge 71
4.1.2.7 Abwassertemperatur 72
4.1.2.8 Linienführung und Lage des Kanals 72
4.1.2.9 Alter des Kanals 73
4.1.2.10 Zugänglichkeit und Sicherheit 73
4.1.2.11 Wartung und Unterhalt 76
4.1.2.12 Reinigung des Wärmetauschers 76
4.1.2.13 Reinigung der Kanalisation allgemein 77

4.2 Anforderungen der Netzbetreiber an den Einbau von Wärmetauschern in Abwasserkanalisationen 78

4.2.1 Technische Anforderungen: Vollzug der Entwässerungsaufgabe 78
4.2.1.1 Aus Bau und Betrieb von Kanalisationen resultierende Anforderungen 78
4.2.1.2 IKT-Prüfungen an Wärmetauschern 79
4.2.1.2.1 Prüfbedarf 79
4.2.1.2.2 Überblick über das IKT-Prüfprogramm 79
4.2.1.2.3 Untersuchungen zur Dauerhaftigkeit 81
4.2.1.2.4 Untersuchungen zur Kanalreinigung 95
4.2.1.2.5 Untersuchungen zur Arbeitssicherheit 110
4.2.1.2.6 Zusammenfassung der Ergebnisse 131
4.2.1.3 Aus dem Betrieb von Kläranlagen resultierende Anforderungen – Beitrag von Beat Kobel (Ryser Ingenieure AG) 133
4.2.1.3.1 Einleitende Vorbemerkungen 133
4.2.1.3.2 Zusammenhang zwischen Wärmeentnahme aus der Kanalisation und Temperatur im Zulauf zur Kläranlage 133
4.2.1.3.3 Auswirkung der Wärmeentnahme auf den Kläranlagen-Betrieb 139
4.2.1.3.4 Grenzkriterien für die Sicherstellung des Kläranlagenbetriebs 143
4.2.1.3.5 Hilfsmittel zur Überprüfung der Einhaltung der Grenzkriterien 144
4.2.1.3.6 Energieverbrauch 148
4.2.1.3.7 Zusammenfassung 149
4.2.2 Ökonomische Anforderungen 151
4.2.2.1 Obligatorisch: Kostenneutralität 151
4.2.2.2 Optional: Monetärer und nicht-monetärer Nutzen 158
4.2.3 Vertragsrechtliche Anforderungen 158
4.2.3.1 Vertragsform 158
4.2.3.2 Vertragsstabilität 162
4.2.3.3 Ein Praxisbeispiel 163
4.2.3.4 Ergänzende vertragsrechtliche Anmerkungen zum Cross-Border-Leasing 164

4.3 Anforderungen der Energieversorger 165

4.3.1 Vorbemerkungen 165
4.3.2 Investitionen 166
4.3.3 Kosten 168
4.3.4 Erlöse 169
4.3.4.1 Produkte, Mengen, Preise 169
4.3.4.2 Contracting 170
4.3.5 Zusammenfassung: Anforderungen der EVU an die Wärmerückgewinnung in Abwasserkanälen 172

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

5 Potenzial der Abwasserwärmenutzung in NRW 174

5.1 Definitionen und Vorgehensweisen bei der Ermittlung des theoretischen Potenzials 174

5.2 Gesamtheitliche Betrachtung des theoretischen Wärmepotenzials – Beitrag von Ernst A. Müller (Büro eam) 177

5.2.1 Vorgehen 177
5.2.1.1 Ausgangslage und Wirtschaftlichkeit der Anlagen 177
5.2.1.2 Methode und Grundlagen 178
5.2.1.3 Stufenweises Vorgehen 179
5.2.1.4 Hochrechnung auf der Basis von vier Gemeindegrößenklassen 179
5.2.1.5 Unterschiedliche Wärmepumpen-Strategien 180
5.2.1.6 Energie-Bilanzen der unterschiedlichen Wärmepumpen-Strategien 181
5.2.2 Energie-Bilanzen der unterschiedlichen Wärmepumpen-Strategien 182
5.2.2.1 Wärmeinhalt im Abwasser 182
5.2.2.1.1 Abwasseranfall 182
5.2.2.1.2 Abwassertemperatur 183
5.2.2.2 Theoretisches Abwasserwärmepotenzial 184
5.2.2.3 Gewinnungspotenzial 184
5.2.2.4 Vermarktungspotenzial 186
5.2.2.5 Realisierungspotenzial 186
5.2.3 Potenzial nach Kläranlagen in typischen Gemeinden 187
5.2.3.1 Theoretisches Abwasserwärmepotenzial 187
5.2.3.2 Gewinnungspotenzial 188
5.2.3.3 Vermarktungspotenzial 188
5.2.3.4 Realisierungspotenzial 188
5.2.4 Hochrechnung Realisierungspotenzial 188

5.3 Abschätzung des theoretischen Wärmepotenzials – Darstellung eines evolutorischen Ansatzes am Beispiel der Wärmerückgewinnung in Abwasserkanalisationen 190

5.3.1 Vorgehensweise 190
5.3.2 Gewinnungspotenzial 190
5.3.2.1 Anforderungen an die Kanalisation zur Wärmerückgewinnung 190
5.3.2.2 Gewinnungspotenzial im Kanalisationsbestand 192
5.3.2.3 Gewinnungspotenzial im Kanalisationsneubau 195
5.3.2.4 Vertiefende Betrachtung des Gewinnungspotenzials in Stauraumkanälen 197
5.3.2.5 Zusammenfassung des Gewinnungspotenzials in NRW 201
5.3.3 Vermarktungspotenzial 201
5.3.4 Realisierbares Potenzial 205
5.3.5 Robustheit der Potenzialermittlung 208
5.3.6 Zur Dynamik der evolutorischen Potenzialentwicklung 212
5.3.6.1 Einflussfaktoren 212
5.3.6.2 Ableitung von Potenzialpfaden 213
5.3.7 Zusammenfassung der Ergebnisse der evolutorischen Potenzialabschätzung 215

6 Abschätzung der Primärenergie- und CO_2–Reduktion – Beitrag von Ernst A. Müller (Büro eam) 217

6.1 End- und Primärenergie-Reduktion 217

6.2 CO_2-Reduktion 219

6.3 Zusätzliche Effekte 220

6.3.1 Raumkühlung 220
6.3.2 Industriekläranlagen 220

7 Zusammenfassung und weiterer Forschungsbedarf 222

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

Abkürzungs- und Symbolverzeichnis

Abk.	Abkürzung
AbwV	Abwasserverordnung
AG	Aktiengesellschaft
ARA	Abwassereinigungsanlage
ATV-DVWK	Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall
Aufl.	Auflage
AWN-Anlage	Abwasserwärmenutzungs-Anlage
AWN-Anlagen	Abwasser-Wärme-Nutzungsanlagen
bea	Bremerhavener Energiemanagement Agentur GmbH
BGFE	Berufsgenossenschaft für Feinmechanik und Elektrotechnik
BSK	biogene Schwefelsäure Korrosion
bspw.	beispielsweise
BUND	Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland
bzw.	beziehungsweise
C	Celsius
c. p.	ceteris paribus (unter sonst gleichen Bedingungen)
CBL	Cross-Border Leasing
cm	Zentimeter
CO_2	Kohlendioxid
COP	Leistungszahl einer Wärmepume
ct	Cent
d. h.	das heißt
DN	Kanal-Innendurchmesser
e. V.	eingetragener Verein
EAM	Büro Ernst A. Müller, Zürich
EAWAG	Eidgenössische Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz
EBM	Elektra Birseck Münchstein
EFA	Energie Freiamt AG
erw.	erweitert
et al.	et alii
EU	Europäische Union
EVU	Energieversorgungsunternehmen
EW	Einwohner
ewz	Elektrizitätswerke der Stadt Zürich
f.	folgende
ff.	fortfolgende
gem.	gemäß
ggfs.	gegebenenfalls
GmbH	Gesellschaft mit beschränkter Haftung
GWP	Global Warming Potential
HD	Hochdruck
HEC	Harpener Energie Contracting
HLK	Heizung, Lüftung, Klima
Hrsg.	Herausgeber
i	Zinssatz
i. d. R.	in der Regel
i. e.	it est (das heißt)
i. e. S.	im engeren Sinne
IKT	Institut für Unterirdische Infrastruktur
inkl.	inklusive
insbes.	insbesondere
JAZ	Jahresarbeitszahl
Jg.	Jahrgang
k. o.	Knock Out
KA	Kläranlage
Kap.	Kapitel
kg	Kilogramm

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

kJ	Kilojoule
km	Kilometer
Komm.	Kommunen
kW	Kilowatt (Leistung)
kWh	Kilowattstunde (Arbeit)
l	Liter
LDS	Landesamt für Datenverarbeitung und Statistik
LIV	Landesinnungsverband des Schornsteinfegerhandwerks Nordrhein-Westfalen
lt.	laut
m	Meter
m2	Quadratmeter
m3	Kubikmeter
max.	maximal
MID	magnetisch-induktives Durchflussmesssystem
Mio.	Millionen
mm	Millimeter
MUNLV	Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz
MVEL	Ministerium für Verkehr, Energie und Landesplanung des Landes NRW
MW	Megawatt
MWMEV	Ministerium für Wirtschaft und Mittelstand, Energie und Verkehr
NB	Kanalnetzbetreiber
Nr.	Nummer
NRW	Nordrhein-Westfalen
o. a.	oben angegebene
o. g.	oben genannte
o. S.	ohne Seite
p. a.	per anno
PE	Polyethylen
Prosys	Gesellschaft für produktionsintegrierte Umweltsystemtechnologien und –management mbH
PW	Pumpwerke
RB	Regierungsbezirk
rd.	rund
RWI	Rheinisch-Westfälisches Institut für Wirtschaftsforschung e.V.
RWI	Rheinisch-Westfälisches Institut für Wirtschaftsforschung
s	Sekunde
S.	Seite
SKE	Steinkohleeinheit
SRK	Stauraumkanal
SRS	Stolpern, Rutschen, Stürzen
SüwV Kan	Selbstüberwachungsverordnung Kanal
t	Tonne
Tab.	Tabelle
TBL	Technische Betriebe Leverkusen
u. U.	unter Umständen
überarb.	überarbeitet
unveränd.	unverändert
usw.	und so weiter
UVV	Unfallverhütungsvorschriften
v. a.	vor allem
v. H.	von Hundert
Vgl.	vergleiche
vollst.	vollständig
WBA	Wärmeversorgung Binningen AG
WP	Wärmepumpe
Wst-Nr.	Werkstoff-Nummer
WT	Wärmetauscher
z. B.	zum Beispiel
zzgl.	zuzüglich

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

1 Einleitung

1.1 Anlass und Zielsetzung der Studie

Abwasser, das täglich in großen Mengen durch die Abwasserkanalisationen transportiert, in Kläranlagen gereinigt und anschließend in die Vorfluter eingeleitet wird, stellt grundsätzlich ein Abfallprodukt ohne wirtschaftlichen Wert dar. Mit dem Abwasser aus privaten Haushalten, landwirtschaftlichen und industriellen Betrieben werden jedoch nicht nur Schadstoffe transportiert, in Abhängigkeit von der Nutzung findet auch eine Erwärmung des Wassers statt. Folglich weist das abfließende Abwasser eine höhere Temperatur auf als bspw. das Trinkwasser. Nunmehr sind Überlegungen im Gange, das energetische Potenzial des Abwassers für die Wärmeversorgung, d.h. für die Beheizung und Warmwasserversorgung von Liegenschaften zu nutzen. Damit stellt Abwasser eine potenzielle Ressource für eine thermische Nutzung dar und wird damit zu einem wirtschaftlichen Gut.

Die Rückgewinnung der im Abwasser befindlichen Wärme findet mit Hilfe von Wärmetauschern (WT) statt. WT, die bspw. in die Abwasserkanalisation eingebaut werden, sind ein Bestandteil von Abwasser-Wärme-Nutzungsanlagen (im Folgenden AWN-Anlagen). In den WT-Elementen zirkuliert ein flüssiges Medium, das in der Kanalisation zunächst die Wärme des Abwassers aufnimmt. Anschließend wird das erwärmte Medium einer Wärmepumpe zugeleitet. Dort findet ein verdichtender Wärmetausch statt: Verhältnismäßig große Mengen des Mediums geben die Wärmeenergie an eine relativ kleine Menge Wasser ab, wobei eine Anhebung auf ein höheres Temperaturniveau (50 – 60 °C) erfolgt.

In den warmen Sommermonaten ermöglicht der inverse Betrieb von AWN-Anlagen die Klimatisierung von Räumen, indem Wärmeenergie in die Abwasserkanalisation abgegeben wird. Obwohl dieser Bereich wirtschaftlich sehr interessant ist und auch im Verlauf dieser Forschungsarbeit noch weitere Hinweise auf die Klimatisierung erfolgen, liegt der thematische Schwerpunkt auf dem Heizungssektor und der Warmwasseraufbereitung.

Die Technologie zur Rückgewinnung der Abwasserwärme ist erprobt: In der Schweiz befinden sich bereits vereinzelte Anlagen in mehrjährigem Betrieb. Neuerdings sind auch in Deutschland die ersten in Kanalisationen eingebauten Anlagen zur Nutzung der Abwasserwärme in Betrieb genommen worden (Leverkusen und Singen). Weitere AWN-Anlagen werden in bzw. nach Kläranlagen betrieben.

Die Anwendung der WT-Technologie in Abwasserkanalisationen verheißt über den energetischen Nutzen hinaus auch Ressourceneinsparungen in Bezug auf den Primärenergieeinsatz sowie Emissionsminderungen, v.a. im Bereich des Treibhausgases CO_2. Damit stellt sich vor dem Hintergrund der gegenwärtig verfügbaren Technologie zur Nutzung der Abwasserwärme die Frage, welches Potenzial eine technisch und wirtschaftlich vertretbare Abwasserwärmenutzung das Land Nordrhein-Westfalen theoretisch aufweist. Bei der Abschätzung dieses Potenzials sind sowohl die technischen Anforderungen, die sich an den Kanalisations- und WT-Betrieb stellen, als auch die Anforderungen der angebots- und nachfrageseitig involvierten Akteure zu berücksichtigen. Ein besonderes Augenmerk liegt in dieser Studie auf den Anforderungen der Kanalnetzbetreiber (NB), die die Abwasserkanalisation zum Zweck der Entwässerung betreiben.[1] Abwasserseitig sind zudem Anforderungen der Kläranlagenbetreiber zu beachten. Darüber hinaus sind auf der Angebotsseite die Anforderungen von Energieversorgungsunternehmen

[1] Die Potenzialermittlung für AWN-Anlagen wird im Wesentlichen auf der Grundlage der kommunalen Kanalisationsnetze durchgeführt. Ein weiteres Potenzial besteht möglicherweise bei den industriell-gewerblichen Netzen, sofern für die Wärmerückgewinnung geeignete Kanäle durch Siedlungsgebiete verlaufen.

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

(EVU) einzubeziehen, da diese die Vermarktung der Wärmeenergie durchführen. Nachfrageseitig sind schließlich die Interessen und Präferenzen der Liegenschaftseigentümer bzw. der Bauherren bedeutsam. Erst unter Berücksichtigung der technischen, ökonomischen und vertragsrechtlichen Anforderungen dieser Akteure kann eine belastbare Abschätzung des Potenzials der Wärmerückgewinnung aus Abwasser in Nordrhein-Westfalen vorgenommen werden.

Die grundlegende Zielsetzung dieses Forschungsprojektes besteht darin, die Anforderungen der Akteure zusammenzutragen, die jeweiligen Hintergründe für diese Anforderungen auszuleuchten sowie darauf aufbauend das technisch und wirtschaftlich vertretbare Potenzial der Wärmerückgewinnung in NRW und die damit verbundenen energiewirtschaftlichen und umwelpolitischen Effekte abzuschätzen.

Als Projektpartner stehen dem IKT – Institut für Unterirdische Infrastruktur die schweizer Unternehmen Ryser Ingenieure AG, Bern, sowie Büro eam, Zürich, zur Seite. Die durch den Auftraggeber, das MUNLV NRW, für die vorliegende Studie vertraglich bestimmten Leistungen von Ryser Ingenieure AG bestanden in der Erstellung von Berichten zu den Themen „Praxiserfahrungen in der Schweiz“, „Anforderungen aus Sicht der Kanalbetreiber“, „Empfehlungen zur Dimensionierung von WT-Anlagen“ und „Darstellung von Grenzkriterien für die Wärmenutzung“. In gleicher Weise bestand die Leistungsverpflichtung von Büro eam in einer Ausarbeitung zur „Darstellung des Wärmepotenzials in NRW“. Die von Beat Kobel für Ryser Ingenieure AG und Ernst A. Müller für Büro eam vorgelegten Beiträge sind auszugsweise in diesem Forschungsbericht enthalten und in den jeweiligen Kapitelüberschriften durch einen entsprechenden Hinweis kenntlich gemacht. Die Beiträge von Ryser Ingenieure AG und Büro eam repräsentieren die Argumentation der Projektpartner, die auf den speziellen, in der Schweiz gewonnenen Erfahrungen beruhen. Die Darstellung der Beiträge von Ryser Ingenieure AG und Büro eam im Rahmen dieses Forschungsberichtes beschränkt sich auf diejenigen inhaltlichen Ausführungen, die für die in dieser Studie zu behandelnde Fragestellungen aus Sicht des Verfassers relevant sind. Die inhaltliche und redaktionelle Verantwortung für die zugrundeliegenden Berichte[2] tragen Ryser Ingenieure AG und Büro eam.

1.2 Aufbau der Arbeit

Mit dem Thema „Wärmegewinnung in Abwasserkanalisationen“ wird eine primär energiewirtschaftliche Problematik angesprochen. Daher erfolgt im Anschluss an die einleitenden Abschnitte im zweiten Kapitel eine energiewirtschaftliche Einführung in die Thematik. Indem die energiepolitischen und energiewirtschaftlichen Grundlagen für das Land Nordrhein-Westfalen skizziert werden, lassen sich die diesbezüglichen Ziele und Handlungsbedarfe darstellen. Der Zusammenhang zum Untersuchungsgegenstand der Wärmerückgewinnung in Abwasserkanalisationen lässt sich schließlich mit der Frage auf den Punkt bringen, welchen Beitrag die Nutzung von Anlagen zur Rückgewinnung von Wärme aus Abwasser zu den energiewirtschaftlichen und energiepolitischen Zielen der Versorgungssicherheit, der nachhaltigen Verwendung von Ressourcen und der Minderung von Treibhausgasemissionen leisten kann.

Im dritten Kapitel erfolgt eine Vorstellung der Wärmerückgewinnung in Abwasserkanälen. Dabei wird sowohl auf technologische als auch auf ökonomische (volkswirtschaftliche und einzelwirtschaftliche) Aspekte Bezug genommen. Die Technologie der Wärmerückgewinnung in Abwasserkanalisationen wird im ersten Abschnitt des dritten Kapitels erläutert, indem die die

[2] Die vollständigen Berichte von Ryser Ingenieure AG („Grenzkritierien der Wärmenutzung“, „Praxiserfahrungen in der Schweiz“, „Anforderungen aus Sicht der Kanalbetreiber“, „Dimensionierungsempfehlungen“) und Büro eam („Potenzial der Abwasserwärmenutzung NRW“) liegen dem IKT vor.

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

Funktionsweise von AWN-Anlagen dargestellt, Definitionen für spezielle Betriebskennziffern vorgestellt und die Bestandteile von AWN-Anlagen beschrieben werden. Die Berichte von Ryser-Ingenieure AG über grundlegende WT-Systeme (Kapitel 3.1.4, S. 34 - 36), über Anwendungserfahrungen in der Schweiz (Kapitel 3.1.5, S. 37 - 52) sowie Empfehlungen zur Dimensionierung von AWN-Anlagen (Kapitel 3.1.6, S. 53 - 58) runden die Darstellungen dieses Abschnittes ab.

Der zweite Abschnitt des dritten Kapitels ist der Darstellung der Ökonomie der Wärmerückgewinnung in Abwasserkanalisationen aus volkswirtschaftlicher und einzelwirtschaftlicher Perspektive gewidmet. Da die Gewinnung und Vermarktung von in Abwasserkanalisationen gewonnener Wärmeenergie eine Kooperation von NB und EVU verlangt, werden die Voraussetzungen für eine freiwillige Kooperation dieser Akteure unter Bezugnahme auf das Instrumentarium der Spieltheorie ausgeleuchtet.

Aufbauend auf die im dritten Kapitel skizzierten technologischen und ökonomischen Grundlagen kann nunmehr im vierten Kapitel die Aufstellung der technischen und akteursseitigen Anforderungen in Angriff genommen werden.

Im ersten Abschnitt berichtet Ryser-Ingenieure AG vor dem Hintergrund der schweizer Erfahrungen über die technischen Voraussetzungen für den Einbau von Wärmetauschern in Abwasserkanalisationen (Kapitel 4.1, S. 69 - 77).

Im zweiten Abschnitt des vierten Kapitels liegt der weitere Schwerpunkt der Analyse auf der Betrachtung der Anforderungen der Netzbetreiber. In diesem Zusammenhang werden technische Anforderungen zum Vollzug der Entwässerungsaufgabe (erster Unterabschnitt) sowie ökonomische (zweiter Unterabschnitt) und vertragsrechtliche Anforderungen (dritter Unterabschnitt) erläutert.

Die Aufgabe der NB besteht - umfassend formuliert - in der Erbringung von Entwässerungsleistungen. Die Umsetzung dieser Aufgabe ist mit Anforderungen an den Bau und Betrieb von Abwasserkanalisationen verbunden. Sofern der Einbau von WT-Elementen in Abwasserkanalisationen erfolgen soll, ist abzuklären, ob und ggfs. welche Zusammenhänge zwischen der Nutzung der Kanalisation zur Entwässerung und der Nutzung zur Wärmerückgewinnung bestehen. Zu diesem Zweck hat das IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur ein entsprechendes Prüfprogramm entwickelt. Die im IKT durchgeführten Untersuchungen geben Auskunkt darüber, ob Beeinflussungen des Kanalbetriebs infolge des Einbaus und des Betriebs von WT-Elementen in Abwasserkanalisationen zu erwarten sind.

Ferner sind Anforderungen zu berücksichtigen, die sich aus dem Betrieb von Kläranlagen zur Reinigung des Abwassers von Schadstoffen ergeben. Zur effektiven und effizenten Reinigung von Abwasser sind bestimmte Mindesttemperaturen im Vorlauf von Kläranlagen erforderlich. Da die Nutzung der Abwasserwärme mittels AWN-Anlagen zu Veränderungen der Abwassertemperatur führt, ist zu untersuchen, unter welchen Bedingungen negative Auswirkungen auf die Reinigungsleistung von Kläranlagen und damit verbundene Gefährdungen des Gewässerschutzes ausgeschlossen werden können. Vor diesem Hintergrund stellt Ryser Ingenieure AG dar, wie sich die Wärmeentnahme durch AWN-Anlagen auf den Betrieb von Kläranlagen auswirkt und welche Kriterien zur Gewährleistung der Reinigungsleistung einzuhalten sind (siehe Kapitel 4.2.1.3, S. 133 - 150).

Über die technischen Anforderungen hinaus, die aus dem Vollzug der Entwässerungsaufgabe durch NB und Kläranlagenbetreiber resultieren, werden im zweiten Unterabschnitt ökomomische Anforderungen behandelt. Hier wird v.a. untersucht, welche Kosten bei den NB infolge des Einbaus und Betriebs von AWN-Anlagen in Abwasserkanalisationen auftreten können

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

und wie diese zu behandeln sind, um eine verdeckte Subventionierung von AWN-Anlagen durch Abwassergebühren auszuschließen.

Schließlich werden im dritten Unterabschnitt rechtliche Anforderungen erörtert. Dabei stehen vertragsrechtliche Grundsatzfragen zur Regelungen der Leistungs- und Haftungsbeziehungen zwischen NB und EVU im Vordergrund. Unter Bezugnahme auf die spieltheoretisch abgeleiteten Kooperationsprämissen werden v.a. die Parameter „Vertragsform“ und „Vertragsstabilität“ untersucht.

Der dritte Abschnitt des vierten Kapitels ist der Analyse der Anforderungen der Energieversorgungsunternehmen (EVU) gewidmet. Die Ableitung der Anforderungen erfolgt unter Bezugnahme auf die Investitionen, die Kosten sowie die Erlöse der EVU. Zudem wird auf das Contracting als absatzpolitisches Instrument der EVU Bezug genommen.

Im fünften Kapitel erfolgt eine Abschätzung des Potenzials der Abwasserwärmenutzung in Nordrhein-Westfalen. Zur Abschätzung von Wärme-Potenzialen können unterschiedliche methodische Wegen beschritten werden. Im Rahmen dieser Forschungsarbeit sind zwei Alternativen der Potenzialabschätzung dargestellt.

Im ersten Abschnitt werden zunächst die grundlegenden begrifflichen Definitionen vorgestellt.

Im Anschluss daran erfolgt im zweiten Abschnitt eine Ableitung des theoretischen Wärmepotenzials aus Abwasserkanalisationen von Büro eam (Kapitel 5.2, S 177 - 189). Dieser Darstellung liegt nach Bekunden von Büro eam eine ganzheitliche Betrachtung zugrunde. Zum einen werden die Potenziale der Wärmerückgewinnung in Kanalisationen sowie in bzw. nach Kläranlagen betrachtet. Zum anderen stellt Büro eam bei seiner Betrachtung auf das Wärmebedarfspotenzial ab: Über die Wärmerückgewinnung aus dem Abwasser fließen in die Potenzialabschätzung auch die für den Betrieb der Wärmepumpen erforderlichen Antriebsenergien sowie die zur Versorgung der über die Grundlast hinausgehenden Spitzenlast-Energiebedarfe der zusätzlich erforderlichen Heizungsanlagen ein.

Im dritten Abschnitt des fünften Kapitels wird ein alternativer Weg zur Abschätzung des Potenzials der Wärmerückgewinnung aus Abwasser vorgestellt. Dieser Ansatz setzt den Fokus auf die Ermittlung des jährlich in Abwasserkanalisationen realisierbaren Wärmepotenzials. Die Antriebsenergien für Wärmepumpen und die Energieeinsätze für die zusätzlich erforderlichen Heizungssysteme beiben unberücksichtigt, da hieraus keine energiewirtschaftlich und umweltpolitisch relevanten Effekte resultieren. Es erfolgt ausschließlich eine Abbildung der in nordrhein-westfälischen Kanalisationen rückgewinnbaren Wärmeenergie. Dabei finden zeitliche und akteursbezogene Aspekte eine besondere Berücksichtigung: Grundsätzlich ist davon auszugehen, dass sich Potenziale in Abhängigkeit von verschiedenen Einflussgrößen über die Zeitachse entfalten können. Insofern folgt die in diesem Abschnitt dargestellte Potenzialabschätzung einem evolutorischen Ansatz. Im Rahmen dieses Ansatzes wird ferner eine Unterscheidung zwischen den Potenzialen im Kanalisationsbestand und im Kanalisationsneubau getroffen. Ausgangspunkt für die Potenzialabschätzung ist jedoch in beiden Fällen (Kanalisationsbestand und -neubau) der „Ort der Wärmerückgewinnung“, d.h. die Kanalisation. Unter Berücksichtigung von Gewinnungs-, Vermarktungs- und Realisierungsrestriktionen wird ein theoretisches Realisierungspotenzial abgeleitet, das alljährlich für eine technisch und wirtschaftlich vertretbare Wärmerückgewinnung aus Abwasserkanalisationen zur Verfügung steht. Da es sich bei diesem Potenzial nicht um eine statische Größe handelt, werden zudem Einflussfaktoren diskutiert, die sich auf die Dynamik der Potenzialentwicklung

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

auswirken können. Als Ergebnis dieser Überlegungen lassen sich alternative Potenzialpfade ableiten, die als theoretische Obergrenzen für reale Marktpotenziale zu verstehen sind.

Im sechsten Kapitel nimmt Büro eam eine Abschätzung der energiewirtschaftlichen, ressourcen- und emissionsbezogenen Effekte der Wärmerückgewinnung aus Abwasser auf der Grundlage der von Büro eam dargestellten gesamtheitlichen Potenzialabschätzung für das Land Nordrhein-Westfalen vor (Kapitel 6, S. 217 - 221).

Die Studie schließt mit einer Zusammenfassung der Ergebnisse und der Darstellung des weiteren Forschungsbedarfs im siebten Kapitel.

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

2 Der Energiesektor in Nordrhein-Westfalen

2.1 Energiepolitische Grundlagen

Energie ist ein essentieller Faktor für Produktion und Konsum. Die sichere Versorgung mit Energie in ausreichender Menge stellt eine zentrale Voraussetzung für die wirtschaftliche Entwicklung einer Region dar.[3] Die Koordination von Angebot und Nachfrage nach Energie, Energieträgern und -formen findet auf Märkten statt, wobei sich Gleichgewichtsmengen und –preise herausbilden. Mit der Ölkrise im Oktober 1973 ist in Bewusstsein gerückt, dass bereits temporäre Engpässe in der Energieversorgung massive Konsequenzen für die wirtschaftliche Entwicklung und das gesellschaftliche Leben zur Folge haben können. Die Frage der Energieversorgung hat damit eine politische Dimension angenommen: Es stellt sich die Aufgabe an die Politik, mittels energiepolitischer Maßnahmen unbefriedigende Zustände der Energieversorgung zu vermeiden.[4]

Als Ziele der Energiepolitik lassen sich Versorgungssicherheit, Wirtschaftlichkeit und Umweltverträglichkeit der Energieversorgung anführen. Unter dem Schock der Ölkrise in den 70er Jahren setzt die Energiepolitik die Priorität zunächst auf die Sicherstellung einer mengenmäßig ausreichenden Energieversorgung (Versorgungssicherheit).

Eine Erhöhung der Versorgungssicherheit kann durch die Streuung der Bezugsquellen erreicht werden, wenn zuvor tendenziell monostrukturierte Lieferbeziehungen aufgebrochen werden und der Energiebezug auf eine Mehrzahl von Lieferanten verteilt wird.

Ferner führt die Diversifikation der eingesetzten Energiequellen zu einer erhöhten Versorgungssicherheit. Vor dem Hintergrund steigender Energiebedarfe und begrenzter Verfügbarkeit sowohl der heimischen fossilen Energieträger als auch der weltweiten Mineralöl- und Erdgasvorräte gewinnt die Nutzung alternativer Energieträger zunehmend an Bedeutung.[5] Dabei ist langfristig zur Sicherung der Energieversorgung eine Substitution endlicher durch regenerative Energieträger erforderlich.

Des Weiteren stellt die rationelle Nutzung der vorhandenen Energiereserven einen weiteren Weg zur Erhöhung der Versorgungssicherheit dar. Zur Realisierung rationeller Nutzungen der Energiereserven sind angebotsseitig Effizienzsteigerungen bei der Energieerzeugung und nachfrageseitig Einsparungen bei der Energienutzung erforderlich.

Der Umweltschutz stellt verschiedenartige Anforderungen an die Energieversorgung. Die primäre Aufgabe der Umweltpolitik besteht im Schutz der durch verschiedene Nutzungen beanspruchten Umweltgüter. Die Beanspruchung erfolgt durch die Nutzung der Umwelt als Aufnahmemedium für emittierte Schadstoffe sowie durch die Nutzung von Umweltgütern als Konsum- oder Investitionsgut. Im Zuge der Erzeugung, Verteilung und Nutzung von Energie treten Emissionen auf, die zu Umweltbelastungen führen. Im Blickfeld befinden sich insbesondere die klimarelevanten Treibhausgase, und hier wiederum die CO_2-Emissionen, die zugunsten des Klimaschutzes zu reduzieren sind.[6] Nach den Beschlüssen von Kyoto trifft die Bundesrepublik Deutschland für den Zeitraum von 2008 bis 2012 eine Reduzierungsverpflichtung in Höhe von 21 % gegenüber den im Basis-

---

3 In einer Darstellung des Ministeriums für Verkehr, Energie und Landesplanung des Landes Nordrhein-Westfalen (MVEL) zur Energiewirtschaft wird erklärt, dass „für die Unternehmen des Landes und für den Wirtschaftsstandort Deutschland [..] ein sicheres, verlässliches und preiswertes Energieangebot von elementarer Bedeutung“ ist. Vgl. MVEL (2004 a), o.S.

4 Vgl. Woll, A. (1991), S.167.

5 Vgl. MVEL (2004 a), o.S. und Hennerkes (2003), S. 2 f.

6 Vgl. MVEL (2004 a).

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

jahr 1990 emittierten 1.208 Mill. Tonnen CO_2.[7] Nachdem 1990 rd. ein Drittel der EU-Emissionen in Deutschland emittiert wurden, trägt Deutschland nunmehr etwa die Hälfte der EU-Reduktionslast.[8] Diese Zielvorstellung wird von der deutschen Wirtschaft unterstützt: Seit der ersten Vertragsstaatenkonferenz zur Klimakonvention in Berlin besteht eine Selbstverpflichtung der deutschen Wirtschaft, die eine Verminderung der CO_2-Emissionen bzw. des spezifischen Energieverbrauchs bis zum Jahr 2005 (Basis 1990) um 20 % vorsieht.[9] Dass im Basisjahr allein 345,9 Mill. Tonnen CO_2 in Nordrhein-Westfalen emittiert werden,[10] ist Beleg für die Reduzierungsverpflichtung, die auf dem Land lastet.

Das Land Nordrhein-Westfalen steht in der Verantwortung, einen Beitrag zur Reduzierung der Treibhausgas-Emissionen zu leisten. Diese Verantwortung und Verpflichtung ist dem Land durchaus bewusst, hat es doch ein Klimaschutzkonzept erarbeitet, das einen erheblichen Beitrag zur Emissionsminderung leisten wird: Mit einem Maßnahmenbündel bestehend aus Aktivitäten im Bereich des Energiesparens und der erneuerbaren Energien, Projekte der Kraft-Wärme-Kopplung und Grubengasnutzung, Maßnahmen im Bereich der Siedlungsabfälle sowie Aktivitäten und Initiativen im Verkehrsbereich und im Wohnungsbau ergibt sich ein Minderungspotenzial von 30 Mio t CO_2.[11]

Umweltressourcen sind dem Prinzip der Nachhaltigkeit folgend dergestalt einzusetzen, dass weder die Entwicklungsmöglichkeiten von gegenwärtigen, noch die von zukünftigen Generationen beschnitten werden.[12] Einen wichtigen Faktor hinsichtlich des nachhaltigen Umgangs mit Ressourcen stellt der technische Fortschritt dar. Mit der Entwicklung innovativer Energieumwandlungs-, –verteilungs- und –verwendungstechnologien lassen sich über die Erhöhung der Energieeffizienz nicht nur die Nutzungsperioden der endlichen Energie-Ressourcen verlängern (Versorgungssicherheit), darüber hinaus treten auch Emissionsminderungen ein.[13] Maßnahmen zu Energieeinsparungen auf der Seite der Nachfrager schlagen sich in gleicher Weise positiv zugunsten eines nachhaltigen Umgangs mit Ressourcen nieder. Gleichwohl ist das aus technischem Fortschritt und Einsparungen resultierende Potenzial insgesamt begrenzt.[14]

Die energie- und umweltpolitischen Anforderungen an die Energieversorgung lassen sich dahingehend zusammenfassen, dass die Versorgungssicherheit in der Gegenwart wie auch in der Zukunft eine zentrale Rolle spielt. Ferner sind sowohl hinsichtlich der Energieträger als auch der Lieferbeziehungen Diversifikationsstrategien zu betreiben. Aus umweltpolitischer Sicht sind Aspekte des schonenden Umgangs mit Ressourcen sowie der verminderten Schadstoffemission zu beachten. Insbesondere regenerative Energien sind geeignet, dem Ziel der Versorgungssicherheit und der Umweltverträglichkeit Vorschub zu leisten.[15]

---

7 Vgl. Klemmer, P (2002), S. 5.

8 Vgl. Klemmer, P. (1999), S. 29 f.

9 Vgl. Bundesverband der Deutschen Wirtschaft (1995).

10 Vgl. Energiebroschüre Nordrhein-Westfalen (2001), Tab. 7.2.

11 Vgl. MWMEV (2001), S. 3.

12 Zum Begriff der Nachhaltigkeit vgl. Enquete-Kommission (2002).

13 Vgl. Hennerkes, J. (2003), S. 5 und S. 10.

14 Die Bedeutung der Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz ist von politischer Seite erkannt. Als wichtige rechtliche Grundlagen sind diesbezüglich das im März 2002 verabschiedete Gesetz zur Kraft-Wärme-Kopplung und die im Februar 2002 in Kraft getretene Energieeinsparverordnung zu nennen. Vgl. Hennerkes, J. (2003), S. 5.

15 Die Landesregierung nennt zur Verringerung der CO_2-Emissionen im Energiebereich die Alternativen der Energieensparung, der Effizienzsteigerung bei der Erzeugung sowie des Ausbaus regenerativer Energien. Vgl. MUNLV (2000), S. 16.

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

Durch den Einsatz dieser Energieträger können aber nicht nur Umweltschäden vermieden, sondern unter anderem auch die im Zusammenhang mit der Verknappung von Energieträgern entstehenden langfristigen Preisrisiken gesenkt werden.[16]

Insgesamt resultieren aus den energie- und umweltpolitischen Anforderungen an die Energieversorgung Strukturwandelprozesse auf dem Energiemarkt. Dabei hängen Richtung und Geschwindigkeit des Strukturwandels zum einen von den die Energieerzeugung betreffenden politischen Vorgaben ab, zum anderen von der Wirtschaftlichkeit unterschiedlicher Energieversorgungsformen. Divergierende Präferenzen und Akzeptanzen seitens der Nachfrager für verschiedene Energieversorgungsformen sorgen dabei für eine gewisse Streuung der Nachfrage nach unterschiedlichen Energieformen, unwirtschaftliche Systeme werden sich jedoch auf Dauer nicht durchsetzen können. Voraussetzung für eine Vergleichbarkeit der Wirtschaftlichkeit verschiedener Energieformen ist das Fehlen gravierender externer Kosten, bspw. durch nicht in den Preisen kalkulierte, signifikante Beeinträchtigungen von Umwelt, Gesundheit usw.[17]

Vor dem Hintergrund der Zieltrias aus Versorgungssicherheit, Umweltverträglichkeit und Wirtschaftlichkeit ist nunmehr zu untersuchen, welchen Beitrag die Wärmerückgewinnung aus Abwasserkanälen zur Energieversorgung in Nordrhein-Westfalen bzw. zur o.g. Zieltrias leisten kann.

Um den Stellenwert der Zielbeiträge der Wärmerückgewinnung aus Abwasserkanälen einordnen zu können, erfolgt zunächst die Darstellung des Status quo auf dem nordrhein-westfälischen Energiemarkt.

2.2 Energieproduktion und –verwendung

Energie steht in der Natur in unterschiedlichen Formen zur Verfügung. Nicht alle Formen erlauben eine unmittelbare Nutzung durch den Verbraucher für Produktion oder Konsum. Vielmehr sind Prozesse erforderlich, in denen Primärenergie (z.B. Rohöl, Stein- und Braunkohle, Erdgas, Uran, erneuerbare Energiequellen) in verbrauchsgerechte Endenergieformen (z.B. Strom, Fernwärme, Heizöl, Koks usw.) umgewandelt wird. Dabei treten Verluste auf, d.h. die im Primärenergieträger gebundene Energie kann nicht vollständig vom Verbraucher genutzt werden.

Der Primärenergie-Verbrauch steht für den Einsatz der direkt der Natur entnommenen Energieträger, der erforderlich ist, um nach Abzug der Umwandlungsverluste den Verbrauchern Endenergie in der erforderlichen Menge zur Verfügung zu stellen. Im Jahr 2001 beträgt der Primärenergieverbrauch in NRW 3.963.459 Terajoule. Gemessen in Steinkohleeinheiten (SKE)[18] beträgt der Primärenergieverbrauch in NRW im Jahr 2001 rd. 135,24 Mio. t SKE.[19] Nach Abzug der Umwandlungs- und sonstigen Verluste verbleiben für den Endenergieverbrauch 2.308.401 Terajoule.[20]

---

16 Zur Stärkung des Anteils erneuerbarer Energien trat im April 2001 das Erneuerbare-Energien-Gesetz in Kraft. Vgl. Hennerkes, J. (2003), S. 11. Preisrisiken lassen sich in dem Maße senken, wie eine Abkoppelung der Nachfrage von den internationalen Rohölreserven gelingt und dem Rohölanteil ein geringeres Gewicht im nationalen Energiemix zukommt.

17 In der Schweiz wird ein Ansatz verfolgt, der die externen Kosten berücksichtigt, so dass Wirtschaftlichkeitsberechnungen in höherem Maße vergleichbar werden. Vgl. Kapitel 5.2, S. 177 ff.

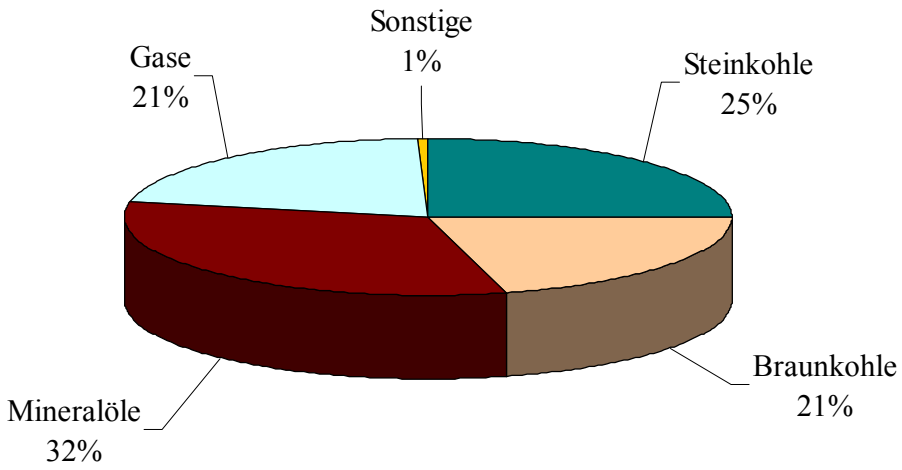
18 Zum Vergleich fossiler Energieträger wird oftmals die Steinkohleeinheit (SKE) als gemeinsame Bezugsgröße verwendet. Die SKE ist ein Maß für die Energiemenge, die bei der Verbrennung von bspw. einer Tonne Steinkohle frei wird. Vgl. BUND NRW (2004).

19 Vgl. Energiebroschüre Nordrhein-Westfalen (2001), Tabelle 4.6. Die Broschüre steht als Energiebroschüre_NRW_2001.pdf beim MVEL unter www.mvel.nrw.de zum Download zur Verfügung. Der Umrechnungsschlüssel zur Berechnung des Heizwertes in SKE beträgt 29.308 kJ/kg. Vgl. LDS NRW (2004 a).

20 Vgl. LDS NRW (2004 a).

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

Primärenergieverbrauch in NRW im Jahr 2001 nach Primärenergieträgern in v.H.



Eigene Darstellung LDS NRW (2004 a).

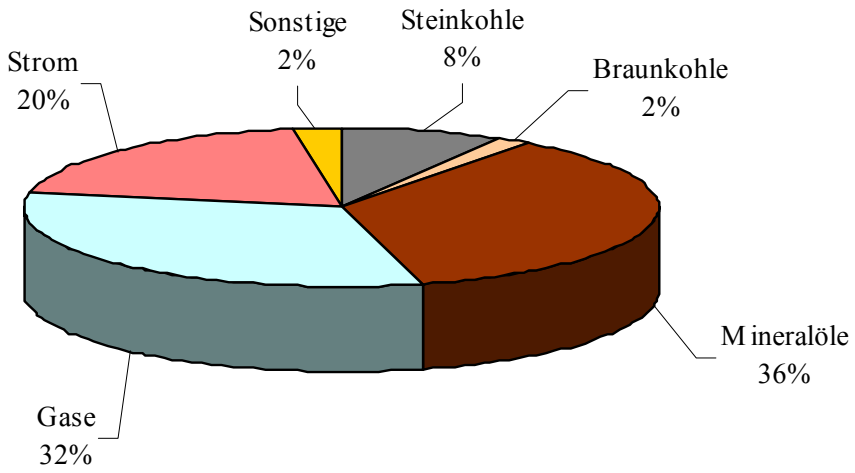
Die obige Abbildung verdeutlicht die Abhängigkeit der nordrhein-westfälischen Energiegewinnung von nicht-regenerativen Energieträgern: 99 % des Primärenergieverbrauchs basieren auf fossilen Energieträgern[21], sonstige Energieträger (z.B. Wasserkraft, Windkraft und Photovoltaik) werden zur Erzeugung von knapp 1 % des Primärenergieverbrauchs eingesetzt. Kernenergie kommt seit 1995 in NRW nicht mehr zum Einsatz.

Der Endenergieverbrauch in Höhe von 2.308.401 Terajoule lässt sich nach der vom Verbraucher genutzten Energieform wie folgt darstellen:

[21] Beispiele für fossile Brennstoffe sind Erdöl, Erdgas, Braunkohle und Steinkohle. Vgl. http://www.physikerboard.de/lexikon/index.php/Fossile_Energie, 09.09.2004.

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

Endenergieverbrauch in NRW im Jahr 2001 nach Energieträgern in v.H.



Eigene Darstellung nach LDS NRW (2004 a).

Die Verbraucher (Haushalte, Gewerbe und Verkehr) setzen nur zu 10 % die fossilen Brennstoffe Stein- und Braunkohle ein. Für Haushalte und im Verkehrsbereich spielen Stein- und Braunkohle als Endenergieträger keine nennenswerte Rolle. Mineralöl, Gas und Strom[22] sind die Energieträger, die im Wesentlichen zum Einsatz kommen. Während in den Haushalten und im Verarbeitenden Gewerbe in erster Linie Gas als Endenergieträger verwendet wird, findet der Einsatz von Mineralöl als Endenergieträger schwerpunktmäßig im Verkehr statt.

Einen Überblick über die Verwendung der Endenergieträger nach Verbrauchergruppen gibt die nachfolgende Tabelle:

[22] Zur Stromerzeugung wurden in NRW im Jahr 2001 folgende Primärenergieträger eingesetzt: 75 % Braun- und Steinkohle, 8 % Erdgas, 1 % Mineralöl und 6 % sonstige Energieträger (Wasser- und Windkraft, Fotovoltaik, Müll, Klärschlamm und –gas sowie Gichtgas). Siehe Abbildung „Primärenergie-Einsatz zur Stromerzeugung 1990 und 2001 sowie Mitteilung des MVEL vom 16.12.04.

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

Endenergieverbrauch nach Verbrauchergruppen in NRW im Jahr 2001 in Terajoule und v.H.						
	Stein- und Braunkohle	Mineralöl	Gas	Strom	Sonstige	Summ
Verarb. Gewerbe	205.704 (25 %)	76.755 (9 %)	279.061 (34 %)	236.016 (29 %)	20.863 (3 %)	818.399 (100 %)
Haushalte und Kleinverbraucher	23.887 (2 %)	236.883 (25 %)	456.364 (47 %)	214.967 (22 %)	32.491 (3 %)	964.591 (100 %)
Verkehr	30 (0 %)	513.950 (98 %)	127 (0 %)	8.906 (2 %)	2.398 (0 %)	525.412 (100 %)
Summe	229.621 (10 %)	827.588 (36 %)	735.552 (32 %)	459.889 (20 %)	55.752 (2 %)	2.308.402 (100 %)
Eigene Darstellung nach LDS NRW (2004a).						

2.3 Treibhausgas-Emissionen

Der Einsatz von Primärenergieträgern ist mit der Emission von Treibhausgasen verbunden. Durch diese Emissionen wird der natürliche Treibhauseffekt durch eine anthropogene Komponente verstärkt. Kohlendioxid (CO_2) ist mengenmäßig das wichtigste, für den anthropogenen Treibhauseffekt verantwortliche Treibhausgas. Daneben sind Methan, Distickstoffoxid, Fluorkohlenwasserstoffe, Schwefelhexaflourid sowie troposphärisches Ozon und Wasserdampf in der Stratosphäre als Treibhausgase anzuführen.[23] Global gesehen lässt die Zuordnung der Emissionen nach den verursachenden Wirtschaftssektoren erkennen, dass den Verbrennungen fossiler Energieträger im Energie- und Verkehrssektor mit einem Anteil von 50 % der größte Anteil am anthropogenen Treibhauseffekt zuzurechnen ist. Darüber hinaus tragen die Bereiche chemische Produktion mit 20 %, Brandrodungen mit 15 % und Landwirtschaft ebenfalls mit 15 % zum anthropogenen Treibhauseffekt bei.[24]

Den in NRW eingesetzten Primärenergieträgern lassen sich spezifische CO_2-Emissionsmengen zuordnen. Pro verbrannter Tonne SKE weisen Primärenergieträger die nachfolgenden CO_2-Emissionen[25] auf: Die CO_2-Emissionen je t SKE für Braunkohle betragen 3,25 t, für Steinkohle 2,68 t, für Erdöl 2,3 t und für Erdgas 1,5 t.[26]

Die Emissionsmengen entstehen in Abhängigkeit von den eingesetzten Brennstoffmengen und unabhängig vom Wirkungsgrad des Kraftwerkes. Der Wirkungsgrad ist relevant für die Leistung (Kilowattstunden pro t SKE) und beeinflusst damit die spezi-

23 Vgl. Rometsch, L. (1993), S. 5 und Energiebroschüre Nordrhein-Westfalen (2001), Tab. 7.2.

24 Vgl. Rometsch, L. (1993), S. 7.

25 Wie die Tabelle „CO_2-Emissionen verschiedener Energieträger“ zeigt, ist das in Tonnen angegebene Gewicht der CO_2-Emission teilweise erheblich höher als das Gewicht der eingesetzten Energieträger. Dieses ist darauf zurückzuführen, dass bei Verbrennungsvorgängen der Kohlenstoffanteil des Brennstoffs mit Sauerstoff aus der Atmosphäre zu Kohlendioxid reagiert. Vgl. Baumbach, Günter (1993), S. 14 ff.

26 Vgl. www.bund-nrw.de/braunkohle-aktuelles.htm.

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

fischen CO_2-Emissionen pro kWh.[27] Folglich erlaubt ein verbesserter Wirkungsgrad die Herstellung einer bestimmten Energiemenge mit reduziertem Primärenergieeinsatz und trägt auf diesem Weg zu Emissionsminderungen bei.

Auf der Grundlage des Primärenergieverbrauchs in NRW lassen sich im Jahr 2001 die folgenden CO_2-Emissionen ermitteln:

CO_2-Emissionen verschiedener Energieträger in NRW 2001				
	Braunkohle	Steinkohle	Mineralöl	Erdgas
CO2-Emission je t SKE:	3,25 t	2,68 t	2,3 t	1,5 t
Primärenergieverbrauch in Mio. t SKE	28,02	33,88	43,77	28,64
CO2-Emission in Mio. t	91,1	90,8	100,7	43,0
Eigene Berechnung auf der Grundlage der Emissionsdaten gem. www.bund-nrw.de/braunkohle-aktuelles.htm und des Primärenergieverbrauchs gem. Mitteilung des MVEL vom 05.07.2004.				

Der Einsatz der zuvor dargestellten Energieträger ist im Jahr 2001 mit Emissionen in Höhe von 325,6 Mio. Tonnen CO_2 verbunden. Den Angaben der Energiebroschüre Nordrhein-Westfalen zufolge werden im Jahr 2001 insgesamt rd. 330 Mio. t Treibhausgase emittiert.[28]

Treibhausgas-Emissionen (Kyoto-Gase) in NRW 1990 und 2001 (CO_2-Äquivalente)			
	Emissionen 2001 in Mio. Tonnen	Emissionen 1990 in Mio. Tonnen	Veränderungen gegenüber 1990
CO2 (Kohlendioxid)	305,3	345,9	-11,7 %
CH4 (Methan)	8,1	21,7	-62,5 %
N2O (Distickstoffoxid)	14,4	17,8	-19,1 %
HFC (wasserstoffhalt. Fluorkohlenwasserstoffe)	1,8	0,5	250 %
PFC (Perfluorierte Kohlenwasserstoffe)	0,4	0,7	-46,9 %
SF6 (Schwefelhexafluorid)	0,8	0,9	-18,8 %
Summe	**330,8**	**387,5**	**-14,8 %**
Vgl. Energiebroschüre Nordrhein-Westfalen (2001), Tabelle 7.2.			

27 Vgl. Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland (BUND): www.bund-nrw.de/braunkohle-aktuelles.htm vom 26.05.04.

28 Zu beachten ist, dass Industrieprozesse berücksichtigt sind, nicht jedoch die CO_2-Senken. Vgl. Energiebroschüre Nordrhein-Westfalen (2001), Tab. 7.2. Ferner ist darauf hinzuweisen, dass die dargestellten Kyoto-Gase unterschiedliche Klimawirksamkeiten aufweisen, die in den Emissionsmengen nicht hinreichend zum Ausdruck kommen. Zur Darstellung des Klimawirksamkeit von Treibhausgasen kann die Maßgröße „Global Warming Potential (GWP)“ verwendet werden. Dabei wird die Klimawirksamkeit eines Treibhausgases in Relation zur Emission von einem Kilogramm CO_2-Emission beschrieben. Als Ergebnis können CO_2-Äquivalente ermittelt werden. Diese betragen für Methan 21, Distickstoffoxid 310, wasserstoffhaltige Flourkohlenwasserstoffe 140 bis 11.700, perfluorierte Fluorkohlenwasserstoffe 6.500 bis 9.200 und Schwefelhexafluorid 23.900. Vgl. Ministerium für Wirtschaft und Mittelstand, Energie und Verkehr (MWMEV) NRW (2001), S. 244.

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

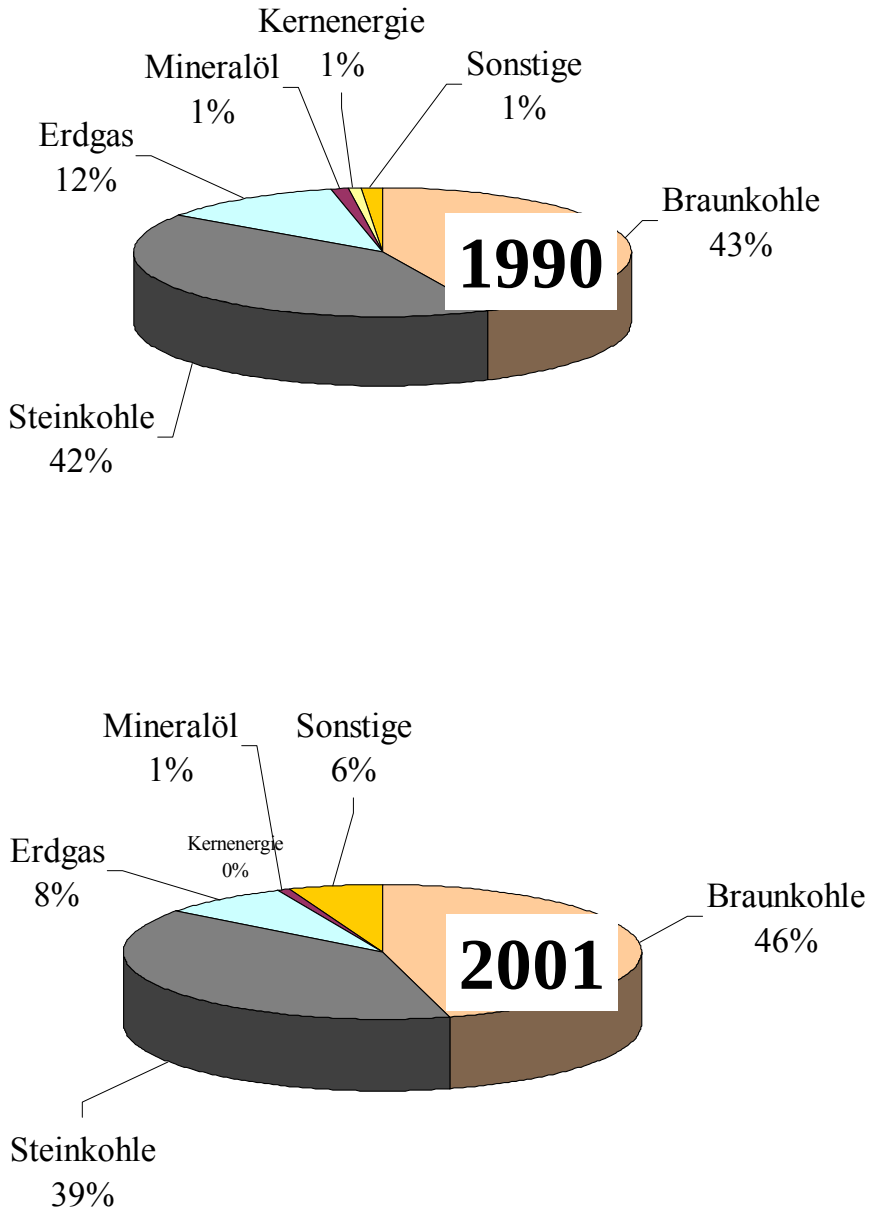
Insgesamt sind die nachfolgenden Merkmale kennzeichnend für die energiewirtschaftliche Situation in Nordrhein-Westfalen:

- Die Energieversorgung in Nordrhein-Westfalen basiert zu einem hohen Anteil (78 %) auf dem Einsatz fossiler Energieträger.
- Regenerative Energien spielen mit weniger als 1 % am Primärenergieeinsatz derzeit eine unbedeutende Rolle.
- Der Primärenergieverbrauch in Nordrhein-Westfalen befindet sich im Jahr 2000 mit 135,24 Mio. t SKE auf dem Niveau von 1990 (135,37 Mio. t SKE).
- Die Anteile der zur Stromerzeugung eingesetzten Energieträger haben sich seit dem Jahr 1990 nur geringfügig verändert, Strukturwandelprozesse haben scheinbar bislang in der Struktur des Primärenergieverbrauchs keinen signifikanten Niederschlag gefunden. Auch die Struktur der Bruttostromerzeugung nach Energieträgern im Jahr 2001 unterscheidet sich nur unwesentlich von der im Jahr 1990:[29]

[29] Vgl. Energiebroschüre Nordrhein-Westfalen (2001), Tab. 6.2.

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

Primärenergie-Einsatz zur Stromerzeugung 1990 und 2001 - Anteile in v.H. -



Vgl. Energiebroschüre Nordrhein-Westfalen (2001), Tab. 6.2. und Mitteilung des MVEL vom 05.07.04.

Im Jahr 2001 wurden in NRW rd. 330 Mio. Tonnen CO_2-Äquivalente emittiert, der Anteil der CO_2-Emissionen lag bei 92,5 %. Gegenüber dem Basisjahr 1990 war hinsichtlich der CO_2-Äquivalente ein um 14,8 % vermindertes Emissionsniveau festzustellen.

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

2.4 Handlungsbedarf und Untersuchungsgegenstand

Der Abgleich der energiewirtschaftlichen Situation mit den energie- und umweltpolitischen Zielsetzungen in NRW zeigt, dass weder die energiepolitischen noch umweltpolitischen Ziele erreicht sind. Hinsichtlich der energiepolitischen Zielsetzung der Versorgungssicherheit durch die Nutzung diversifizierter Primärenergien ist festzustellen, dass nach wie vor vornehmlich endliche Ressourcen zum Einsatz kommen. Der Anteil regenerativer Energie weist lediglich einen marginalen Betrag auf. Insgesamt ist derzeit noch keine Abkehr der Energieversorgung von fossilen Energieträgern in Sicht. Auch bei den umweltpolitischen Zielen droht eine Zielverfehlung. Zwar sind im Zeitablauf Verbesserungen der Treibhausgasemission eingetreten, die proklamierten umweltpolitischen Ziele sind jedoch längst nicht erreicht.

Insgesamt besteht aus energie- und umweltpolitischer Perspektive auch 30 Jahre nach der Ölkrise ein Handlungsbedarf in Bezug auf Strukturveränderungen in der Energieversorgung in Nordrhein-Westfalen. Zum einen ist der Einsatz regenerativer Energieträger zu Lasten endlicher Primärenergieträger zu erhöhen, zum anderen sind Treibhausgasemissionen noch stärker als in der Vergangenheit zu reduzieren. Aufgrund der hohen Zeitbedarfe, mit denen die erforderlichen Umstellungsprozesse verbunden sind, erlaubt die Inangriffnahme dieser Handlungsbedarfe keinen Aufschub.

In der aktuellen energiepolitischen Diskussion ist ein Vorschlag zu finden, der anscheinend sowohl der energiepolitischen Zielsetzung der Versorgungssicherheit als auch der umweltpolitischen Zielsetzung der Verminderung der Treibhausgasemission Vorschub leistet. Es handelt sich dabei um die Gewinnung und Nutzung von Wärme aus Abwasserkanalisationen mittels Wärmetauschern.[30]

Im vorliegenden Projekt wird untersucht, welchen Beitrag die Wärmerückgewinnung aus Abwasserkanälen zur Energieversorgung in Nordrhein-Westfalen leisten kann und welche umweltpolitischen Effekte in Bezug auf CO_2-Emissionen und Primärenergieeinsparungen zu erwarten sind. Die Untersuchung fußt zum einen auf den langjährigen Erfahrungen, die v.a. in der Schweiz mit dem Einsatz derartiger Systeme bestehen.[31] Zum anderen erfolgt die Untersuchung der Wärmetauscher in Abwasserkanalisationen v.a. mit Blick auf die Position der Netzbetreiber. Ferner sind auch die Anforderungen von Kläranlagenbetreibern zu berücksichtigen.

Die Netzbetreiber stellen eine zentrale Akteursgruppe dar, da sie ihre Abwasserkanäle für die Wärmerückgewinnung, d.h. für nicht abwasserbezogene Zwecke, zur Verfügung stellen müssten. Folglich knüpft die Kooperationsbereitschaft der Netzbetreiber inhaltlich an die Bedingung eines reibungslosen Betriebs der Entwässerungssysteme an. Und auch aus wirtschaftlicher Sicht dürfen die Netzbetreiber nicht schlechter gestellt sein als bei Verzicht auf die Verwendung von Wärmetauschern. Vor diesem Hintergrund wird ein Anforderungskatalog für Netzbetreiber entworfen, der als Check-Liste diejenigen Punkte enthält, die aus Sicht der Netzbetreiber erfüllt sein müssen, um in den Einbau und den Betrieb von Wärmetauschern in Abwasserkanalisationen einzuwilligen.

---

30 Die Rückgewinnung von Abwasserwärme ist bereits im Handbuch „Energie in Kläranlagen“ thematisiert. Siehe MUNLV (1999), S. 258 f.

31 Siehe hierzu Kapitel 3.1.5, S. 37 ff.

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

3 Wärmerückgewinnung in Abwasserkanälen

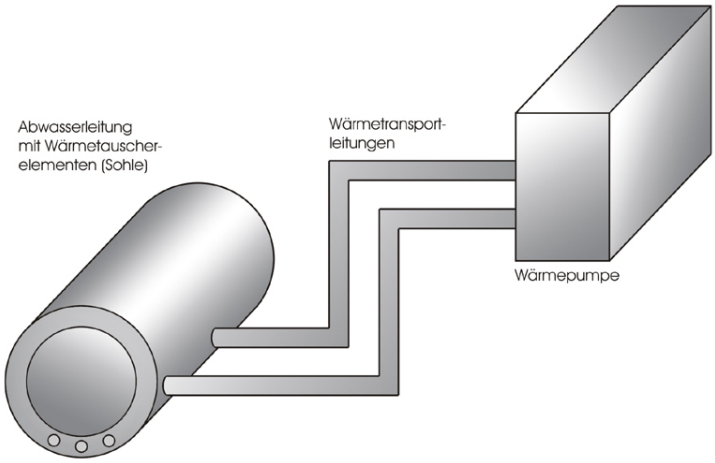
3.1 Technologie der Wärmerückgewinnung in Abwasserkanälen

3.1.1 Funktionsweise von Abwasserwärmenutzungs-Anlagen

Die Wärmerückgewinnung aus Abwasser stellt einen besonderen Anwendungsfall der Nutzung von Wärme zur Energiegewinnung dar. Dabei wird in einem Abwasserkanal ein sogenannter Wärmetauscher installiert, der dem Abwasser einen Teil seiner Energie entnimmt. Dies erfolgt durch ein im Wärmetauscher zirkulierendes flüssiges Medium. Das durch das Abwasser erwärmte Medium wird über Rohrleitungen (Wärmetransport) einer Wärmepumpe, dem Herzstück einer Wärmerückgewinnungsanlage, zugeführt. Eine Wärmepumpe bringt die gewonnene Wärme auf ein höheres Temperaturniveau und ermöglicht auf diese Weise das Beheizen von Gebäuden. Im Rücklauf wird das Wärmemedium wieder dem WT im Kanal zugeführt und der Kreislauf beginnt von Neuem. Darüber hinaus können Wärmepumpen ebenfalls für die Kühlung von Gebäuden eingesetzt werden. Im sog. inversen Betrieb wird ein Teil der in einem Gebäude befindlichen Wärme über die Wärmepumpe und –tauscher in das Abwasser abgeleitet.[32]

Einen Eindruck über die bei der Wärme bzw. Kältegewinnung notwendigen Bauteile vermittelt die der nachfolgende Abbildung.

Schematische Darstellung der Bauteile zur Wärme- bzw. Kältegewinnung aus Abwasser



IKT – eigene Darstellung

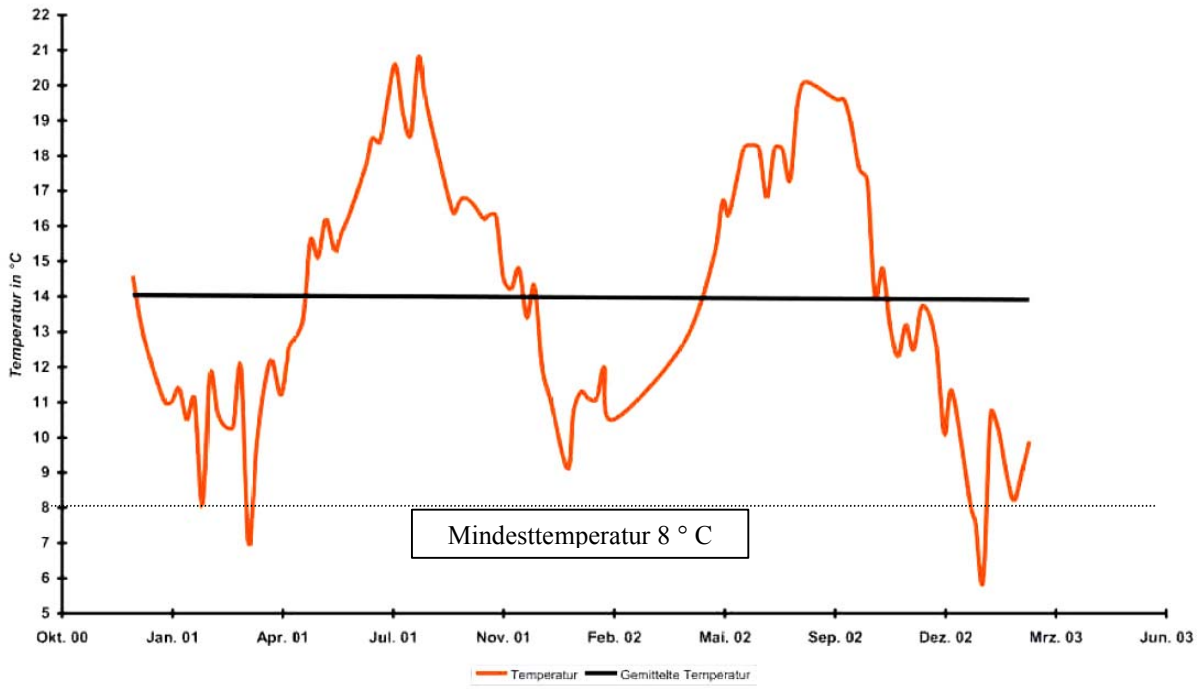
Abwasser transportiert Wärme und stellt daher möglicherweise eine interessante Ressource für die Wärmeversorgung dar. Die Mindesttemperatur für die Entnahme von Wärme aus der Kanalisation ist insofern durch Temperaturerfordernisse des Kläranlagenbetriebes definiert, als die Zulauftemperatur des Abwassers bei Eintritt in die Kläranlage 8° C nicht dauerhaft unterschrei-

[32] Der inverse WT-Betriebes zu Kühlung von Räumen funktioniert im Prinzip wie bei einem Kühlschrank: Eine Wärmepumpe sorgt dafür, dass es im Kühlschrank kalt ist. Die entstehende Wärme wird auf der Rückseite des Kühlschranks über die Kühlrippen wieder an

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

ten sollte.[33] Der in der nachfolgenden Abbildung dargestellte Temperaturverlauf, der in einem Mischwasserkanal am Hauptpumpwerk in Bremerhaven ermittelt wurde,[34] lässt erkennen, dass die Mindesttemperatur nur punktuell unterschritten wurde. Damit weist die Wärmequelle Abwasser einen Temperaturverlauf auf, der einen annähernd ganzjährigen Betrieb von Wärmetauschern ermöglicht.

Beispiel des jahreszeitlicher Verlauf der Abwassertemperatur (Mischwasser)



Modifiziert entnommen aus bea/prosys (2004), S. 13.

die Umgebung abgegeben. Die für diesen Prozess notwendige Energie wird in Form von Strom bereitgestellt, der die Wärmepumpe über einen Elektromotor betreibt.

33 Vgl. bea/prosys (2004), S. 12.

34 Die Temperaturen in Schmutzwasserkanalisationen werden v.a. im Winter auf einem höheren Niveau verlaufen, da bspw. der kühlende Einfluss von Zuflüssen zur Zeit der Schneeschmelze entfällt.

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

3.1.2 Betriebskennziffern zur Beschreibung von AWN-Anlagen

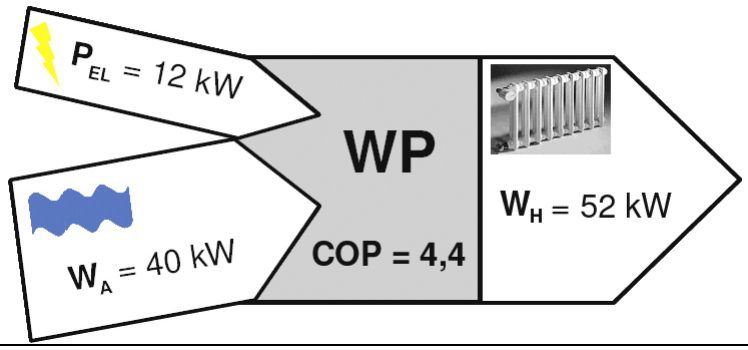
Wärmegewinnungssysteme mit Wärmetauschern lassen sich durch typische, definierte Kennwerte beschreiben. In der nachfolgenden Tabelle sind die maßgeblichen Kennwerte zusammengestellt.

Kennwerte zur Beschreibung von Wärmegewinnungssystemen mit Wärmtauschern

Abk.	Bezeichung	Beschreibung
W_A	Wärmeübertragungsleistung des WT	Die Wärmeübertragungsleistung eines Wärmetauschers (WT) errechnet sich mit der in Kapitel 3.1.3.1 (S. 27) beschriebenen Formel.
P_{EL}	Elektr. Antriebsleistung	Dieser Wert steht ausschließlich für die von der Wärmepumpe (WP) benötigte elektrische Antriebsleistung.
W_H	Nutz- oder Heizleistung	Dieser Wert gibt die thermische Nutz- oder Heizleistung einer WP an
COP	Leistungszahl	Mit der Leistungszahl (COP) einer Wärmepumpe wird die Nutz- oder Heizleistung W_H eine Wärmepumpe im Bezug auf die benötigte elektrische Antriebsleistung P_{EL} dargestellt. Die Heizleistung ergibt sich aus der Summe P_{EL} und der mittels Wärmetauscher entnommenen Wärme aus dem Abwasser W_A. Der COP-Wert wird im Prüfstand nach DIN EN 255[35] bei Normbedingungen ermittelt. Es existiert immer nur ein COP-Wert für einen bestimmten Betriebspunkt der Wärmepumpe.
JAZ	Jahresarbeitszahl	Die Jahresarbeitszahl bildet das Verhältnis der in einer Heizperiode erzielten Wärme zur eingesetzten Antriebsenergie ab. Die Energieeffizienz einer Abwasser-Wärmepumpe ist durch ihre Jahresarbeitszahl (JAZ) gekennzeichnet.

Der Unterschied zwischen Leistungszahl (COP) und Jahresarbeitszahl (JAZ) liegt vor allem darin, dass bei der COP-Wert-Messung ausschließlich die Wärmepumpe betrachtet wird. In die ermittelte Jahresarbeitszahl können hingegen bspw. Wärmeverluste durch Transportleitungen einfließen. Es wird ausschließlich das Endprodukt Wärme ins Verhältnis zu der eingesetzten Antriebsenergie gesetzt.

Ermittlung der Leistungszahl COP



Vgl. Bundesamt für Energie (2004), S. 2.

[35] DIN EN 255-3, Ausgabe:1997-07 Luftkonditionierer, Flüssigkeitskühlsätze und Wärmepumpen mit elektrisch angetriebenen Verdichtern - Heizen - Teil 3: Prüfungen und Anforderungen an die Kennzeichnung von Geräten zum Erwärmen von Brauchwasser (enthält Berichtigung AC:1997); Deutsche Fassung EN 255-3:1997 + AC:1997.

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

3.1.3 Bestandteile von Anlagen zur Nutzung von Abwasserwärme

3.1.3.1 Wärmetauscher

Anlagen zur Nutzung der Abwasserwärme, die zur Beheizung, Warmwasseraufbereitung und Klimatisierung eingesetzt werden, verfügen im Wesentlichen über drei Bestandteile: WT-Elemente, Wärmepumpen und Transportleitungen.

Innerhalb der Kette von Gewinnung, Transport, Temperaturanhebung und Nutzung der Wärme stellen die WT den Ausgangspunkt dar. WT sind diejenige Verbindung der AWN-Anlage zur Umwelt, in der sich die Wärmeübertragung vom Abwasser auf das im WT zirkulierende Medium ereignet.

Die Wärmeübertragungsleistung W_A des Wärmetauschers ist abhängig von der nutzbaren Wärmetauscher-Oberfläche A_{WT} [m²], der mittleren Temperaturdifferenz ΔT [K] zwischen Wärmetauscher-Medium und Abwasser sowie dem Wärmedurchgangskoeffizienten k [W/(m²*K)][36] des Wärmetauschers. Der mathematische Zusammenhang ist durch die folgende Formel gegeben:

$$\mathbf{W_A = k * A_{WT} * \Delta T}$$

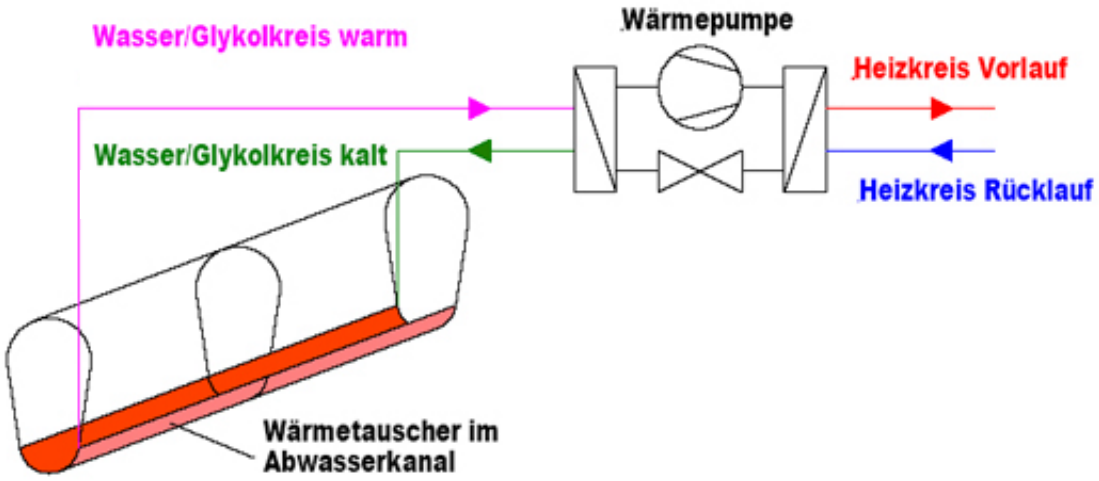
Der Wärmedurchgangskoeffizient k ist als ein Maß für den Widerstand, den die Wärmetauscher-Oberfläche dem Wärmestrom entgegensetzt, vom Wärmetauscher-Typ und den Strömungsverhältnissen der am Wärmeaustausch beteiligten Medien abhängig.

In der nachfolgenden Abbildung ist der Ablauf der Wärmerückgewinnung aus Abwasserkanälen schematisch dargestellt. Über die rot im Kanal markierte Fläche wird die Wärme des Abwasser auf das Wärmemedium, hier ein Wasser-Glykol-Gemisch, übertragen. Es handelt sich dabei meistens um eine in der Kanalsohle angebrachte Edelstahlkonstruktion, die wegen ihrer hohen Wärmeleitfähigkeit die Wärme des Abwasser dem Wärmemedium zuführt.

[36] Der Wärmedurchgangskoeffizient k beschreibt die Fähigkeit eines Materials, Wärme zwischen zwei flüssigen oder gasförmgen Medien zu übertragen. Je höher der Koeffizient k ist, desto geringer ist der Widerstand, den ein Material der Wärmeübertragung entgegensetzt. Umgekehrt weist ein Material mit einem geringen Wärmedurchgangskoeffizient hohen Wärmedämm-Eigenschaften auf. Vgl. www.energieinfo.de/glossar/node186.html, 03.12.04 sowie www.oekoplus.de/fp/archiv/bauglossar/Waermedurchgangskoeffizient.php, 03.12.04.

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

Schema Abwasser-Wärmetauscher



Modifiziert entnommen aus Wärmeversorgung Binningen AG (2002), S. 3

Wie die obigen Darstellungen zeigen, ist die Wirksamkeit von AWN-Anlagen auf der Ebene der WT-Elemente beeinflusst durch

- die Temperaturdifferenz zwischen Abwasser und WT-Medium sowie
- den Wärmedurchgangskoeffizienten k des verwendeten WT-Materials.

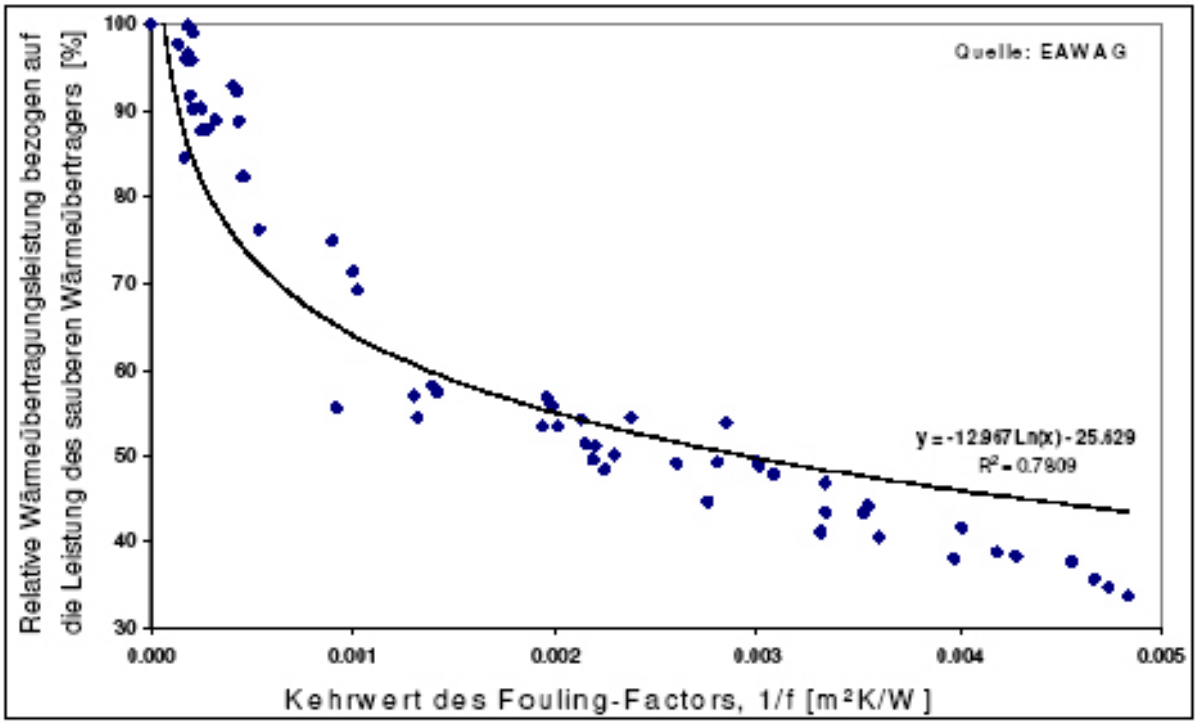
Je größer die Temperaturdifferenz zwischen Abwasser und Wärmemedium bzw. je höher der Wärmedurchgangskoeffizient k des WT ist, desto mehr Wärmeenergie kann unter ansonsten gleichen Bedingungen in der Abwasserkanalisation gewonnen werden. Eine effektivere und damit vergleichsweise wirtschaftlichere Ausnutzung der vorhandenen Wärmeenergie wäre die Folge.

Bei der Beurteilung der Effektivität der Wärmeübertragung muss jedoch zugleich berücksichtigt werden, dass in Kanälen infolge von Biofilmbildung eine Behinderung der Wärmeübertragung stattfindet. Folglich muss die Minderung des durch den materialspezifischen Wärmeübertragungskoeffizient k definierten Wärmeübertrags durch einen weiteren Faktor berücksichtigt werden. Dieses geschieht mittels des sog. „Fouling-Factor“ f [W/(m^2*K)], bzw. dessen Kehrwert 1/f [m^{2}K/W], der den zusätzlichen Wärmeübertragungs-Widerstand des Biofilms repräsentiert. Untersuchungen haben ergeben, dass sich – bezogen auf die Leistung des sauberen Wärmetauschers – die Wärmeübertragungsleistung durch Biolfilmbildung um bis zu 60 % verringern kann.[37]

[37] Zur Quantifizierung des Zusammenhangs zwischen Verschmutzung und Leistung des Wärmetauschers siehe Wanner, O. et al. (2003 b), S. 3 ff.

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

Wärmeübertragungsleistung in Abhängigkeit von der Biofilmbildung



Vgl. Wanner, O. et al. (2003b), S.4.

Zudem hat auch das Kanalgefälle einen Einfluss auf die Wärmeübertragungsleistung W_A, da eine höhere Fließgeschwindigkeit des Abwassers, eine geringere Kontaktzeit mit der Wärmetauscheroberfläche zur Folge hat. Bei der Bemessung der Wärmetauscheroberfläche A_{WT} können nun die biofilmbedingte Minderung der Effektivität des WT ebenso wie Variationen der Fließgeschwindigkeit[38] berücksichtigt und durch Verwendung einer entsprechend höheren Anzahl von WT-Elementen kompensiert werden. Insgesamt erlaubt die modulare Bauweise der Wärmetauscherelemente, je nach Wärmebedarf Elemente hinzuzufügen und somit die Wärmetauscheroberfläche A_{WT} auf das erforderliche Maß zu erhöhen.[39]

Über die Lebensdauer von Abwasser-Wärmetauschern liegen zur Zeit noch keine umfassenden Langzeiterfahrungen vor. Eine einzelne Erfahrung mit einer Abwasserwärmepumpenanlage in Basel, Schweiz, zeigt, dass sich der Wärmetauscher seit 20 Jahren in einem störungsfreien Betrieb befindet. Bei gutem Unterhalt (periodische Kontrolle, Reinigung, Wartung) wird die mittlere Lebensdauer auf 30 bis 50 Jahre eingeschätzt. Sie liegt damit doppelt so hoch wie die Lebensdauer der zugehörigen Wärmepumpe.[40]

---

38 Vom Kanalgefälle und damit von der Fließgeschwindigkeit des Abwassers geht ein Einfluss auf die Wärmeübertragungsleistung W_A aus, da eine höhere Fließgeschwindigkeit des Abwassers eine geringere Kontaktzeit mit der Wärmetauscheroberfläche zur Folge hat.

39 Üblicherweise werden WT-Elemente mit einer Länge von ca. 3 m verwendet. In Kapitel 3.2. sind einige der heute üblichen Wärmetauschersysteme dargestellt.

40 Vgl. Ryser Ing. AG: Praxiserfahrungen in der Schweiz, 1. Entwurf, S. 20.

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

3.1.3.2 Wärmepumpen

Eine Wärmepumpe ist ein Aggregat, das Wärme von einem (Gewinnungs-)Medium mit einem relativ niedrigen Temperaturniveau unter Zufügung von Antriebsenergie auf ein (Nutzungs-)Medium überträgt und dieses auf ein vergleichsweise hohes Temperaturniveau hebt. Damit eignet sich eine Wärmepumpe grundsätzlich für die Nutzbarmachung der in Abwasserkanalisationen gewonnenen Wärme zu Heizzwecken. Die Wärme wird aus dem Abwasser bei Temperaturen von etwa 10 – 15 °C (Jahresmittel) gewonnen und – je nach Art der Wärmepumpe – mit bis zu 65 °C an die Heizung abgegeben.[41]

Die Aufgabe der Wärmepumpe besteht in dem Anheben der Temperatur auf ein nutzbares Niveau. Dieser Temperaturhub findet unter Zuführung von Antriebsenergie statt. Je höher der zur Nutzung der Wärmeenergie geforderte Temperaturhub ist,[42] desto höher ist c.p. der erforderliche Einsatz von Antriebsenergie.

Hinsichtlich der Funktionsweise lassen sich zwei Arten von Wärmepumpen unterscheiden: Kompressions- und Sorptionswärmepumpen.

In Kompressions-Wärmepumpen zirkuliert ein Medium mit einem niedrigen Siedepunkt. Dieses verdampft infolge der Wärmezufuhr durch das in der Kanalisation erwärmte Gewinnungsmedium. Das entstehende Gas wird dann mittels eines Kompressors verdichtet. Dieser Vorgang geht mit einer weiteren Temperaturerhöhung einher. Sodann erfolgt der Wärmetransfer an das Nutzungsmedium, wobei das Übertragungsmedium abkühlt und nach Passieren eines Expansionsventils wiederum im flüssigen Aggregatszustand für die erneute Wärmeaufnahme im Kreislauf zur Verfügung steht. Das Funktionsweise einer Kompressions-Wärmepumpe ist schematisch nochmals in der nachfolgenden Abbildung dargestellt.

Für den Antrieb von Wärmepumpenkompressoren werden überwiegend Elektromotoren eingesetzt. Bei größeren Einheiten (>100 kW Heizleistung) können Wärmepumpen auch durch Dieselmotor angetrieben werden. Dabei lässt sich die Abwärme der Motorkühlung und der Abgase energetisch nutzen.[43]

---

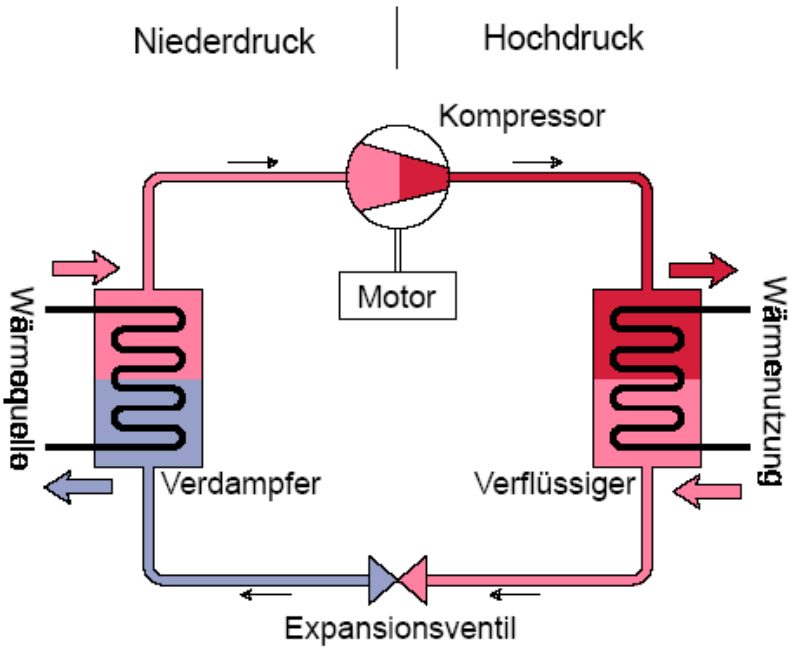
41 Vgl. Sanner, B. (o.J.) , S. 1 f.

42 Dieser hängt bspw. ab von der Vorlauftemperatur des Gewinnungsmediums, vom verwendeten Heizungssystem und von der Wärmedämmung der zu versorgenden Liegenschaft.

43 Vgl. Sanner, B. (o.J.) , S. 2.

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

Schematische Darstellung einer Kompressions-Wärmepumpe



Sanner, B. (o.J.) , S. 2.

Bei Sorptionswärmepumpen findet die Wärmeübertragung mittels reversibler physkalisch-chemischer Prozesse statt. Der Prozess der Wärmeübertragung und –hebung ist insgesamt komplexer als bei Kompressionswärmepumpen. Die grundlegende Technologie besteht darin, dass die Wärmezufuhr durch das Gewinnungsmedium zunächst zur Trennung des Übertragungsmediums in zwei Stoffe führt. Die Stoffe geben bei der Wiederzusammenführung (Rekombination) Wärme frei.[44]

Interessant gestalten sich die Möglichkeiten zur Einbindung von Wärmepumpen in das Heizsystem von Liegenschaften. Verschiedene Strategien des Betriebs sind möglich:

- monovalenter Betrieb

  In dieser Betriebsform versorgt die Wärmepumpe zu jeder Zeit alleine die Heizung und ggf. auch die Warmwasserbereitung.[45]

- bivalenter Betrieb

  Beim bivalenten Betrieb versorgt neben der Wärmepumpe ein weiterer Wärmeerzeuger, meist ein Öl- oder Gaskessel, die Heizung. Bivalenter Betrieb ist auch bei der Wärmerückgewinnung aus Abwasser sinnvoll, da eine Spitzen-

[44] Verwendung findet oftmals eine Kombination aus einem Lösungsmittel (z.B. Wasser) und einem Arbeitsmittel (z.B. Ammoniak). Vgl. Sanner, B. (o.J.) , S. 3 f.

[45] Vgl. Sanner, B. (o.J.), S. 10.

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

lastversorgung durch eine Wärmepumpe nicht wirtschaftlich ist. Zudem sprechen Gründe der Versorgungssicherheit für den Einsatz eines bivalenten Systems.

Im bivalenten Betrieb sind zwei Varianten der Zuschaltung des zusätzlichen Heizungssystems möglich:

- Im bivalent-additiven bzw. bivalent-parallelen Betrieb wird der zusätzliche Wärmeerzeuger zur Wärmepumpe hinzugeschaltet, wenn diese den Wärmebedarf nicht mehr alleine decken kann.[46] Folglich muss die Kapazität des zusätzlichen Heizungssystem mindestens so ausgelegt sind, dass die Differenz zwischen Spitzen- und Grundlastbedarf (wird durch WP versorgt) gedeckt wird. Aus Sicherheitsgründen wird die Kapazität des ergänzenden Heizungssystem oftmals auf die gesamte Spitzenlast ausgelegt.

- Im bivalent-alternativen Betrieb übernimmt der zusätzliche Wärmeerzeuger bei Unterschreitung einer bestimmten Außentemperatur komplett die gesamte Wärmeversorgung,[47] d.h. die Kapazität des alternativen Heizungssystems muss an der Spitzenlast ausgerichtet werden.

3.1.3.3 Wärmetransportleitungen

Die Wärmetransportleitungen stellen das Bindeglied zwischen den WT-Elementen und den Wärmepumpen dar: Durch die Wärmetransportleitungen zirkuliert das Gewinnungsmedium zwischen Wärmetauscher und Wärmepumpe.

Sofern Teile der Transportleitungen durch Kanalisationsabschnitte und Schächte verlaufen, sind diese so einzubauen, dass sie den Abfluss im Kanal nicht behindern.

Um die Kosten, Druck- und Wärmeverluste möglichst gering zu halten, sollten Leitungswege kurz gehalten werden. Mit Hilfe des Tichelmann-Systems (siehe nachfolgende Abbildung) können Druck- und Wärmeverluste im Übertragungskreislauf minimiert werden.[48] Bei der Rohrführung nach Tichelmann ist die Summe der Längen der Vor- und Rücklaufleitungen an jeder Stelle im Rohrsystem annähernd gleich groß. Im Prinzip hat jedes Wasserteilchen die gleiche Wegstrecke zurückzulegen, gleichgültig welchen Weg es im Rohrsystem nimmt. Bei entsprechender Dimensionierung der einzelnen Teilstrecken zeichnet sich das Tichelmann-System dadurch aus, dass ein hydraulischer Abgleich stark vereinfacht wird oder so gut wie gar nicht nötig ist. Wurde die Rohrführung nach Tichelmann früher in erster Linie bei Heizungsanlagen mit ausgedehnten Verteilsystemen angewandt, so werden heutzutage zumeist Apparate oder Heiz- und Kühlflächen, wie z.B. Kollektoren, Wand- und Deckenheizungen bzw. –kühlflächen sowie Boileranlagen (wie Speichersysteme für erwärmtes Trinkwasser) im Tichelmann-System verschaltet, um längere Aufenthaltszeiten in den Leitungen zu vermeiden.[49]

---

46 Dies ist nach Sanner nur möglich, wenn die höhere Heizleistung bei Vor- und Rücklauftemperaturen geliefert werden kann, die für die Wärmepumpe noch verträglich sind. Vgl. Sanner, B. (o.J)., S. 10.

47 Vgl. Sanner, B. (o.J), S. 10.

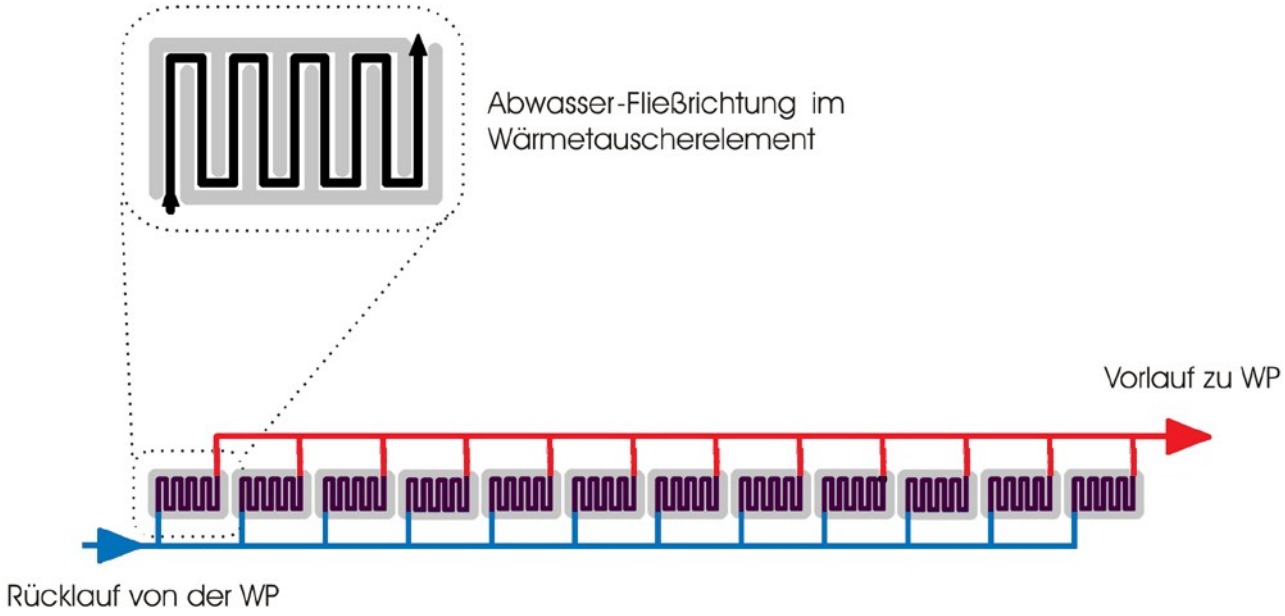
48 Das Tichelmann-System ist kein eigenes WT-System, sondern eine Art des Anschlusses der Vor- und Rücklaufleitungen. Es wird nicht jedes WT-Modul einzeln an den Wärmetransportkreislauf angeschlossen, sondern die Module werden in Gruppen parallel mit den Leitungen verbunden. Derartige Systeme werden bspw. angewendet in Binningen, Zwingen und Wipkingen. Vgl. Kapitel 3.1.5.2, S. 37 ff.

49 www.baunetz.de, BauNetz Online-Dienst GmbH & Co. KG; Schlüterstraße 42; 10707 Berlin.

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

Die Wärmetransportleitungen werden dann über den Zugangsschacht der Haltung aus der Kanalisation geführt und zur Wärmepumpe der Heizzentrale des zu beheizenden Gebäudes weiter geleitet. Zumeist bestehen die Wärmetransportleitungen aus PE.

Schematische Darstellung des Tichelmann-Systems



IKT – eigene Darstellung

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

3.1.4 Grundlegende Wärmetauschersysteme – Beitrag von Beat Kobel (Ryser Ingenieure AG)

Neben der Wärmepumpe selbst ist der Wärmetauscher das zentrale Element einer Abwasserwärmenutzungsanlage. Er stellt das Verbindungsglied (Wärmeübertrager) zwischen der Wärmequelle Abwasser und der Wärmepumpe, die die Abwasserwärme schließlich in nutzbare Heizwärme umwandelt, dar.

Beim Einsatz von gereinigtem Abwasser als Wärmequelle kommen herkömmliche, auch in der Industrie oft verwendete kompakte Lamellen- oder Plattenwärmetauscher aus Edelstahl in Frage. Bei der im vorliegenden Bericht beschriebenen Anlage in Muri wird ein solcher Wärmetauscher eingesetzt.

Bei der Wärmeentnahme aus Kanalisationen können solch kleine und kompakte Wärmetauscher aufgrund der größeren Verschmutzungs- und Verstopfungsgefahr infolge der stark verschmutzten Wärmequelle Rohabwasser (u. a. auch Grobstoffe) nicht eingesetzt werden. Dafür braucht es aufwendigere Systeme mit größerem Platzbedarf. Die im Rohabwasser der Kanalisationen eingesetzten Wärmetauscher-Systeme bestehen aus hochwertigem rostfreiem Chromnickel-Stahl und verfügen über glatte Oberflächen für die Verhinderung von Ablagerungen. Sie sind vorzugsweise modular aufgebaut, so dass je nach Wärmebedarf einzelne Module hinzugefügt werden können und die einzelnen Module einfach in die Kanalisation gebracht werden können.

Die Wärmetransportleitungen, durch die der Vor- und Rücklauf des Wärmemediums erfolgt, werden entweder offen im Kanal verlegt oder im WT-Element bzw. im Kanal integriert. Letzteres ist nur beim Neubau von Kanalisationen oder Einsatz eines Bypasses mit eingebautem Wärmetauscher möglich, da der Einbau von Wärmetauschern und Vor-/Rücklaufleitungen im Werk erfolgt. Bei der Montage von Wärmetauschern in bestehenden Kanalisationsleitungen ist dies nicht möglich. Wichtig ist in jedem Fall, dass jegliche wärmetauscherbedingte Einbauten im Kanal dessen erforderliche Abflusskapazität nicht relevant vermindern.

Es gibt heute auf dem Markt geeignete Wärmetauscher-Systeme für alle Kanalformen (Rechteck-, Kreis-, Oval-, Gewölbe-Profile). Die nachfolgenden Abbildungen zeigen einen beispielhaften Ausschnitt bestehender Systeme.

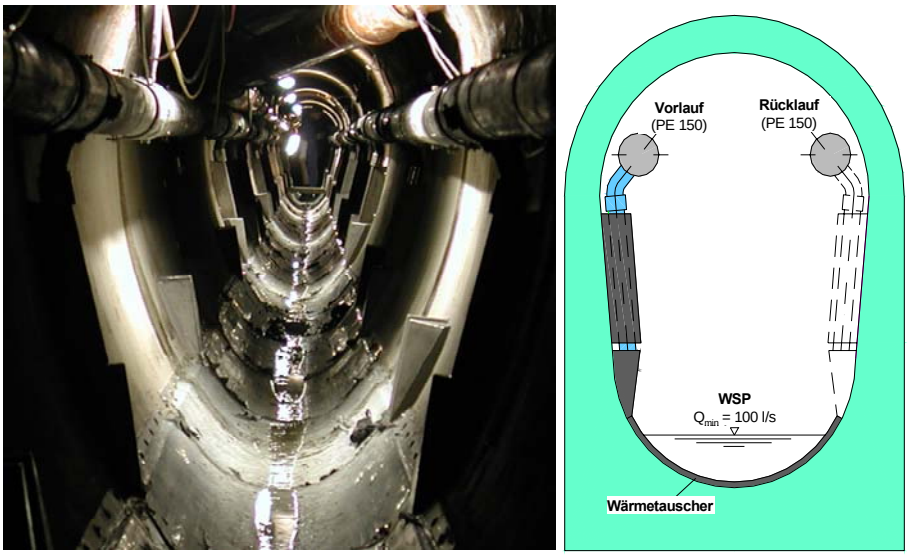
Rinnenwärmetauscher mit glatter Oberfläche für Kanäle mit Kreisprofil

Der Wärmetauscher wird als Trockenwetterrinne inkl. unterhalb angebrachter Vor- und Rücklaufleitungen eingegossen (einzelne verbundene Wärmetauscher-Elemente von ca. 3 m länge). Einsetzbar ab Kanaldurchmessern von ca. 1 m. Eingesetzt in Zürich-Wipkingen. **Vorteil**: hydraulisch günstig, da kaum störende Einbauten. **Nachteil**: großer Querschnittsverlust in der Kanalisation.

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

Rinnenwärmetauscher mit glatter Oberfläche für Kanäle mit Rechteckprofil

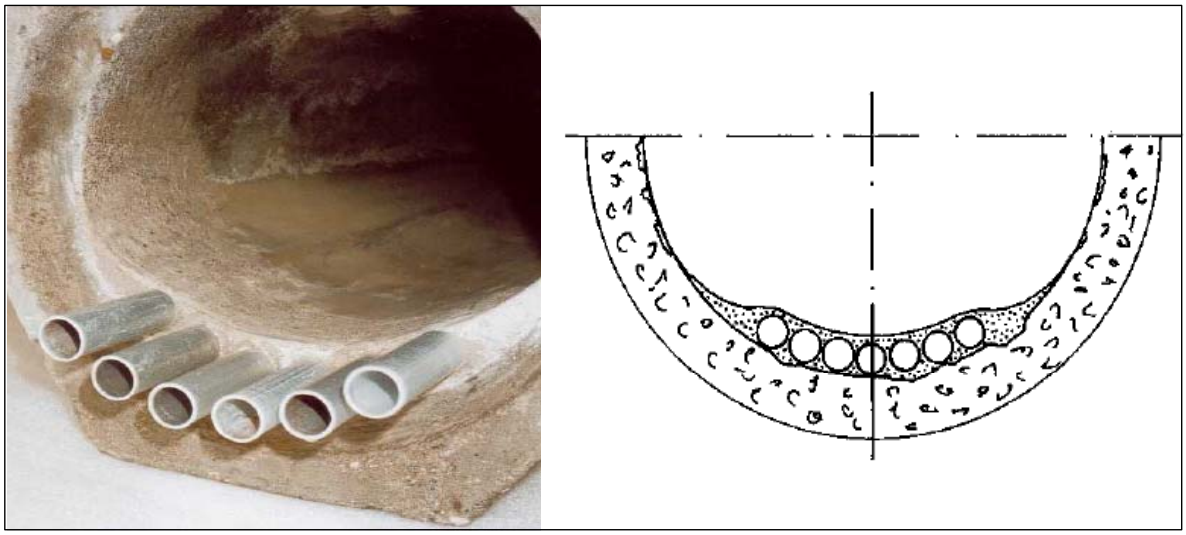
Eingesetzt in Zwingen. **Vorteile**: Der Wärmetauscher ist auch bei geringen Abflussmengen komplett überströmt (demgegenüber kann es bei Kreis- oder Ovalprofilen bei geringen Abflussmengen der Fall sein, dass nicht die gesamte Wärmetauscher-Oberfläche überströmt wird, was zu einer Leistungsverminderung führt), kaum Querschnittsverlust. **Nachteil**: Anschlüsse an Vor-/ Rücklaufleitungen bilden hydraulische Hindernisse, an denen Grobstoffe hängen bleiben können. Um dem entgegen zu wirken und für die Verringerung von Turbulenzen werden Abweisbleche oder Verschalungen montiert.



Rinnenwärmetauscher mit glatter Oberfläche für Kanäle mit Ovalprofil.

Eingesetzt in Binningen. **Vorteil**: kein grosser Querschnittsverlust.
Nachteil: Verbindungskupplungen und Anschlüsse an Vor-/ /Rücklaufleitungen bilden hydraulische Hindernisse, an denen Grobstoffe hängen bleiben können. Um dem entgegen zu wirken und für die Verringerung von Turbulenzen werden Abweisbleche oder Verschalungen montiert.

© 2005 All rights reserved by GEK mbH



Rohrwärmetauscher
Der Wärmetauscher besteht aus Chromstahlrohren, die direkt mit Spezialmörtel in die Kanalsohle vergossen werden (noch keine Praxiserfahrungen vorhanden). **Vorteil**: kaum Querschnittsverkleinerung. **Nachteil**: zusätzlicher Wärmedurchgangswiderstand durch Mörtel, das Abwasser ist nicht direkt mit dem Wärmetauscher in Berührung. Dies bedeutet schlechtere k-Werte.

Rinnenwärmetauscher als vorgefertigte Elemente
Wärmetauscher inkl. Vor- und Rücklaufleitungen mit entsprechenden Anschlüssen werden im Werk direkt ins Kanalisationsrohr eingearbeitet. Eingesetzt in Winterthur-Wülflingen (Zürich, Schweiz). **Vorteile**: keinerlei Abflussbehinderung da dimensionierter Rohrquerschnitt, kostengünstig, bei vollgefüllten Rohren (z.B. Abzweigung eines Teil-Abwasserstroms unter Druck) ist es mit diesem System auch denkbar, den Wärmetauscher über den ganzen inneren Rohrumfang auszuführen (Oberflächenvergrößerung). **Nachteil**: nur bei Kanalisations-Neubauten einsetzbar.

Darstellung: Ryser Ingenieure AG

Beim Einbau von Wärmetauschern in Kanalisationen sind grundsätzlich zwei Varianten möglich:

Der Wärmetauscher wird direkt im Abwasserkanal montiert bzw. der Abwasserkanal dient direkt als Wärmequelle: Dabei muss der Kanal einen Mindestquerschnitt von DN 800 aufweisen, er sollte noch mehrere Jahre in Betrieb bleiben und in gutem Zustand sein. Beim Ersatz oder Neubau eines Kanals können vorgefertigte Kanalelemente mit integriertem Wärmetauscher eingesetzt werden, minimaler Kanaldurchmesser ist kleiner als DN 800.

Alternativ wird der Wärmetauscher im oder als Bypass eines Kanals ausgeführt: Dabei wird der Abfluss des Abwassers im Hauptkanal während der Bauzeit praktisch nicht gestört, und es kann auf eine aufwendige Abwasserumleitung verzichtet werden. Kanaldurchmesser und Wärmetauscher können genau auf die benötigte Abwassermenge ausgelegt werden.

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

3.1.5 Anwendungserfahrungen in der Schweiz – Beitrag von Beat Kobel (Ryser Ingenieure AG)

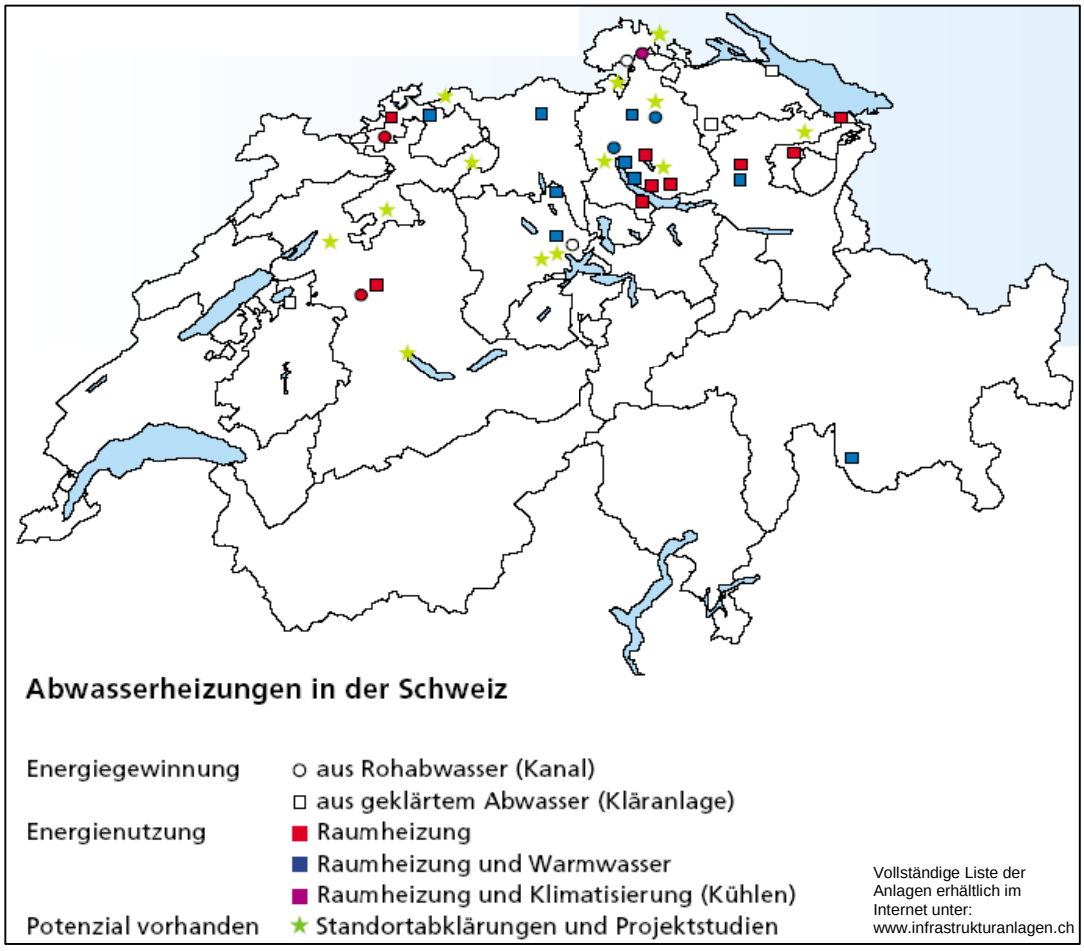
3.1.5.1 Einleitenden Vorbemerkungen

Hauptteil dieses Kapitels bildet die Beschreibung von einigen repräsentativen Beispielen bestehender Anlagen in der Schweiz mit den entsprechenden Betriebsweisen und Erfahrungen, insbesondere im Bezug auf die Inhaber und Betreiber des Kanalisationsnetzes. Zudem werden exemplarisch einige WT-Systeme dargestellt.

3.1.5.2 Praxisbeispiele aus der Schweiz

In der Schweiz wurden innerhalb der letzten 20 Jahre neben zahlreichen Potenzialstudien bereits in zahlreichen Gemeinden und Städten Standortabklärungen und Machbarkeitsstudien durchgeführt und bis heute rund 20 Abwasserwärmenutzungsanlagen realisiert.

Übersicht Abwasserwärmenutzung in der Schweiz



Darstellung: Ryser Ingenieure AG

Unter den in der Schweiz realisierten und in Betrieb stehenden Anlagen wurden für den vorliegenden Abschnitt fünf Anlagen näher betrachtet. Diese Anlagen werden in den folgenden Kapiteln unabhängig voneinander, aber unter gleichen Gesichtspunkten beschrieben.

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

Als Informationsquelle wurden Projektberichte und Betriebsanalysen (siehe Literaturverzeichnis) sowie einzelne Gespräche mit Contractoren und Anlagenbetreibern verwendet.

3.1.5.2.1 Binningen

(1) Wärmeverbraucher

Seit Ende 2001 versorgt die Wärmeversorgung Binningen AG (WBA) in Binningen (Vorortsgegemeinde der Stadt Basel mit 14.000 Einwohnern) 61 Gebäude (300 Wohnungen) mit verschiedener Nutzung (Schulhaus, Gemeindeverwaltung, private Bauten) in einem Wärmeverbund mit insgesamt rund 4.800 kW abonnierter Leistung.

(2) Finanzierung/Contracting

Die WBA ist eine 1984 gegründete Aktiengesellschaft mit der zu 75 % beteiligten Einwohnergemeinde Binningen und der zu 25 % beteiligten Elektra Birseck Münchenstein EBM (regionales Elektrizitätsversorgungsunternehmen) als Aktionäre. Sie bezweckt den Bau und Betrieb von zentralen Energieversorgungsanlagen zur Wärmeversorgung von privaten und öffentlichen Gebäuden in der Gemeinde Binningen. Die Wärmekunden sollen sicher, ausreichend, kostengünstig und entsprechend der von der Bevölkerung beschlossenen Energiepolitik möglichst umweltschonend mit Wärme versorgt werden. Nicht zuletzt aus diesem Grund wurde die Abwasser-Wärmepumpenanlage als Pilot- und Demonstrationsprojekt mit Unterstützung des Bundesamtes für Energie realisiert und der Betrieb überwacht. Die Investitionskosten für die gesamte Wärmepumpenanlage beliefen sich auf rund 0,7 Mio €. Nach Planung und Bau erfolgen auch die professionelle Betreuung der Anlage durch die WBA bzw. die EBM in eigener Verantwortung.

(3) Technik

Die Grundlast für Heizwärme und Warmwasseraufbereitung wird mittels einer Abwasser-Wärmepumpe mit Nutzung der Wärme aus dem Abwasser der nahe gelegenen Kanalisation (Distanz Kanalisation - Heizzentrale ca. 70 m) und zweier Blockheizkraftwerke (BHKW) und geliefert. Der Strom für den Antrieb der Wärmepumpen stammt aus den BHKW. Für Spitzenlasten (besonders kalte Tage) oder Notfälle (Ausfall der Wärmepumpe oder der BHKW) stehen konventionelle Gas- und Ölheizkessel bereit. Die nachfolgende Übersicht beinhaltet die wichtigsten Angaben zur Abwasser-Wärmepumpenanlage in Binningen.[50]

[50] Vgl. Dietler, M. (EBM), (2004).

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

Kennzahlen Binningen		
Anzahl Wohnungen:	300	
Wärmeproduktion WP:	2'400	MWh/a
therm. Leistung WP:	380	kW
JAZ:	3.2	
Länge WT:	140	m
Breite WT:	0.80	m
Fläche WT:	110	m^2
Leistung WT:	260	kW
spezif. Leistung WT:	2.4	kW/m^2
Kanalart:	Mischkanalisation	
Kanalform:	Beton, Eiprofil	
Kanalgrösse:	1.80 x 1.20	m
Durchflussmenge $Q_{TW,min}$:	200	l/s
Abkühlung im Kanal:	0.3	°C

(4) Wärmetauscher

Der Wärmetauscher besteht aus 47 vorgefertigten Elementen mit Verbindungskupplungen (alles in Edelstahl gefertigt) von je 3 m Länge und ca. 0.80 m Breite (Gesamtlänge 140 m). Er wurde auf der Sohle eines eiförmigen Kanals (1.80 x 1.20 m) montiert. Jeweils vier Elemente sind in Serie zusammengeschlossen und bilden eine Gruppe. Jede dieser Gruppen ist mittels Edelstahlrohren an die im Kanal oben montierten Vor- und Rücklaufleitungen aus PE angeschlossen. Über einen Schacht werden die Vor- und Rücklaufleitungen aus der Kanalisation geführt, von wo aus sie zur Wärmepumpe in der Heizzentrale geleitet werden (Distanz ca. 70 m).

Wärmetauscher mit Verbindungskupplungen, Anschlüssen sowie Vor-/Rücklaufleitungen

Detail Anschluss Wärmetauscher an Vor- bzw. Rücklaufleitung

Zu- und Ableitung von Vor- und Rücklaufleitungen

Darstellung: Ryser Ingenieure AG

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

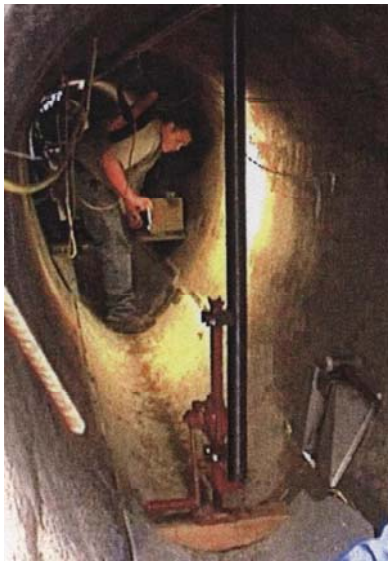
(5) Einbau

Die folgenden Abbildungen zeigen den Bauablauf bei der Montage des Wärmetauschers im Kanal.[51]

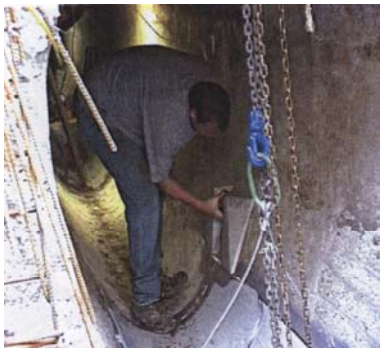
Montage von WT-Elementen im Kanal

WT-Element (Gruppenendstück mit Anschlussstutzen für Vor-/Rücklauf) wird in Kanal gebracht

WT-Element wird präzise auf der Kanalsohle platziert



WT wird mit Presswerkzeug in die Sohle des Kanals gepresst und befestigt (Baukleber und Verschraubung in der Kanalsohle)



Verbindungskupplung zwischen zwei WT-Elementen wird montiert

Provisorische Pumpleitung für die Umleitung des Abwassers während der Montagezeit (200 l/s)

Darstellung: Ryser Ingenieure AG

(6) Betrieb

Die bisher durchgeführten Betriebsanalysen haben eine durchschnittliche Jahresarbeitszahl JAZ von 3,2 ergeben.[52] Im Sommer werden Raumheizung und Warmwasseraufbereitung von der Wärmepumpe alleine sichergestellt, was aufgrund der für das Warmwasser nötigen höheren Vorlauftemperatur von bis zu 70 °C (Verhinderung von Legionellen) zu einer Reduktion der Arbeitszahl führt. Dafür steigert sich die Gesamtauslastung der Wärmepumpe (rund 6.500 Betriebsstunden pro Jahr). Im Winter sorgen die parallel betriebenen Blockheizkraftwerke (BHKW) für die Warmwasseraufbereitung, da die thermische Grundlast, die durch die Wärmepumpe bei tieferen Vorlauftemperaturen geliefert wird, höher ist als im Sommer.

[51] Vgl. EBM et al. (2002).

[52] Vgl. Dietler, M./EBM (2004)

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

(7) Unterhalt

Bis auf einen Pumpendefekt und ein Leck im Zwischenkreislauf (Druckverlust) traten bisher keine Störungen auf. Auch konnte bei Kontrollen bisher keine nennenswerte Verschmutzung des Wärmetauschers mit entsprechender Leistungsverminderung festgestellt werden, so das bisher keine zusätzliche Reinigung erforderlich war und auch keine Reinigung durchgeführt wurde. Im Rahmen des Anlagenbetriebes (Leistungsüberwachung) übernimmt die WBA als Betreiber der Abwasserwärmenutzungsanlage allfällige Reinigungen und Unterhaltsarbeiten in eigener Verantwortung. Für den Betreiber der Kanalisation ergaben sich somit während der bisherigen Planungs-, Bau- und Betriebszeit neben Begleitungs- und Aufsichtsaufgaben keine zusätzlichen, durch den Wärmetauscher bedingten Aufwände. Die ursprüngliche Funktion des Kanals wird nicht beeinträchtigt. Die auf der nachgeschalteten Kläranlage resultierende Temperaturabnahme infolge des Wärmeentzugs aus dem Kanal ist vernachlässigbar und hat keinen negativen Einfluss auf den Kläranlagen-Betrieb. In Notfällen könnte die Wärmepumpe abgeschaltet und die Heizung mit den BHKW oder Heizkesseln aufrechterhalten werden.

3.1.5.2.2 Zwingen

(1) Wärmeverbraucher

In einer 1999 neu erstellten Einfamilienhaussiedlung in der Gemeinde Zwingen im Laufental (2.500 Einwohner, 15 km südlich von Basel) werden 31 Einfamilienhäuser mittels zweier zentraler Wärmepumpen mit Abwasserwärme beheizt.

(2) Finanzierung/Contracting

Planung und Bau der Abwasserwärmenutzungsanlage erfolgten durch die Elektra Birseck Münchenstein EBM, ein regionales Elektrizitätsversorgungsunternehmen im Contracting mit der Bauherrschaft. Die Investitionskosten betrugen pro Haus rund 3.500 € für die gesamte Wärmepumpenanlage und 2.000 € für die Spitzenabdeckung. Die aktuellen Jahreskosten pro Haus betragen rund 800 €. Nach Planung und Bau erfolgt auch die professionelle Betreuung (Betrieb und Unterhalt) der Anlage durch die EBM im Rahmen des Anlagen-Contractings.

(3) Technik

Mittels zweier zentraler Wärmepumpen wird die Abwasserwärme aus dem naheliegenden Hauptsammelkanals der Kläranlage Laufental in Wärme für die Raumheizung umgewandelt. Ein abgasarmer Flüssiggas-Brenner dient zur Abdeckung von Bedarfsspitzen. Die Warmwasseraufbereitung erfolgt dezentral in den einzelnen Wohnungen, teilweise über Sonnenkollektoren, teilweise über Heizkessel. Mit der Wärmepumpe werden ca. 75 % des gesamten Jahreswärmebedarfs abgedeckt. Dabei beträgt die Abkühlung des Abwassers im Kanal (und damit im Kläranlagen-Zulauf) weniger als 0,1 °C.

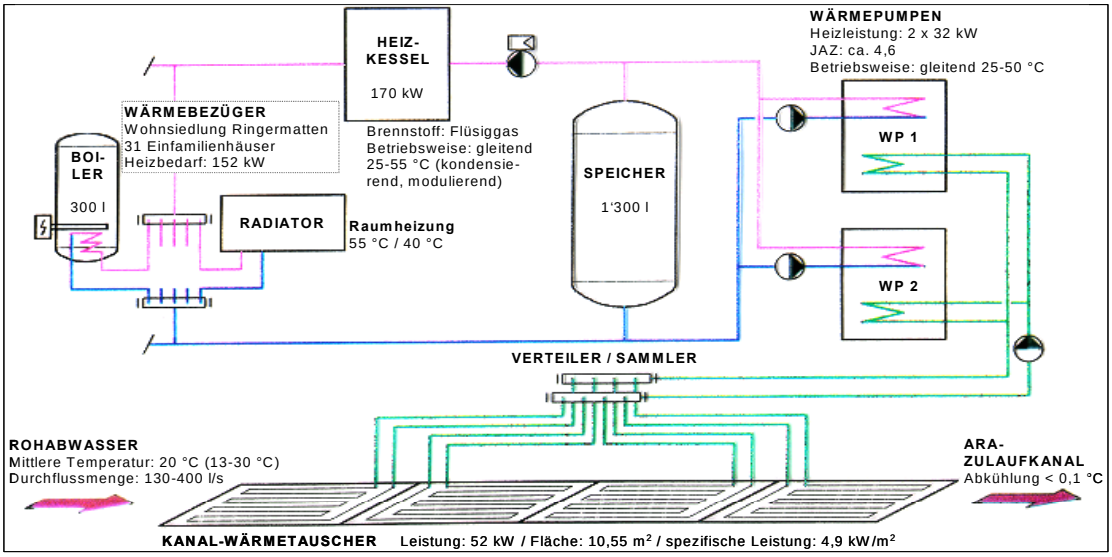
Die nachfolgende Übersicht beinhaltet die wichtigsten Angaben zur Abwasser-Wärmepumpenanlage in Zwingen.[53] Das nachfolgende Schema zeigt den Aufbau der Abwasser-Wärmepumpenanlage in Zwingen.

[53] Vgl. Längin, E./EBM (2001).

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

Kennzahlen Zwingen		
Anzahl Wohnungen:	31	
Wärmeproduktion WP:	230	MWh/a
therm. Leistung WP:	64	kW
JAZ:	4.6	
Länge WT:	10	m
Breite WT:	1.06	m
Fläche WT:	10.6	m^2
Leistung WT:	52	kW
spezif. Leistung WT:	4.9	kW/m^2
Kanalart:	Mischkanalisation	
Kanalform:	Beton, Rechteckprofil	
Kanalgrösse:	1.70 x 1.20	m
Durchflussmenge $Q_{TW,min}$:	130	l/s
Abkühlung im Kanal:	0.1	°C

Schema Abwasserwärmenutzung in Zwingen



Darstellung: Ryser Ingenieure AG

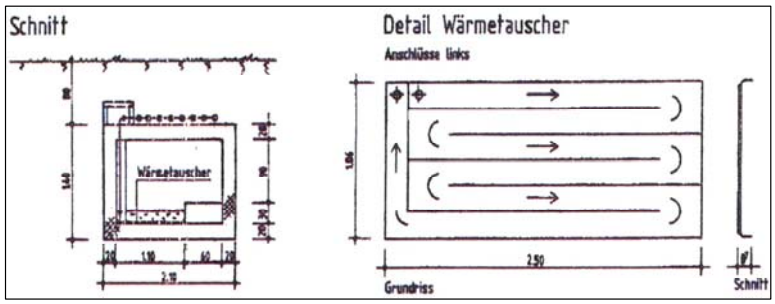
(4) Wärmetauscher

Der Wärmetauscher besteht aus 4 vorgefertigten Elementen aus Edelstahl von je 2.5 m Länge und 1.06 m Breite (Gesamtlänge 10 m). Der gesamte Wärmetauscher wurde direkt auf der Sohle des rechteckigen, begehbaren Kanals (1.70 x 1.20 m) montiert. Jedes Wärmetauscher-Element ist über Anschlussstutzen an die Vor-/Rücklaufleitungen aus PE angeschlossen (siehe nachfolgende Abbildungen).

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

Kanal mit Wärmetauscher und Anschluss-stutzen mit Verschalung zur Verbesserung der Kanalhydraulik

Querschnitt durch Kanal mit Detail Wärmetauscher-Element



Darstellung: Ryser Ingenieure AG

(5) Einbau

Die folgenden Abbildungen zeigen Situationen vom Einbau des Wärmetauschers.

Einführung eines WT-Elementes über Montageöffnung in den Kanal

Reinigung des montierten WT im Kanal

Darstellung: Ryser Ingenieure AG

(6) Betrieb

Weil die Neubau-Siedlung über eine sehr gute Wärmedämmung verfügt, kann die Wärme mit tiefen Vorlauftemperaturen (bis maximal 50 °C) über Bodenheizungen verteilt werden. Dadurch arbeitet die Wärmepumpe effizient. Bisherige Messungen

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

ergaben eine durchschnittliche JAZ von 4,6.[54] Die erwartete JAZ von 5 wurde wegen der in der Praxis stärker als gegenüber der Planung angenommen auftretenden Verschmutzung des Wärmetauschers (Biofilmbildung) nicht erreicht. Die Verschmutzung war die Folge von stärker belastetem Abwasser wegen Betriebsstörungen einer angeschlossenen Papierfabrik.[55] Die Papierfabrik hat mittlerweile beschlossen, eine Vorreinigung ihres Abwassers zu bauen. Dadurch wird die Wärmetauscher-Verschmutzung vermutlich abnehmen.

(7) Unterhalt

Nach Feststellung einer markanten Leistungsverminderung im November 1999 (ein Jahr nach Inbetriebnahme) wurde der Wärmetauscher im Dezember 1999 mit Hochdruckdampf gereinigt. Dabei wurden neben der Entfernung der abwasserbedingten Verschmutzung auch eine während der Montage erfolgte Verschmutzung durch Kleberreste festgestellt, die ebenfalls entfernt (weggeschliffen) wurde. Danach erreichte der Wärmetauscher wieder die gleiche Leistung wie bei Inbetriebnahme. Bis zum darauffolgenden April (Ende der Heizperiode 1999/2000) reduzierte sich die Wärmetauscherleistung wieder um ca. 25 %. Nach Beginn der Heizperiode 2000/2001 verschlechterte sich die Wärmetauscherleistung um weitere ca. 25 % und stellte sich bei diesem Wert ein (keine weitere Verschlechterung).

Die EBM ist als Contractor verantwortlich für die vertraglich festgelegte Leistungserbringung und übernimmt im Rahmen des Anlagenbetriebes (Leistungsüberwachung) die nötigen periodischen manuellen Reinigungen und Unterhaltsarbeiten am Wärmetauscher in eigener Verantwortung und auf eigene Rechnung in Absprache mit dem Kanalnetzbetreiber. Dank der modularen Bauweise ist eine Vergrößerung des Wärmetauschers und damit die Gewinnung von Austauschfläche für eine allfällige Leistungssteigerung des Wärmetauschers einfach und kostengünstig möglich (dies wurde der Bauherrschaft vorgeschlagen[56]). Für den Betreiber der Kanalisation ergaben sich während der bisherigen Planungs-, Bau- und Betriebszeit neben Begleitungs- und Aufsichtsaufgaben keine zusätzlichen, durch den Wärmetauscher bedingten Aufwände. Die ursprüngliche Funktion des Kanals wurde nicht beeinträchtigt. Die auf der Kläranlage Laufental resultierende Temperaturabnahme infolge des Wärmeentzugs aus dem Kanal ist kleiner als 0,1 °C und hat keinen negativen Einfluss auf den Kläranlagen-Betrieb.

Das Beispiel Zwingen zeigt, wie wichtig der Einflussfaktor Abwasserzusammensetzung und die entsprechende Wärmetauscherverschmutzung im Einzelfall sein kann, und dass bei der Planung darauf eingegangen werden sollte. Über den spezifischen Einfluss von Abwasserzusammensetzung auf die Verschmutzung von verschiedenen Wärmetauschersystemen und die entsprechende Leistungsminderung wurden im Allgemeinen bisher noch keine Untersuchungen oder gezielte Erfahrungen gemacht. Bei der Auslegung müssen dementsprechend Sicherheiten eingebaut werden.

3.1.5.2.3 Wipkingen

(1) Wärmeverbraucher

Mit der Pilotanlage in Zürich-Wipkingen werden seit 1999 ca. 940 Wohnungen von zwei Baugenossenschaften und einer Versicherung in einem Wärmeverbund beheizt und mit Warmwasser versorgt.

---

54 Vgl. Dietler, M./EBM (2004).

55 Vgl. Längin, E./EBM (2001).

56 Vgl. Längin. E/EBM (2001).

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

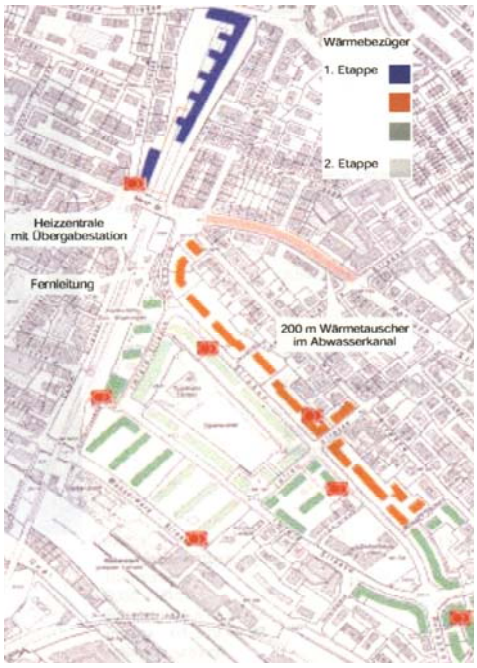
(2) Finanzierung/Contracting

Finanzierung, Bau und Betrieb erfolgen durch den Contractor Elektrizitätswerke der Stadt Zürich (ewz, Abt. Energiedienstleistungen). Anstoß für das Projekt gaben die Erneuerung der naheliegenden Kanalisationsleitung und verschiedene anstehende Heizkesselsanierungen. Die Gesamtinvestitionen waren höher als bei einer konventionellen Sanierung von Heizungsanlagen. Da aber hauptsächlich baugewerbliche Arbeiten anfielen, waren die Investitionen lokal beschäftigungswirksam. Der schließlich erzielte konkurrenzfähige Wärmepreis beträgt 5,3 Ct/kWh.

(3) Technik

Der Wärmeverbund Wipkingen besteht aus sieben bivalenten Wärmepumpen-Heizzentralen, welche die Abwasserwärme aus der nahe gelegenen Kanalisation nutzen. Der Abstand der Heizzentralen zur Kanalisation beträgt maximal 0,5 km. Das Netz der kalten Nahwärmeleitungen hat eine Länge von insgesamt 1,3 km. Das Abwasser im Kanalabschnitt mit dem Wärmetauscher wird um maximal 2,0 °C abgekühlt. Im Zulauf der Kläranlage Werdhölzli, Zürich resultiert jedoch nur eine sehr geringe Abkühlung (nicht messbar). Die Kläranlagenbetreiber stimmten dem Projekt nach einer Überprüfung zu.

Wärmeverbund Wipkingen



Darstellung: Ryser Ingenieure AG

Die nachfolgende Übersicht beinhaltet die wichtigsten Angaben zur Abwasser-Wärmepumpenanlage in Wipkingen.[57]

[57] Vgl. Elektrizitätswerk der Stadt Zürich (2000) und Humm, O. (1998).

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

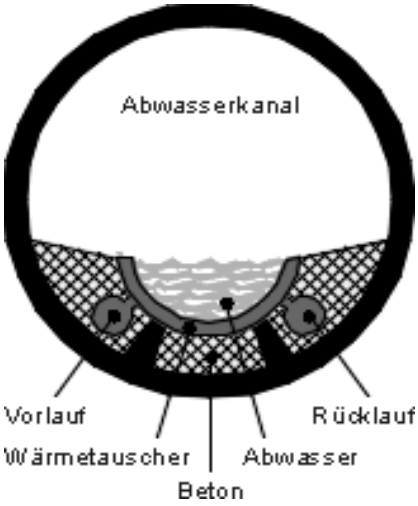
Kennzahlen Wipkingen		
Anzahl Wohnungen:	940	
Wärmeproduktion WP:	3'100	MWh/a
therm. Leistung WP:	1'250	kW
JAZ:	3.1	
Länge WT:	200	m
Breite WT:	1.00	m
Fläche WT:	200	m^2
Leistung WT:	850	kW
spezif. Leistung WT:	4.2	kW/m^2
Kanalart:	Mischkanalisation	
Kanalform:	Beton, Kreisprofil	
Kanalgrösse:	Ø 1.50	m
Durchflussmenge $Q_{TW,min}$:	105	l/s
Abkühlung im Kanal:	2.0	°C

(4) Wärmetauscher

Der insgesamt 200 m lange Wärmetauscher aus 4 mm dickem Edelstahlblech (bestehend aus Elementen von 3 m Länge) wurde inkl. Vor- und Rücklaufleitungen mit untenliegenden Anschlüssen an den Wärmetauscher in die bestehende Kanalisation eingegossen. Der Wärmetauscher bildet in der Kanalisation die Trockenwetterrinne und ist sehr beständig (angenommene Lebensdauer ca. 50 Jahre).

Ausschnitt aus dem 200 m langen Rinnen-Wärmetauscher vor und nach dem Eingiessen in die bestehende Kanalisation

Querschnitt durch Kanal mit Wärmetauscher



Darstellung: Ryser Ingenieure AG

(5) Betrieb

Ab dem Wärmetauscher wird die „kalte" Nahwärme (10 – 15 °C, dadurch nur geringe Wärmeverluste) über das 1,3 km lange Leitungsnetz zu den einzelnen Heizzentralen mit jeweils einer Wärmepumpe für die Grundlast und konventionellem Heizkessel für die Spitzendeckung transportiert. Mit der Wärmepumpe wird rund die Hälfte des Gesamt-Wärmebedarfs abgedeckt.

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

Durch die neuen Wärmepumpen wird also gegenüber früher nur noch halb soviel Heizöl verbraucht (Ersatz von 600.000 l/a, Reduktion der CO_2-Emissionen um 1.500 t/a).

(6) Unterhalt

Beim Wärmetauscher waren bis jetzt keine periodische Reinigung oder Wartungsarbeiten nötig. Für den Betreiber der Kanalisation ergaben sich somit während der bisherigen Planungs-, Bau- und Betriebszeit neben Begleitungs- und Aufsichtsaufgaben keine zusätzlichen, durch den Wärmetauscher bedingten Aufwände. Die ursprüngliche Funktion des Kanals wird nicht beeinträchtigt. Die auf der nachgeschalteten Kläranlage resultierende Temperaturabnahme infolge des Wärmeentzugs aus dem Kanal ist vernachlässigbar und hat keinen negativen Einfluss auf den Kläranlagen-Betrieb (wurde durch Kläranlagen-Betreiber geprüft). In Notfällen könnte die Wärmepumpe abgeschaltet und die Heizung mit den Heizkesseln aufrechterhalten werden (Vorteil bivalente Auslegung).

3.1.5.2.4 Basel

(1) Wärmeverbraucher

In der Sportanlage Bachgraben (Fußball, Leichtathletik, Golf) der Stadt Basel in Basel-Allschwil wurde 1982 eine Wärmepumpenanlage für die Beheizung (Fußbodenheizung) und Warmwasseraufbereitung (Duschwasser) der 16 Garderoben erstellt. Es handelt sich dabei um eine der ersten Abwasserwärmenutzungsanlagen in der Schweiz.

(2) Technik und Betrieb

Die Wärmepumpe nutzt die Wärme aus dem Abwasser der nahe gelegenen Kanalisation. Da die Wärmeerzeugung in der Aussensportanlage hauptsächlich im Sommer genutzt wird, wenn die Abwassertemperaturen hoch liegen (15 bis 20 °C), erreicht die Abwasser-Wärmepumpe eine ausgezeichnete durchschnittliche Jahresarbeitszahl JAZ von ca. 6,5 und arbeitet damit sehr effizient. Die Abwasserwärmenutzungsanlage in Basel-Bachgraben wird monovalent betrieben.

Die nachfolgende Übersicht beinhaltet die wichtigsten Angaben zur Abwasser-Wärmepumpenanlage in Basel-Bachgraben.[58]

[58] Vgl. Tiefbauamt der Stadt Basel (2004).

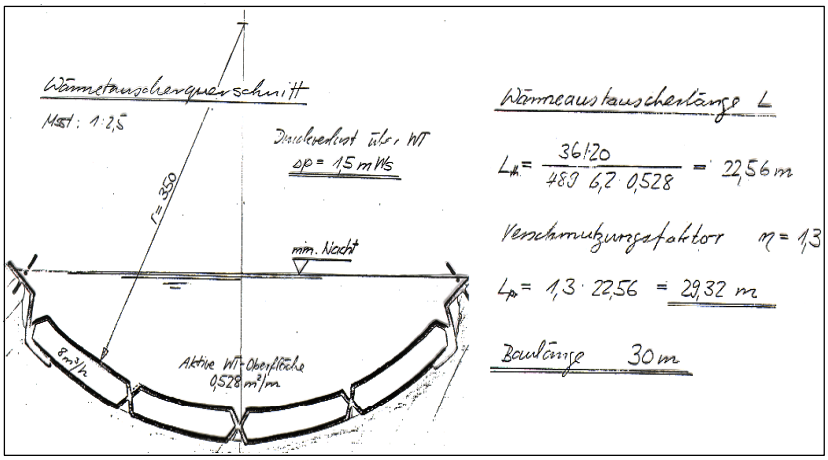
© 2005 All rights reserved by GEK mbH

Kennzahlen Basel-Bachgraben		
Wärmeproduktion WP:	160	MWh/a
therm. Leistung WP:	65	kW
JAZ:	6.5	
Länge WT:	30	m
Breite WT:	0.50	m
Fläche WT:	15	m^2
Leistung WT:	55	kW
spezif. Leistung WT:	3.7	kW/m^2
Kanalart:	Mischkanalisation	
Kanalform:	Beton, Eiprofil	
Kanalgrösse:	1.90 x 1.50	m
Durchflussmenge $Q_{TW,min}$:	16	l/s
Abkühlung im Kanal:	0.8	°C

(3) Wärmetauscher

Der Rinnen-Wärmetauscher aus Edelstahl ist rund 30 m lang und 0,5 m breit. Er wurde in der Trockenwetterrinne eines eiförmigen Kanals (1,90 x 1,50 m) montiert. Über Vor- und Rücklaufleitungen aus PE wird das erwärmte Zwischenkreislaufwasser zur nahe gelegenen Heizzentrale der Sportanlage Bachgraben geführt.

Querschnitt des Wärmetauschers in Basel Bachgraben



Heizzentrale Basel-Bachgraben

Darstellung: Ryser Ingenieure AG

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

(4) Unterhalt

Nach fast 20 Jahren störungsfreien Betriebs wurde die Heizanlage im Jahr 2001 erneuert. Die Tatsache, dass erneut eine Wärmepumpe installiert wurde, ist ein Indiz für die Zufriedenheit der Bauherrschaft und des verantwortlichen Heizungs-Wartungspersonals.

Anlässlich des Ersatzes der Wärmepumpe wurde auch der Wärmetauscher einer umfassenden Funktionskontrolle unterzogen. Diese Untersuchung ergab keinerlei Beeinträchtigungen oder Probleme mit Verschmutzungen, so dass der gleiche Wärmetauscher voraussichtlich problemlos weitere 20 Jahre praktisch wartungsfrei genutzt werden kann. In Basel-Bachgraben wird der Wärmetauscher nicht periodisch gereinigt. Seit der Inbetriebnahme bringt er die benötigte Leistung auch ohne Reinigung (bei der Auslegung wurde ein Faktor 1,3 für die Verschmutzung eingerechnet). Der Kanal-Betreiber hat also damit keinen vermehrten Aufwand und der Kanal erfüllt seine ursprüngliche Funktion ohne Einschränkungen.

3.1.5.2.5 Muri

(1) Wärmeverbraucher

Seit 1994 versorgt die Energie Freiamt AG EFA in der Gemeinde Muri (7.000 Einwohner, Kanton Aargau) neben anderen Kunden mit herkömmlichen Heizsystemen 200 Wohnungen mit Abwasserwärme.

(2) Finanzierung/Contracting

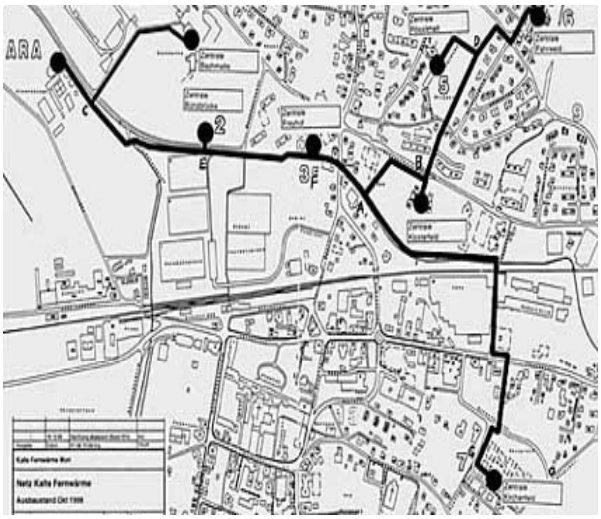
Finanzierung, Bau und Betrieb erfolgen durch den Contractor EFA. Die Gesamtinvestitionen beliefen sich auf rund 2,6 Mio €. Der konkurrenzfähige Wärmepreis beträgt z. Zt. 5,6 Ct/kWh. Das gesamte Projekt konnte schlussendlich wirtschaftlich realisiert werden, weil wesentliche Teilstrecken des Zwischenkreislaufes zwischen der Kläranlage und den einzelnen Heizzentralen und Wärmeverbrauchern mittels koordiniertem Leitungsbau erstellt werden konnten: Der Leitungsgraben wurde gleichzeitig für die Verlegung der Sekundärkreislauf-Kunststoffrohre (kaltes Nahwärmenetz), Nahwärmenetze (isolierte Stahl- oder Kunststoffrohre), Elektro-, TV- und Straßenbeleuchtungskabel verwendet.

(3) Technik

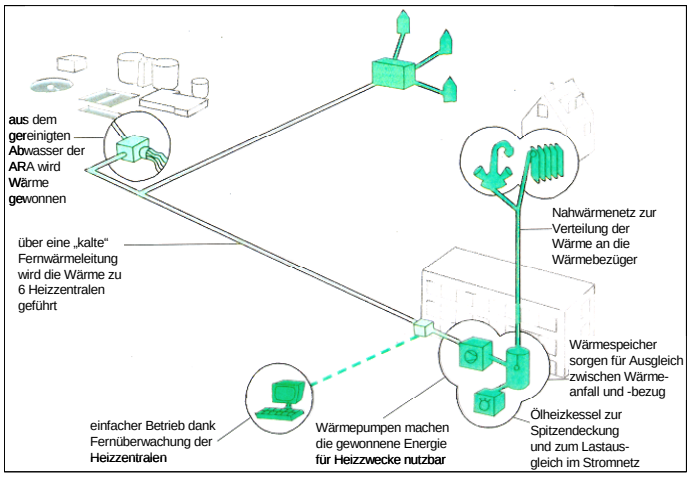
Die Wärme wird dem gereinigten Abwasser nach der Kläranlage entnommen und als „Kalte“ Nahwärme über einen verzweigten Wärmeverbund von 3,2 km Länge zu sieben dezentralen bivalenten Heizzentralen transportiert. Jede Zentrale verfügt über eine Wärmepumpe für die Erzeugung der Grundlastwärme und einen Ölheizkessel für die Spitzendeckung. Damit werden die umliegenden Gebäude über das ganze Jahr mit Heizwärme versorgt.

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

Übersicht Wärmeverbund mit Abwasserwärme in Muri



Schema Wärmeverbund mit Abwasserwärme in Muri



Darstellung: Ryser Ingenieure AG

Die nachfolgende Übersicht Kasten beinhaltet die wichtigsten Angaben zur Abwasser-Wärmepumpenanlage in Muri.[59]

Kennzahlen Muri		
Anzahl Wohnungen:	200	
Wärmeproduktion WP:	1'700	MWh/a
therm. Leistung WP:	1'050	kW
JAZ:	3.0	
Abmessungen WT:	1.5 x 1 x 0.5	m
Leistung WT:	700	kW

(4) Wärmetauscher

Beim Wärmetauscher handelt es sich um einen kompakten Lamellen-Wärmetauscher aus Edelstahl. Der Wärmetauscher wird im Gegenstrom gleichzeitig vom gereinigten Abwasser (Primärkreislauf) und vom Sekundärkreislaufwasser durchflossen. Beide Kreisläufe werden mit einfachen Pumpen aufrecht erhalten (dies ist ein energetischer Nachteil gegenüber in der Kanalisation eingebauten Wärmetauschern, wo das Abwasser nicht gepumpt werden muss). Der Wärmeaustausch im Wärmetauscher erfolgt über die aktive Oberfläche der dicht gepackten Lamellen (viel Oberfläche bei wenig Volumen).

[59] Businger, E./EFA (2001).

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

Lamellen-Wärmetauscher in der Kläranlage Muri

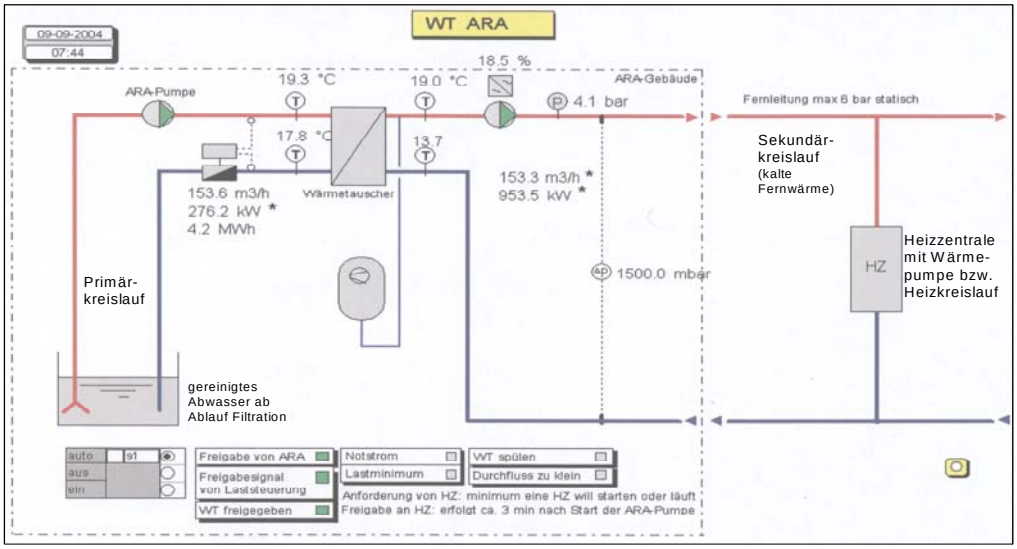
Darstellung: Ryser Ingenieure AG

(5) Betrieb

Das auch im Winter mindestens 8 – 12 °C warme, gereinigte Abwasser aus der letzten Klärstufe (Filtration) erwärmt in der Kläranlage Muri im Primärkreislauf über den Wärmetauscher das Sekundärkreislaufwasser (Vorlauftemperatur 6 – 15 °C). Das erwärmte Sekundärkreislaufwasser wird über das 3 km lange Netz der „kalten“ Nahwärme in die 7 dezentralen bivalenten Heizzentralen transportiert. Hier heben Elektrowärmepumpen die Wärme auf das zur Gebäudeheizung notwendige Temperaturniveau an. Die Heizwärme wird dann in den einzelnen Nahwärmenetzen zu den jeweiligen Verbrauchern/Heizkörpern geführt. Die maximale Vorlauftemperatur des Heizsystems liegt zwischen 50 °C und 65 °C.

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

Prozessleitbild Wärmetauscher mit Primär- und Sekundärkreislauf



Darstellung: Ryser Ingenieure AG

Die Wärmepumpen erzeugen übers Jahr rund zwei Drittel der gesamten benötigten Wärmeenergie aus der Abwasserwärme. Das restliche Drittel wird durch die Ölheizkessel übernommen (Spitzenlast). Die Anlagen werden über ein Energiemanagement-System leistungsabhängig geregelt und optimiert. Von jeder Heizzentrale aus werden jeweils mehrere Wohnungen mit Heizwärme versorgt. Die Kläranlage und die Heizzentralen sind mit der Leitstelle der Energie Freiamt AG verbunden und können von dort aus ferngesteuert werden. Durch die Wärmepumpen werden gegenüber früher rund 300.000 Liter Heizöl pro Jahr eingespart. Dies entspricht einer Reduktion der CO_2-Emissionen um rund 750 Tonnen pro Jahr.

(6) Unterhalt

Der Wärmetauscher wird vorbeugend zweimal pro Jahr gründlich gereinigt (Aufwand ca. ½ Tag). Die Abnahme der Abwasserdurchsatzmenge (Druckverlust) gilt als Indikator für die Verschmutzung des Wärmetauschers. Bisher traten keine Probleme (Leistungsverminderung) wegen Verschmutzungen auf. Die Gefahr von Verschmutzungen ist beim Wärmetauscher von Muri kleiner als bei Wärmetauschern in der Kanalisation, da es sich um bereits gereinigtes Abwasser handelt.

Bisher war beim Wärmeverbund Muri mit Ausnahme kurzer Betriebsstörungen jederzeit ein Vollbetrieb möglich. Dabei konnte die als untere Grenze angestrebte Wärmeproduktion durch die Wärmepumpen von 65 % eingehalten werden. Einzige nennenswerte Änderung seit Betriebsbeginn war, dass ein Spitzenlast-Ölheizkessel wegen Kamingeräuschen durch einen Durchlauferhitzer ersetzt werden musste.

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

3.1.6 Empfehlung zur Dimensionierung von Wärmetauscher-Anlagen – Beitrag von Beat Kobel (Ryser Ingenieure AG)

3.1.6.1 Einleitende Vorbemerkungen

Die Abwasserwärmenutzung stellt an planende und ausführende Ingenieure spezielle Anforderungen. Einerseits geht es um die Auslegung der Heizzentrale mit Wärmepumpe, andererseits um die Wärmeentnahme aus dem Abwasser und die möglichen Folgen für die Abwasserreinigung.

Die dafür benötigten Wärmetauschersysteme sind kostenintensiv und damit für die Wirtschaftlichkeit einer Abwasser-Wärmepumpe ausschlaggebend. Die korrekte Auslegung und eine technisch einwandfreie Ausführung der Installation der Wärmetauscher mit zugehörigem Sekundärkreislauf und Heizsystem Wärmepumpe sind für eine optimale wirtschaftliche AWN-Anlage und einen sicheren Betrieb grundlegend. Andererseits muss auch dem Einfluss der Abkühlung in der Kanalisation auf den Betrieb einer nachgeschalteten Kläranlage bereits bei der Planung Rechnung getragen werden.

Da es sich im Kanalnetz um dynamische Prozesse handelt, müssen die unterschiedlichen Einflussgrößen sorgfältig beurteilt werden: unterschiedliche Kanalprofile und Gefälle, schwankende Abwassertemperaturen, Ablagerungen auf der Wärmetauscheroberfläche (Veränderung des Wärmeübergangs) und Einfluss der Wärmeentnahme auf den Kläranlagen-Betrieb.

Das Medium Abwasser ist den meisten Ingenieuren aus dem HLK-Bereich wenig bekannt. Umgekehrt ist der HLK-Bereich den Siedlungswasserbau- und Abwasser-Ingenieuren wenig geläufig. Deshalb ist für eine erfolgreiche Planung und Realisierung von Abwasserwärmenutzungsanlagen die Zusammenarbeit von HLK- und Siedlungswasserbau-Ingenieuren unumgänglich.

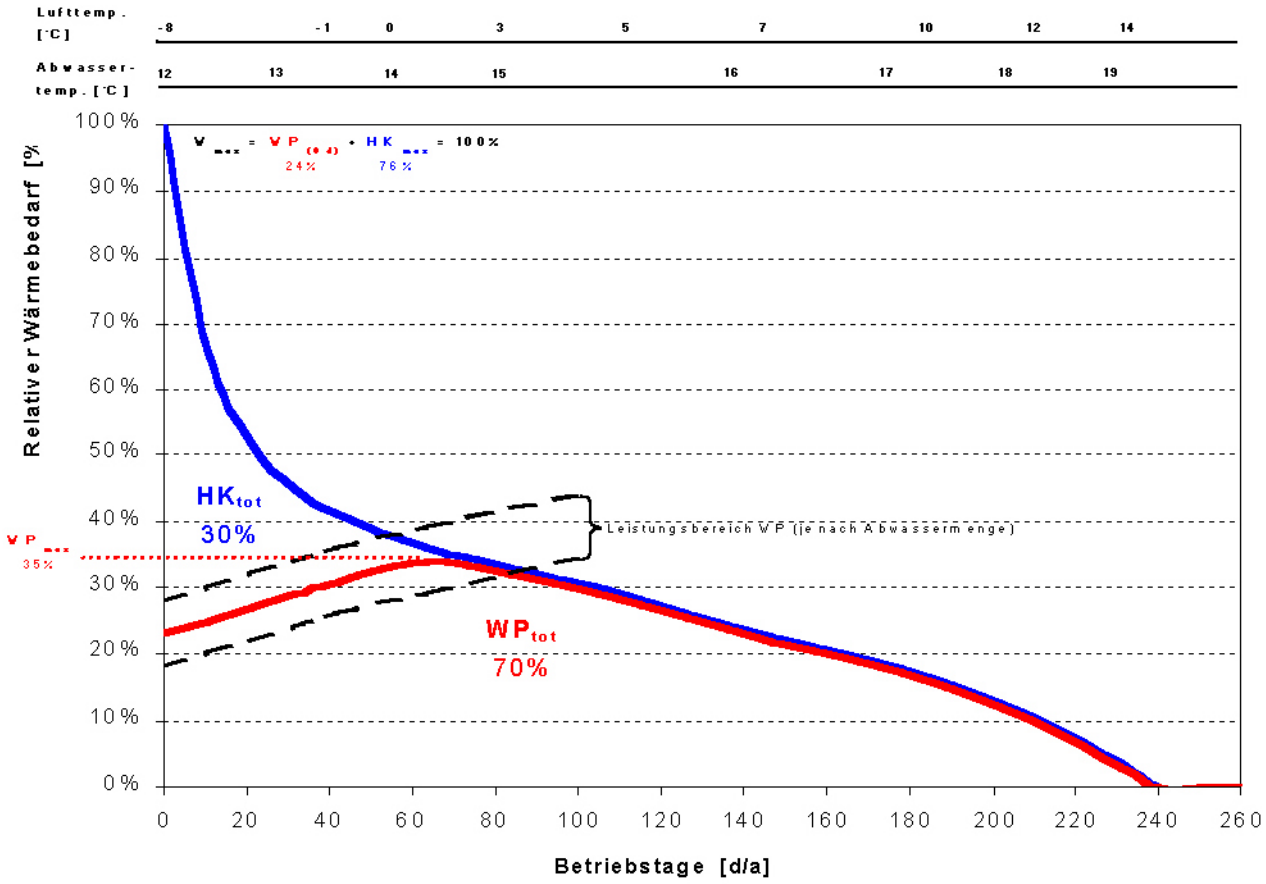
In den folgenden Kapiteln werden die wichtigsten Schritte für die Auslegung einer Abwasserwärmenutzungsanlage beschrieben.

3.1.6.2 Wärmebedarf und Auslegung der Wärmepumpe

In einem ersten Schritt muss der Wärmebedarf des mit Wärme zu versorgenden Objektes ermittelt werden. Dies wird anhand einer Jahresdauerlinie für den Wärmebedarf gemacht. Die Jahresdauerlinie zeigt den Heizleistungsbedarf in Funktion der Anzahl Betriebstage während eines Jahres. Die nachfolgende Abbildung zeigt ein Beispiel einer Jahresdauerlinie (blaue Linie) mit prozentualen Leistungsangaben. Die Fläche unter der Jahresdauerlinie entspricht dem jährlichen Gesamtwärmebedarf.

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

Jahresdauerlinie des Wärmebedarfs (bivalente Heizanlage mit Abwasser-Wärmepumpe WP und Ölheizkessel HK)



Darstellung: Ryser Ingenieure AG

Bivalente Abwasserwärmenutzungsanlagen sind aus Erfahrung wirtschaftlicher und sicherer im Bezug auf Betriebsausfälle, weshalb die bivalente Auslegung zusammen mit einem konventionellen Gas- oder Ölheizkessel allgemein und vor allem bei größeren Anlagen ab 150 kW Gesamtleistung empfohlen wird. Die Auslegung gemäss Beispiel in der obigen Abbildung ist in den meisten Fällen anwendbar und empfehlenswert:

Die Wärmepumpe (WP) wird auf eine Leistung von 30- 40 % der maximal nötigen Heizleistung (an den kältesten Tagen im Winter) ausgelegt. Die restlichen 60 – 70 % der Maximalleistung (Spitzenlast) übernimmt ein herkömmlicher Heizkessel (HK). Bei dieser Auslegung ergibt sich eine Deckung von 70 – 80 % des Gesamt-Jahreswärmebedarfs durch die Wärmepumpe, und nur 20 – 30 % müssen vom Heizkessel abgedeckt werden.

Mit dieser Auslegungsart wird die benötigte Wärmepumpe viel kleiner (dadurch finanziell günstiger) und kann effizienter betrieben werden, als wenn sie 100 % des Leistungsbedarfs auch an den kältesten Tagen abdecken müsste.

Das Beispiel in der obigen Abbildung zeigt, dass bei Normalbetrieb der Wärmepumpe auch an den kältesten Tagen der Heizkessel nur ca. 76 % der Gesamtleistung liefern muss. Aus Sicherheitsgründen muss aber der Heizkessel auf 100 % ausgelegt

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

werden, so dass er den Gesamtheizbedarf in Notfällen (z.B. Betriebsausfälle oder zu tiefe Abwassertemperatur für reibungslosen Kläranlagen-Betrieb, so dass die Wärmepumpe abgeschaltet werden muss) alleine decken kann.

Zahlenbeispiel:	Maximalleistungsbedarf 800 kW → Wärmepumpe mit maximaler thermischer Leistung von 230-320 kW, Heizkessel mit maximaler thermischer Leistung von 800 kW

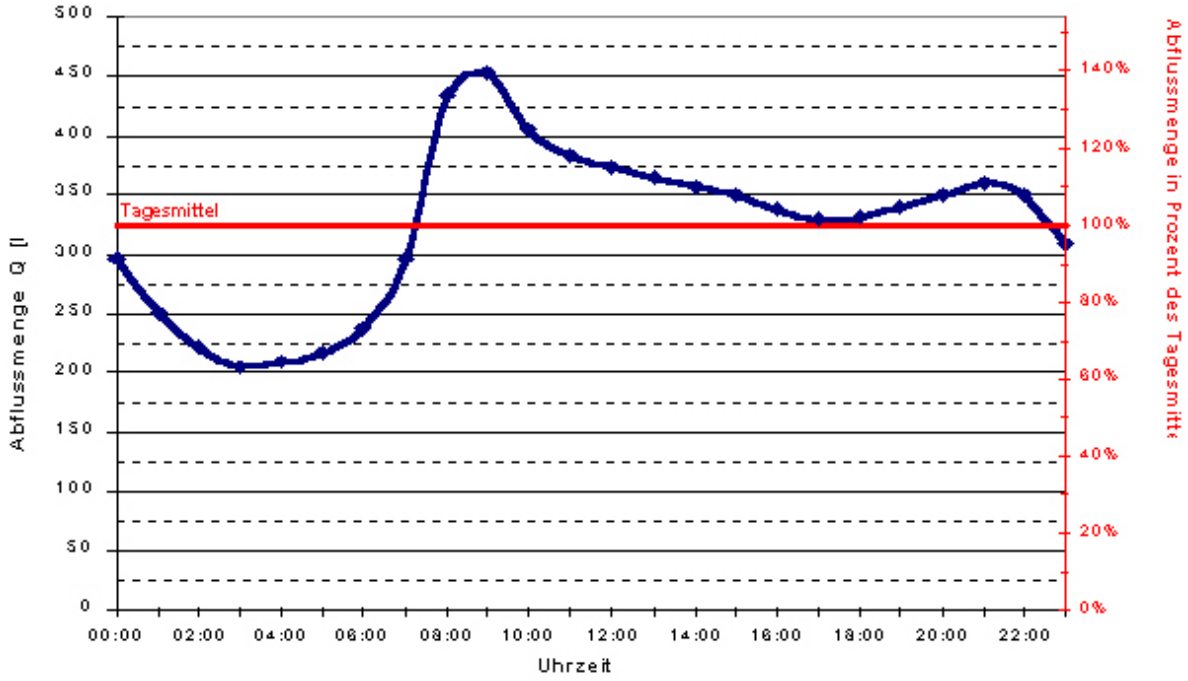
Bei der Bereitstellung von Warmwasser muss die Situation speziell betrachtet werden, da dafür höhere Vorlauftemperaturen erforderlich sind (> 60 °C, Verhinderung von Legionellen). Es ist empfehlenswert, in der kalten Jahreszeit die Warmwasseraufbereitung mittels Heizkessel zu gewährleisten, damit die Wärmepumpe mit tieferen Vorlauftemperaturen und damit effizienter arbeiten kann. Wenn keine Heizwärme mehr nötig ist (ab April bis September), kann die Wärmepumpe auch die Warmwasseraufbereitung übernehmen (separates Wärmenetz).

3.1.6.3 Zeitliche Verteilung des Abwasserabflusses

Die Heizleistung der Wärmepumpe steigt mit zunehmender Abwassertemperatur. Zudem kann der Leistungsbereich je nach Abwassermenge variieren. Die Auslegung muss demnach auf einen mittleren Abwasseranfall bei Trockenwetter und die tiefsten Abwassertemperaturen im Winter erfolgen.

In der nachfolgenden Abbildung ist ein Beispiel einer typischen Tagesganglinie des Trockenwetterabflusses (Schmutzwasser und Fremdwasser) in einer deutschen Kanalisation dargestellt (fiktiv). Eine solche Tagesganglinie sollte als Grundlage für die Berechnung der Wärmemenge aus dem Abwasser verwendet werden.

Typische Abfluss-Tagesganglinie (fikiv) bei Trockenwetter in einer mittelgrossen Kanalisation in Deutschland



Darstellung: Ryser Ingenieure AG

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

Wärmepumpe und Wärmetauscher werden im Normalfall auf das Wärmeangebot bei der mittleren Trockenwetterabflussmenge pro Tag (Tagesmittel) der sechs Monate Oktober bis März ausgelegt. Um bei der Dimensionierung auf der absolut sicheren Seite zu stehen, kann jedoch auch auf den minimalen Nachtabfluss ausgelegt werden. Dieser beträgt, wie in der obigen Abbildung dargestellt, durchschnittlich ca. 60 % des Tagesmittelwertes (Erfahrungswert). Falls für die Dimensionierung keine Tagesganglinie zur Verfügung steht, kann die maßgebende Abflussmenge auch durch Einzelmessungen bestimmt werden: Aus der typischen, repräsentativen Tagesganglinie ist ersichtlich, dass die Abflussmenge im Zeitraum von 16:00 bis 19:00 Uhr in etwa dem Tagesmittel entspricht (Erfahrungswert). Mit einer punktuellen Abflussmessung in diesem Zeitraum erhält man die maßgebende Abflussmenge mit befriedigender Genauigkeit. Aus Erfahrung mit bereits realisierten Abwasserwärmenutzungsanlagen ist das Wärmeangebot im Abwasser in den meisten Fällen sowieso nicht der limitierende Faktor. Soll trotzdem zusätzliche Sicherheit eingebaut und auf minimalen Abfluss dimensioniert werden, kann von 60 % des gemessenen Abflussmenge ausgegangen werden.

3.1.6.4 Auslegung des Wärmetauschers

Aus der Auslegung der Wärmepumpe (WP) und der angenommenen Leistungsziffer COP oder Jahresarbeitszahl JAZ ergibt sich die nötige Abwasserwärme-Entzugsleistung, d.h. die Wärmeübertragungsleistung WA des Wärmetauschers (WT). Die JAZ beziffert das Verhältnis von Nutzenergie (effektive Heizwärme) zu benötigter Primärenergie (Elektrizität für den Antrieb des Wärmepumpenkompressors und Hilfsenergien wie Pumpen für Zwischenkreisläufe etc.) und entspricht der mittleren Leistungsziffer über ein ganzes Betriebsjahr.

Zahlenbeispiel: WP-Leistung = 250 kW, COP = 4 → nötige WT-Leistung WA = 190 kW

Durch Formel 1 ist der Zusammenhang zwischen WA, der Dimensionierungs-Abwassermenge Q_A und der resultierenden Temperaturabnahme des Abwassers ΔT_A gegeben (cW * ρW = 4.19 kWs/l/K; konstant bei Temperaturen von 0-20 °C).

$$\Delta T_A = \frac{W_A}{c_W \cdot \rho_W \cdot Q_A}$$

Formel 1

Mit Hilfe von Formel 2 muss die resultierende Temperaturabnahme im Kläranlagen-Zulauf ermittelt werden und gegebenenfalls (Temperaturabnahme im Kläranlagen-Zulauf > 0.5 K und/oder Temperatur Kläranlagen-Zulauf < 10°C) der Einfluss auf den Kläranlagen-Betrieb überprüft werden.[60]

$$T_{res} = \frac{Summe(Q_i \cdot T_i)}{Summe(Q_i)}$$

Formel 2

Zahlenbeispiel: W_A = 190 kW; Q_A = 200 l/s
→ ΔT_A = 0.23 K
Einfluss auf Kläranlage kann vernachlässigt werden

Anhand der benötigten Wärmetauscherleistung WA muss als letzter Schritt mit Formel 3 Art und Grösse (Austauschwirksame Oberfläche A_{WT}) des Wärmetauschers bestimmt werden.

$$W_A = k \cdot A_{WT} \cdot \Delta T$$

Formel 3

[60] Vgl. Kapitel 4.2.1.3, S. 133 ff.

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

Die Wärmetauscherhersteller geben theoretische systemspezifische Werte für den Wärmedurchgangskoeffizienten k [W/(m²K)] an. ΔT ist der Temperaturunterschied zwischen dem Abwasser (für die Auslegung sind die kältesten Abwassertemperaturen im Winter massgebend) und dem im Wärmetauscher zirkulierenden Medium (Sekundärkreislaufmedium). ΔT stellt sich anhand der Verdampfer-Leistung der Wärmepumpe (entspricht der Wärmetauscherleistung) und dem $k*A_{WT}$-Wert des Wärmetauschers ein. Als Sekundärkreislauf-Medium ist Wasser physikalisch optimal und zu empfehlen, da es den bestmöglichen Wärmeübergang liefert. Es besteht aber die Gefahr der zu starken Abkühlung und des Gefrierens in der Wärmepumpe, weshalb in Grenzfällen auch ein Wasser-Glykol-Gemisch eingesetzt werden kann. Dies hat jedoch eine Verringerung des Wärmeübergangs zur Folge.

Weiter ist beim k-Wert die Verschmutzung des Wärmetauschers durch Biofilmbildung ein wichtiger zu beachtender Problem ist in Deutschland gewichtiger als in der Schweiz, da tendenziell mehr im Trennsystem entwässert wird. Das bedeutet einerseits durch geringeren Abfluss weniger Spüleffekt und dadurch stärkere Verschmutzung, was evtl. periodische Reinigungen nötig macht, andererseits sind aber höhere Abwassertemperaturen auch im Winter zu erwarten.

Untersuchungen der Eidgenössische Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz (EAWAG) an einem Wärmetauscher im Laborprüfstand haben ergeben, das die Wärmetauscherleistung aufgrund der Biofilmbildung im Durchschnitt auf 60 % reduziert wird und durch periodische Spülung wieder auf 80 % gesteigert werden kann. In Deutschland ist im Mittel damit zu rechnen, dass der theoretische k-Wert eines Wärmetauschers auf einen um ca. 30 – 40 % geringeren für die Dimensionierung massgebenden k-Wert verringert wird (ohne periodische Reinigung). Falls keine Reinigung vorgesehen ist, sollte also durch Biofilmbildung mit einer Verminderung der theoretischen Wärmeübertragungsleistung von 30 – 40 % gerechnet werden.

Sowohl Erfahrungen mit realisierten Anlagen als auch die Laboruntersuchungen der EAWAG zeigen sehr unterschiedliche Verhältnisse bei der Wärmetauscherverschmutzung. Aufgrund der sehr unterschiedlichen Abwasserparameter und hydraulischen Verhältnisse ist keine Vereinheitlichung möglich. Die Verschmutzung bzw. Reinigung muss von Fall zu Fall beurteilt werden, was oft erst nach einer gewissen Betriebszeit möglich ist. Sicherheitshalber ist der Wärmetauscher großzügig auszulegen (Faktor 1,5) und die Verschmutzung damit in Kauf zu nehmen, oder es ist eine periodische Reinigung (je nach Verschmutzung alle zwei Monate bis halbjährlich - die Intervalle müssen durch Betriebsüberwachung festgelegt werden) durch ein Kanalreinigungsunternehmen vorzunehmen.

Von folgenden Richtwerten für die spezifische Wärmetauscher-Leistung kann für die Dimensionierung ausgegangen werden:

- 3-4 kW/m² bei geringer Verschmutzungsgefahr oder vorgesehener periodischer Reinigung
- 2-3 kW/m² ohne Reinigung.

Zahlenbeispiel:	Der k-Wert von 860 W/m²/°C muss aufgrund der Verschmutzung für eine sichere Dimensionierung auf rund 500 W/(m²*K) verringert werden. Damit ergibt sich bei einer Temperaturdifferenz des Sekundärkreislaufes ΔT von 4 K aus Formel 3 eine nötige Wärmetauscheroberfläche von A_{WT} = 190 kW/0,5kW/(m²*K)/4 K = 95 m². Dies entspricht einer spezifischen Wärmetauscherleistung von 2 kW/m².

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

Bei der schlussendlichen Bestimmung der Wärmetauschergeometrie (Anzahl Elemente, Einbauweise)[61] anhand der resultierenden nötigen Wärmetauscheroberfläche A_{WT} muss auch darauf geachtet werden, dass der Wärmetauscher auch bei Dimensionierungsabflussmenge dauernd mit Abwasser bedeckt ist, um Verluste zu vermeiden. Die entsprechende Berechnung erfolgt anhand der gängigen Formeln für die Hydraulik (Bestimmung des benetzter Umfanges bei minimaler Abflusstiefe nach Strickler oder Prandtl - Colebrook). Weiter muss sichergestellt werden, dass die nötige Kapazität des betreffenden Kanals (gemäss Entwässerungsplanung) auch mit dem eingebauten Wärmetauscher und den zugehörigen Installationen (Vor- und Rücklaufleitungen, Verbindungselemente, etc.) gewährleistet ist.

[61] Vgl. Kapitel 3.1.5.2, S. 37 ff.

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

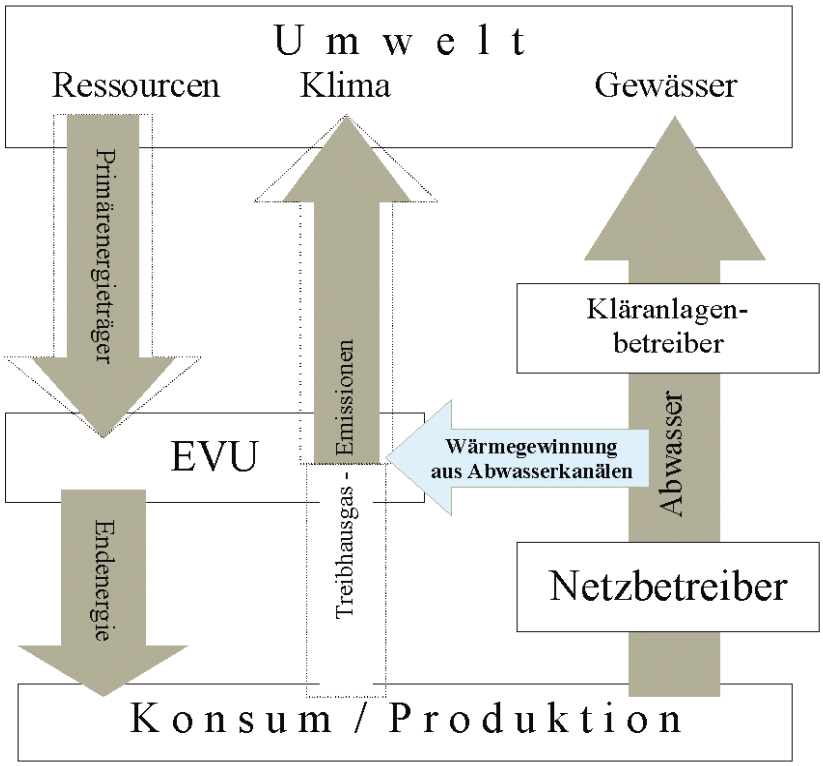
3.2 Ökonomie der Wärmerückgewinnung in Abwasserkanalisationen

3.2.1 Volkswirtschaftliche Perspektive

Der Einbau von Wärmetauschern in Abwasserkanäle ermöglicht die Gewinnung von Wärmeenergie, die zur Beheizung bspw. von Gebäuden eingesetzt werden kann. Bei der Leistungserstellung und –inanspruchnahme, d.h. Gewinnung und Nutzung der Wärmeenergie, sind verschiedene Akteure involviert, die unterschiedliche Ziele, Aufgaben und Interessen verfolgen. Als Kernakteure lassen sich auf der Seite der Leistungserstellung Kanalnetzbetreiber (NB) und Energieversorgungsunternehmen (EVU) anführen. Während die NB als Eigentümer und Betreiber der Kanalisation auftreten, sind die EVU als Produzent und Vermarkter von Wärmeenergie tätig. Dabei kommt es nicht darauf an, ob es sich um ein EVU im klassischen Sinne handelt, entscheidend ist vielmehr, dass die Funktionen von EVU wahrgenommen werden. Auf der Nachfrageseite sind die Eigentümer von Liegenschaften anzuführen, die als private Haushalte, Unternehmen und öffentlichen Einrichtungen Heizungssysteme nachfragen. Darüber hinaus sind als weitere Akteure Kläranlagenbetreiber und Planungsingenieure anzuführen.

Aus volkswirtschaftlicher Perspektive lassen sich das Beziehungsgeflecht der Akteure – von den Kanalnetz- und Kläranlagenbetreibern über EVU bis hin zu den Liegenschaftseigentümern (diese treten in der nachfolgenden Grafik als Konsumenten oder Produzenten auf) – sowie die energie- und umweltpolitisch relevanten Stoffströme wie folgt darstellen:

Wärmerückgewinnung aus Abwasserkanälen - volkswirtschaftliche Perspektive



IKT - eigene Darstellung

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

Im Mittelpunkt der Betrachtung stehen die Konsumenten und Produzenten einer Volkswirtschaft. Diese setzen zur Verfolgung ihrer Aufgaben bzw. zur Realisierung ihrer Ziele Energie ein und Treibhausgase sowie Abwasser frei. Die zugehörigen Stoffströme sind in der obigen Abbildung durch Pfeile dargestellt. Diese verdeutlichen die Beziehung zwischen Akteuren und umweltpolitischen Aspekten. In der Ausgangssituation, dem Status quo, besteht keine Beziehung zwischen Netzbetreibern und EVU, die Stoffströme „Primärenergie“ und „Treibhausgas-Emissionen“ befinden sich auf dem Niveau, das durch die gepunkteten Pfeile dargestellt ist.

Im Fall der energetischen Nutzung des Abwassers können sowohl der Primärenergieeinsatz als auch die Treibhausgas-Emissionen gegenüber der alternativen Verwendung von Öl- und Gasheizungen reduziert werden (graue Pfeile). Der Endenergieverbrauch und das Abwasseraufkommen werden durch die Wärmerückgewinnung aus Abwasserkanälen nicht tangiert.

3.2.2 Einzelwirtschaftliche Perspektive

Aus einzelwirtschaftlicher Perspektive setzt die Nutzung der Abwasserwärme voraus, dass eine entsprechende Einigung der zentralen Akteure Netzbetreiber, EVU und Abnehmer zustande kommt. In diesem Zusammenhang ist auf die einzelwirtschaftlichen Ziele, Aufgaben und Interessen dieser Akteure Bezug zu nehmen.

Die NB verfolgen primär die Aufgabe der Entwässerung zum Schutz der Gewässer. Zu diesem Zweck unterhalten die NB Infrastruktureinrichtungen, die ein Sammeln, Transportieren und Reinigen der Abwässer erlauben. Aus wirtschaftlicher Sicht stehen Kostendeckungsziele im Vordergrund, da die Finanzierung über eine Umlage (Gebühren) erfolgt. Das Gebühren-Aufkommen ist derart zu verwenden, dass unter Beachtung des Grundsatzes der Wirtschaftlichkeit die Entwässerungsinfrastruktur die Kriterien der Standsicherheit, Funktionsfähigkeit, Dichtheit und Betreibbarkeit erfüllt werden.

Als Sachaufgabe der EVU ist die Versorgung der Abnehmer mit der gewünschten Menge an Energie zu nennen. Anders als die NB befinden sich die EVU im Wettbewerb, und sie verfolgen Gewinnziele. Vor diesem Hintergrund spielen bei der unternehmerischen Entscheidungen hinsichtlich der Zusammensetzung des Portfolios der verwendeten Energieversorgungseinrichtungen die Wirtschaftlichkeit der Leistungserstellung, die Vertriebs- und Absatzmöglichkeiten, die Marktanteile sowie spezifische unternehmensstrategische Aspekte eine Rolle. Die EVU verfügen über langjährige Erfahrungen hinsichtlich der relevanten technischen und marktbezogenen Aspekte der Energieversorgung. Sie sind die Spezialisten auf dem Marktsegment der Energieversorgung, die sich das erforderliche Know-how zur Nutzung der Abwasserwärme aneignen können.

Die Zielsetzung der Abnehmer besteht aus ökonomischer Perspektive in der Maximierung des Nutzens (Haushalte) bzw. des Gewinns (Unternehmen). Die hinsichtlich der Energieversorgung bestehenden Erwartungen der Abnehmer beziehen sich primär auf die zuverlässige Versorgung mit Energie in ausreichender Menge. Eine Energieversorgungsart, die dieser Anforderung nicht entspricht, wird sich nur schwerlich am Markt behaupten können. Als weitere Anforderung ist in Abhängigkeit von der Präferenzlage der Nachfrager bspw. die Zugehörigkeit der Energieversorgungsform zum Marktsegment der regenerativen Energien anzuführen. Des Weiteren fordern die Abnehmer aus wirtschaftlicher Sicht eine möglichst preiswerte bzw. kostengünstige Form der Energieversorgung. Dabei ist zu berücksichtigen, dass in Abhängigkeit von den Präferenzen der Abnehmer mitunter nur bestimmte Segmente aus dem Energiemarkt als substitutive Energieformen in Frage kommen. Innerhalb derartiger Marktsegmente sind die Nachfrager hinsichtlich der Energieversorgungsform indifferent. Damit besteht zwischen den Anbietern eine Substitutionskonkurrenz, und die betreffenden EVU befinden sich in einem Preis-Wettbewerb.

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

Sofern die Energieabnehmer eine Präferenz für regenerative Energieformen aufweisen, befinden sich die Anbieter regenerativer Energieformen im Wettbewerb untereinander. Sofern die Energieabnehmer jedoch keine ausgeprägten Präferenzen für regenerative Energieformen aufweisen, tritt das regenerative Energieangebot in einen Wettbewerb mit allen anderen am Markt befindlichen Energieformen.

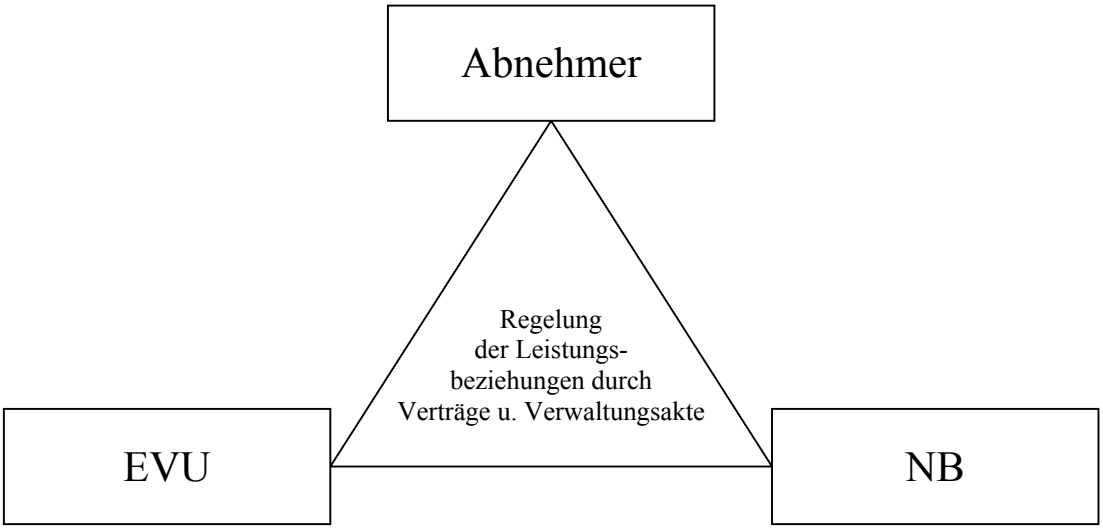
Ferner sind aus Sicht der Energieabnehmer vertragsrechtliche Aspekte von Interesse. Auf der einen Seite schaffen die Abnehmer, die mit den EVU Verträge abschließen, für die Laufzeit des Vertrages Versorgungssicherheit. Auf der anderen Seite binden sich die Abnehmer für die Dauer der Vertragslaufzeit an ein bestimmtes EVU. Dieses ist unproblematisch, solange die Abnehmer zur Revision ihrer Entscheidung die Option der Kündigung des Vertrages haben. Im Fall einer langfristigen Bindung treten jedoch Risiken auf. Diese bestehen v.a. in der Abhängigkeit von einem bestimmten EVU. Das Fehlen der Austritts-Option schlägt sich insbesondere dann negativ nieder, wenn ein Wechsel zu innovativen und kostengünstigeren Energieversorgungsformen nicht möglich ist. Dieses mit einer langfristigen Vertragsbindung einhergehende Risiko werden rational handelnde Abnehmer nur dann akzeptieren, wenn sie eine entsprechende Prämie erhalten, d.h. das aus einer langfristigen Vertragsbindung resultierende Risiko ist monetär zu kompensieren.

Insgesamt stellt das Entscheidungskalkül der Abnehmer eine entscheidende Größe für den Erfolg einer Energieform am Markt dar. Keine Energieform setzt sich am Markt allein deshalb durch, weil sie das Attribut der Regenerativität besitzt. Vielmehr sind die Aspekte der Versorgungssicherheit und Wirtschaftlichkeit sowie rechtliche Aspekte der Vertragsbindung und des Risikoausgleichs zu berücksichtigen.

Zusammenfassend lassen sich die Ausführungen zu den einzelwirtschaftlichen Perspektiven der zentralen Akteure der Gewinnung und Nutzung von Abwasserwärme in der nachfolgenden Abbildung veranschaulichen. Die Gewinnung und Nutzung der Wärmeenergie in Abwasserkanalisationen findet innerhalb einer Dreiecksbeziehung der Akteure NB, EVU und Abnehmer statt. Die Beziehungen, die die Wärmenutzung betreffen, also diejenigen zwischen NB und EVU sowie zwischen EVU und Abnehmern, basieren prinzipiell auf bilateralen Verträgen bzw. Verwaltungsakten. Der Einteilung der Akteure in Netzbetreiber, EVU und Abnehmer liegt eine Unterscheidung nach den spezifischen Funktionen der Akteure zugrunde. Dieser Unterscheidung liegt nicht notwendigerweise auch eine personelle Separation zugrunde. Vielmehr ist es durchaus möglich, dass bspw. eine Personalunion aus Netzbetreiber und Abnehmer (Beheizung öffentlicher Gebäude oder Anlagen) besteht. Auf die an den Funktionen ausgerichteten einzelwirtschaftlichen Interessen hat dieses jedoch keine Auswirkung.

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

Wärmerückgewinnung aus Abwasserkanälen - einzelwirtschaftliche Perspektive



IKT - eigene Darstellung

Als ein weiterer Akteur, der außerhalb des oben dargestellten Beziehungsgeflechtes eine mittelbare Betroffenheit von der Wärmerückgewinnung in Abwasserkanälen aufweist, ist die Gruppe der Kläranlagenbetreiber anzuführen. Die Sachaufgabe der Kläranlagenbetreiber besteht in der Reinigung der Abwässer und der anschließenden Einleitung in die Vorfluter. Zum reibungslosen Betrieb der Kläranlagen, insbesondere der Nitrifikation/Denitrifikation, muss das Abwasser eine bestimmte Temperatur aufweisen.[62] Sofern infolge des Wärmetauschs im Kanal die erforderliche Temperatur nicht vorliegt, sind seitens der Kläranlagenbetreiber entsprechende Maßnahmen zu ergreifen. Es ist daher zu untersuchen, ob derartige Effekte zu erwarten sind und welche Kosten bei den Kläranlagenbetreibern anfallen, um die erforderliche Abwassertemperatur herbeizuführen. Nach dem Verursacherprinzip würden die mit derartigen Maßnahmen im Zusammenhang stehenden Aufwendungen eine Kompensation durch den Verursacher erforderlich machen. Zudem wären die in Kläranlagen auftretenden zusätzlichen finanziellen Belastungen bei der Beurteilung der Wirtschaftlichkeit der Wärmerückgewinnung aus Abwasserkanälen zu berücksichtigen.

3.2.3 Freiwillige Kooperation der Akteure

3.2.3.1 Spieltheoretische Grundlagen

Die Konstellation der Akteure auf der Seite der Leistungserstellung stellt sich derart dar, dass die NB ihre Kanalisation für den Einbau von Wärmetauschern zur Verfügung stellen und die EVU eine Vermarktung der Wärmeenergie vornehmen. Vor dem Hintergrund dieser Konstellation erfordert die Nutzung der Abwasserwärme eine Kooperation von NB und EVU, denn ohne die Einwilligung der Netzbetreiber können EVU in Kanälen nicht aktiv werden. Unter der Voraussetzung, dass die Wärmever-

[62] Zum Einfluss des Wärmeentnahme auf die Abwassertemperatur vgl. Wanner, O. et al. (2004a). Ein Hinweis auf die Temperaturanforderungen zur effektiven Biologischen Abwasserreinigung findet sich bspw. bei Lenz, G. (o.J.), S. 6.

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

sorgung mittels Wärmetauschern in Kanälen für die EVU eine hinreichende Rentabilität aufweist, steht und fällt die Möglichkeit der Nutzung der Abwasserwärme mit der Kooperationsbereitschaft der NB. In diesem Abschnitt wird daher mittels spieltheoretischer Ansätze[63] untersucht, unter welchen Bedingungen die NB mit den EVU bei der Wärmerückgewinnung kooperieren.

Ein Spiel im Sinne der Spieltheorie ist eine interdependente Entscheidungssituation, in der rational handelnde Akteure eine Strategie zur Maximierung ihres Nutzens verfolgen. Aufgrund der Interdependenz der Entscheidungssituation resultieren aus der Strategiewahl eines Akteurs Rückwirkungen auf den Spielausgang eines anderen Akteurs.

Die Spieltheorie ermöglicht die Analyse der Bedingungen für das Zustandekommen sozialer Kooperation, bei der die Akteure die isoliert nutzenmaximierende zugunsten einer kooperativen Strategie aufgeben. Dabei handeln die Akteure weiterhin als rationale Individuen, die auf die Maximierung ihres Nutzens bedacht sind, jedoch findet eine abgestimmte (koordinierte) Strategiewahl statt. In den nachfolgenden Abschnitten geht es v. a. um die Darstellung der spieltheoretischen Ansatzpunkte, die für die Untersuchung der Entstehung und Verbreitung kooperativer Strategien relevant sind. Sodann erfolgt eine Übertragung auf die Akteure, die bei der Gewinnung von Wärme aus Abwasserkanälen betroffen sind, wobei insbesondere auf die Position der NB Bezug genommen wird.

Kooperative Spiele, die auf einer koordinierten Strategiewahl der Akteure basieren, lassen sich in Koordinations- und Verhandlungsspiele unterteilen. Während Koordinationsspiele lediglich der Kommunikation zwischen den Akteuren zur Erzielung eines kooperativen Spielergebnisses bedürfen,[64] ist bei Verhandlungsspielen aufgrund fehlender Interessenharmonie der Abschluss bindender Verträge erforderlich, um den Rückfall der Akteure in nicht-kooperative Spielzustände zu vermeiden. Bei gegensätzlicher Interessenlage der Akteure sind somit Verhandlungen erforderlich, um mittels eines Vertrages

- die **Stabilität** des kooperativen Spielergebnisses zu gewährleisten[65]
- die **Effizienz** des Spielergebnisses durch die Festlegung auf eine bestimmte kooperative Strategiekombination zu maximieren[66]
- und eine **Verteilung des Kooperationsgewinns** auf die Akteure festzulegen.

Ein stabiles Ergebnis kommt bei Verhandlungsspielen infolge bindender Verpflichtungen zustande. Akteure werden Bindungen jedoch nur eingehen, wenn die aus der Kooperation resultierenden individuellen Auszahlungen über den Auszahlungen bei nicht-kooperativem Verhalten liegen, d.h. freiwillige Verhandlungen werden nur aufgenommen, wenn ein Kooperationsgewinn

---

63 Zu den nachfolgenden Ausführungen in diesem Kapitel zur Spieltheorie siehe Rometsch, L. (2002), S.109-152.

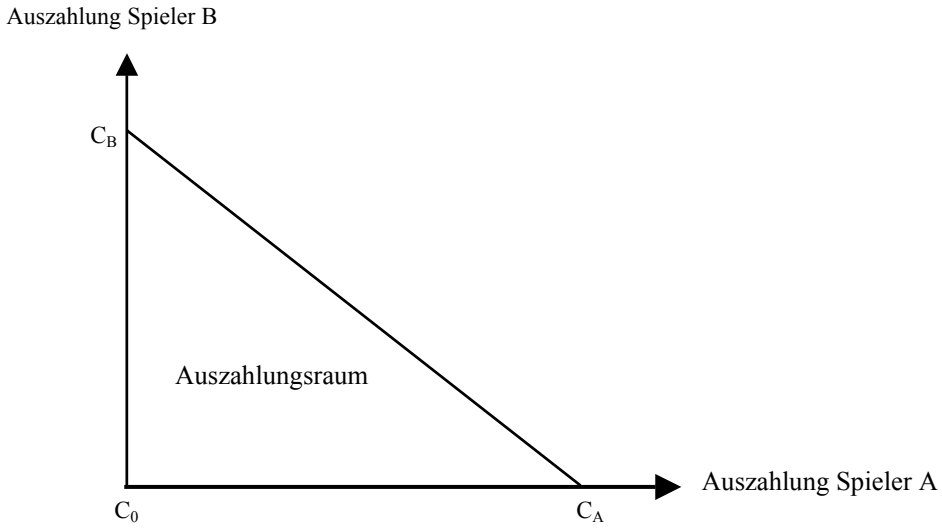
64 Im Fall der Koordinationsspiele kann die Kooperation bereits durch die Kommunikation der Akteure zustande kommen. Sofern den Spielern die wechselseitigen Präferenzen bekannt sind und eine Übereinstimmung der Interessen vorliegt, ist bei entsprechendem Kommunikationsvermögen eine individuell rationale Kooperation zu erwarten, da diese für alle Spieler mit einer Verbesserung des individuellen Spielergebnisses verbunden ist. Anreize zur Defektion bestehen nicht. Als Defektion bzw. defektives Verhalten werden durch Eigennutz motivierte Kooperationsbrüche bezeichnet. Vielmehr resultiert bereits aus der Koordination der Verhaltensweisen ein stabiles Koordinationsgleichgewicht, d.h. die entstehenden Kooperationen sind selbstdurchsetzend, und es bedarf keiner Maßnahmen zur Stabilisierung des Spielergebnisses.

65 Durch einen bindenden Vertrag wird die Kooperationslösung robust gegen etwaige Strategieänderungen, mit denen sich einzelne Akteure Vorteile zu Lasten der anderen Akteure verschaffen können.

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

in Aussicht steht. Als Verhandlungsergebnis ist letztendlich durch die Festlegung der kooperativen Strategie nicht nur eine Entscheidung über die Höhe des Kooperationsgewinns sondern auch über die Verteilung des Gewinns auf die Akteure zu treffen. Das Resultat eines derartigen Verhandlungsprozesses ist zwar indeterminiert, jedoch lassen sich anhand der nachfolgenden Grafik bestimmte Grenzen darstellen.

Höhe und Aufteilung des Kooperationsgewinns



Vgl. Holler, M. (2000), S. 24.

Die Darstellung zeigt den möglichen Kooperationsgewinn in einem Zwei-Personen-Verhandlungsspiel, bei dem im Fall fehlender Kooperation die Auszahlung C_0 erfolgt. Infolge der Kooperation können Auszahlungen innerhalb des Auszahlungsraums $C_0C_AC_B$ realisiert werden. Führen die Verhandlungen zu einen effizienten Ergebnis, steht maximal ein auf der Nutzengrenze C_AC_B befindlicher Kooperationsgewinn in Aussicht. Jede Auszahlung unterhalb der Nutzengrenze stellt eine Verbesserung gegenüber der nicht-kooperativen Lösung dar und lässt die kollektive Vorteilhaftigkeit sozialer Kooperation erkennen.

Hinsichtlich der Verteilung des Kooperationsgewinns zeigt sich, dass der Spieler A maximal die Auszahlung C_A, der Spieler B maximal die Auszahlung C_B realisieren kann.[67] Ausgehend von einem beliebigen Punkt auf der Nutzengrenze kann kein Spieler ein besseres Ergebnis erzielen, ohne zugleich den anderen Spieler schlechter zu stellen, d.h. bei $C_A = C_B$ stellen alternative Gewinnverteilungen auf der Nutzengrenze ein Nullsummenspiel dar.

---

66 Der gemeinsame Nutzenzuwachs infolge der Kooperation gegenüber der nicht-kooperativen Strategie ist zu maximieren.

67 Die maximalen Auszahlungen der Spieler können durchaus voneinander abweichen.

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

Verhandlungen können zu jeder beliebigen Auszahlung innerhalb des Auszahlungsraumes führen. Eine symmetrische Verteilung stellt lediglich einen Sonderfall dar. Aus der Verteilung von Verhandlungsgeschick und –macht resultieren i.d.R. asymmetrische Aufteilungen des Kooperationsgewinns.

Sofern die Interessengegensätze der Spieler in Verhandlungen nicht überwunden werden können und die Verhandlungen scheitern, entfällt der Kooperationsgewinn, und die Akteure realisieren lediglich die Auszahlungen im Punkt C_0. Aus diesem Grund wird der Punkt C_0 als Konfliktpunkt bezeichnet.

Insgesamt betrachtet liegen Verhandlungsspielen nicht-kooperative Spielsituationen zugrunde, wobei durch Verhandlungen bindende Vereinbarungen zu treffen sind, um einen Kooperationsgewinn zu generieren. Als elementare Bestandteile zur Abbildung eines Verhandlungsspiels sind die Anzahl der Spieler und der Auszahlungsraum (insbes. Konfliktpunkt und Nutzengrenze) anzuführen.

Für eine kooperative Lösung müssen die Akteure Einigungen in drei Bereichen aushandeln:

- Im ersten Schritt sind die möglichen Auszahlungen zu bestimmen, wobei zu berücksichtigen ist, dass alternative Kooperationskonstellationen (Strategiebündel) mit unterschiedlichen Auszahlungen verbunden sind.

- Im zweiten Schritt ist die Aufteilung des Kooperationsgewinns auf die Akteure auszuhandeln. Dabei weisen Aufteilungen des Kooperationsgewinns, die von freiwillig interagierenden Akteuren subjektiv als nicht gerecht empfunden werden, nur eine geringe Realisierungschance.

- Da annahmegemäß die Akteure nicht gleichgerichtete Interessen verfolgen, besteht die Notwendigkeit, die Akteure an die ausgehandelte Kooperationslösung zu binden. Dieses kann bspw. durch eine Vertrag geschehen. Zudem kann es sinnvoll sein, vertraglich eine Sanktionierung von Akteuren vorzusehen, die ihre Strategie zum eigenen Vorteil und auf Kosten der anderen Akteure ändern. Dabei ist zu berücksichtigen, dass Sanktionen glaubhaft angedroht und ggfs. auch durchgesetzt werden können. Der Rückfall auf eine nicht-kooperative Strategie muss für jeden Akteur wirtschaftlich unvorteilhaft sein, andernfalls liegt keine stabile Kooperationslösung vor.[68]

Führen die Verhandlungen über Effizienz, Gerechtigkeit und Verbindlichkeit zu einer Kooperation, so können die Akteure infolge der Kooperation höhere Auszahlungen als im Fall der isolierten, nicht-kooperativen Handlungsweise erzielen.

Wenden wir uns nun der Frage zu, wie kooperative Strategien entstehen und Verbreitung finden. Dabei findet eine Lösung von der Betrachtung einer einzelnen Entscheidungssituation statt. Betrachtet werden nun vielmehr die Akteure als Repräsentanten kooperativer und nicht-kooperativer Strategien; die Akteure repräsentieren kooperative und nicht-kooperative Verhaltensstan-

[68] Gegebenenfalls sind Überwachungs- und Sanktionierungsmechanismen zu implementieren. Die damit verbundenen Kosten reduzieren den sozialen Überschuss aus der Kooperation. In Situationen, in denen defektives Verhalten leicht möglich und zugleich ein hoher Überwachungsaufwand erforderlich ist, scheitern Kooperation oftmals bereits an dem zu geringen sozialen Überschuss (Kooperationsgewinn). Während ein hoher potenzieller Kooperationsgewinn unmittelbar Anreize zum Beitritt in die Kooperationsgemeinschaft erzeugt, ist bei den stabilisierenden Vertragselementen eine differenziertere Betrachtung erforderlich: Auf der einen Seite wirkt sich eine hohe Vertragsstabilität positiv auf den Erwartungswert des Kooperationsgewinns aus, auf der anderen Seite steigen die Überwachungs- und Durchsetzungskosten, und die Akteure gehen Bindungen ein, die u.U. mit negativen Beitrittsanreizen behaftet sind. Zu Beitrittsanreizen und Vertragsstabilität siehe Rometsch, L. (2002), S. 166 ff.

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

dards innerhalb von Populationen[69]. In evolutorischen Prozessen entstehen neue Strategien, die sich bei Überlegenheit durchsetzen, während überkommene Strategien niedergehen. Langfristig treten Selektionsprozesse auf, in denen sich das Gewicht der von Akteuren repräsentierten Strategien in Richtung auf die überlegenen Strategien verändert.

Im Zeitablauf ist zu erwarten, dass sich kooperative gegen nicht-kooperative Verhaltensweisen durchsetzen und zu dominanten Strategien entwickeln, weil die Nachteile nicht-kooperativen Verhaltens mit zunehmender Repräsentanz in der Population deutlicher sichtbar werden. Folglich verstärken sich die Anreize, die dominante Strategie zu verfolgen, mit zunehmender Präsenz der kooperativen Strategie.

Die evolutorische Entfaltung kooperativer Strategien trifft aber auch auf Grenzen. Diese können zum einen in einem zu geringen sozialen Überschuss bestehen, der nach Abzug der auftretenden Verhandlungs-, Durchsetzungs- und Überwachungskosten verbleibt. Zum anderen spielt der kulturelle Hintergrund der Akteure für die Bewertung der Entscheidungssituation eine wesentliche Rolle. So werden bspw. konservativ ausgerichtete Akteure stärkere Beharrungstendenzen zugunsten etablierter und zulasten innovativer Strategien aufweisen. Und schließlich kann der Vormarsch einer effizienten kooperativen Strategie scheitern, weil die aus der Strategie resultierende Verteilung des Kooperationsgewinns als nicht gerecht empfunden wird.[70]

3.2.3.2 Kooperation zwischen Netzbetreibern und Energieversorgern

Wie bereits dargestellt, handelt es sich in der vorliegenden Situation um ein Verhandlungsspiel, da nicht bereits durch Kommunikation ein kooperatives Ergebnis erzielt werden kann. Allerdings lässt sich die Entscheidungssituation auf die strategischen Handlungsalternativen Kooperation und Nicht-Kooperation reduzieren. Im Fall der kooperativen Handlungsstrategie erfolgt der Einbau von Wärmetauschern in die Abwasserkanalisation, die nicht-kooperative Handlungsstrategie lässt dieses nicht zu.

Da sowohl die nicht-kooperative als auch die kooperative Strategie zu einer eindeutigen Verhandlungslösung führen, reduziert sich der Nutzenraum auf den nicht-kooperativen Konfliktpunkt C_0 und die Nutzengrenze, d.h. die Verbindung der Auszahlungspunkte zwischen C_A und C_B. Führt die Verhandlung zu einem kooperativen Ergebnis, so ist dieses zugleich effizient, da suboptimale Alternativen zwischen Konfliktpunkt und Nutzengrenzen nicht existieren.

Unter der Prämisse, dass die Kooperation zu einem Überschuss führt, ist über die Verteilung des Kooperationsgewinns zu verhandeln. Das Ergebnis dieses Verhandlungsprozesses ist im Prinzip indeterminiert, jedoch kann eine verbindliche Einigung nur dann zustande kommen, wenn die NB mindestens eine Kompensation für den entstehenden Aufwand und die möglichen Risiken erhalten. In der nachfolgenden Abbildung sind die Auswirkungen auf den Verhandlungsraum dargestellt:

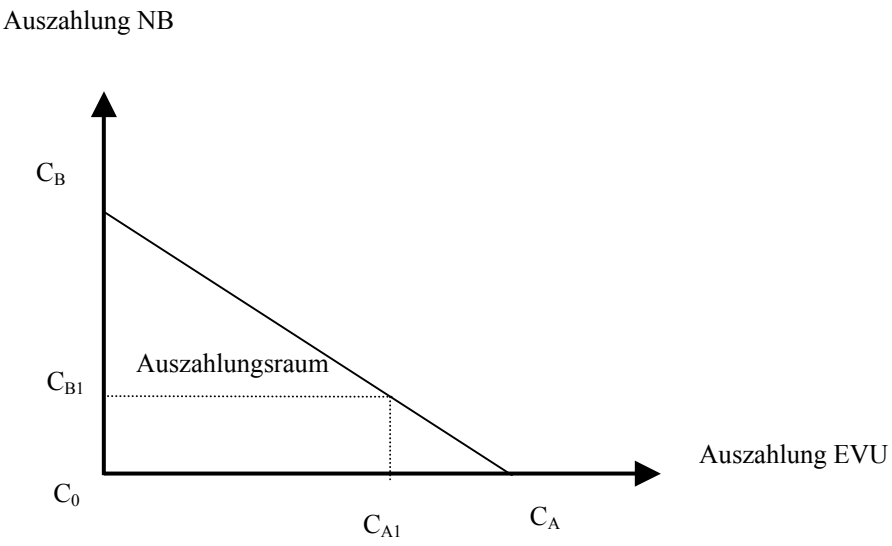
---

69 Eine Population besteht aus Individuen, wobei die Betrachtung der Individuen als Repräsentanten unterschiedlicher Strategien im Vordergrund steht. Innerhalb einer Population weisen Strategien unterschiedlichen Anteile auf.

70 Die zuvor dargestellten Bedingungen für die Entstehung und Verbreitung kollektiver Strategien individuell rational handelnder Akteure lassen sich noch um Kriterien ergänzen, die sich an Strategien richten, um kooperativen Entwicklungen Vorschub zu leisten und in evolutorischen Prozessen eine wachsende Anzahl von Akteuren auf sich zu ziehen: In kleinen Akteursgruppen (gekennzeichnet durch hohe Transparenz und Interdependenz) müssen Strategien freundlich, nachsichtig, verständlich und berechenbar sein. Eine Strategie ist freundlich, wenn die Akteure nicht als Defekteure aktiv werden. Nachsichtigkeit liegt vor, wenn abweichendes Verhalten eines Akteurs nicht zum Kooperationsabbruch führt. Ein solcher erfolgt erst dann, wenn sich ein Akteur als Opfer einer Ausbeutungsstrategie erkennt.

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

Aufteilung des Kooperationsgewinns zwischen NB und EVU



IKT – eigene Darstellung

Zur Kompensation des Aufwandes und der Risiken verlangt der NB in der obigen Abbildung eine Auszahlung in Höhe von C_{B1}. Damit verbleibt für das EVU eine maximale Auszahlung in Höhe von C_{A1}. Bei einer Auszahlungskombination auf der Nutzengrenze, die für den NB eine geringere Auszahlung als C_{B1} vorsieht, kommt die Kooperation nicht zustande, da der NB durch die Kooperation wirtschaftlich schlechter gestellt wird als im Fall nicht-kooperativen Handelns.

Zur Vermeidung der kooperationsbedingten Belastungen ist es erforderlich, die Aufwands- und Risiko-Positionen der NB, die mit dem Einbau und dem Betrieb von Wärmetauschern in Abwasserkanalisationen verbunden sind, vollständig zu ermitteln und aus dem Kooperationsgewinn zu kompensieren. Die Erfüllung dieser Bedingung stellt eine conditio sine qua non der NB für ein kooperatives Verhalten dar. Die Aufwands- und Risikopositionen werden im Rahmen dieses Forschungsprojektes näher untersucht.

Die EVU, die die Vermarktung der in der Kanalisation gewonnenen Wärmeenergie übernehmen, befinden sich im Wettbewerb. Daher spielen bei der Entscheidung über ein Engagement in dem hier betrachteten Marktsegment die strategische Ausrichtung und die Rentabilität des EVU eine wesentliche Rolle. Der von einem EVU vereinnahmte Kooperationserlös muss nach Abzug der Kosten noch eine vom EVU geforderte Mindestrendite auf das eingesetzte Kapital erzielen. In diesem Zusammenhang sind sowohl absatz- als auch produktionsbedingte Risiken zu berücksichtigen. Absatzbezogene Risiken sind aufgrund der langfristigen Laufzeit und der Standortgebundenheit der Anlagen einzubeziehen. Produktionsbedingte Risiken treten als Leistungsrisiken auf, können aber auch als Regressionsforderungen Dritter in Erscheinung treten.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass kooperative Strategien zwischen NB und EVU entstehen können, sofern die ökonomische Vorteilhaftigkeit der Kooperation gegeben ist und eine den Mindestanforderungen der Akteure entsprechende Aufteilung

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

des Kooperationsgewinns gefunden wird. Zur Stabilisierung der Kooperation zur Wärmerückgewinnung in Kanalisationen bedarf es eines langfristigen Vertrages zwischen NB und EVU.

Damit stellt sich ferner die Frage, wie derartige Kooperationen Verbreitung finden bzw. eine wachsende Zahl von Repräsentanten auf sich ziehen können. In dem Maße, wie sich einzelne Kooperationen zwischen NB und EVU zum Zweck der Wärmerückgewinnung aus Abwasser etablieren, ist zu erwarten, dass dieses Verhaltensmuster sichtbar sowie imitiert wird. Zentrales Kriterium für die „Fitness" der Strategie ist der wirtschaftliche Erfolg der Kooperation zwischen NB und EVU. Vom Kooperationsgewinn gehen diejenigen Anreize aus, die in langfristigen Selektionsprozessen den Aufstieg oder den Niedergang einer Strategie als Verhaltensstandard innerhalb einer Population bestimmen. Sofern die Wärmerückgewinnung in der Kanalisation o.g. Kriterien erfüllt, ist im Zeitablauf mit selbstverstärkenden Effekten zu rechnen. Das würde im Umkehrschluss bedeuten, dass NB, die im Fall nachweislicher Vorteilhaftigkeit der Kooperation nicht-kooperativ verhalten, der Öffentlichkeit die Gründe für ihr Verhalten offenlegen müssen. Insofern ist langfristig durchaus zu erwarten, dass etwaige Beharrungstendenzen konservativ ausgerichteter Akteure auf Dauer nicht gegen wirtschaftliche Argumente und den Druck der Öffentlichkeit Aufrecht zu erhalten sein werden. Gleichwohl können Beharrungstendenzen bei innovativen Strategien eine beachtliche Rolle spielen, da die Unsicherheit groß und der öffentliche Druck zunächst gering ist. Daher kommt es bei der Einführung und Umsetzung innovativer Strategien in besonderem Maße darauf an, die wirtschaftlichen Auswirkungen für die betroffenen Akteure sorgfältig aufzuarbeiten.

Vor diesem Hintergrund ist nunmehr zu untersuchen, welche Anforderungen seitens der Netzbetreiber konkret als Mindestanforderung zu berücksichtigen sind. Dabei wird eine Unterscheidung getroffen in Anforderungen,

- die sich aus der Bewältigung der Entwässerungsaufgabe ableiten (i.e. technische Anforderungen),
- die sich aus wirtschaftlicher Perspektive ergeben und
- die als vertragsrechtliche Aspekte zu berücksichtigen sind.

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

4 Technische und akteursseitige Anforderungen

4.1 Technische Voraussetzungen für den Einbau von Wärmetauschern in Abwasserkanalisationen – Beitrag von Beat Kobel (Ryser Ingenieure AG)

4.1.1 Einleitende Vorbemerkungen

Im vorliegenden Bericht wird erläutert, worauf bei der Erstellung von Abwasserwärmenutzungsanlagen, insbesondere beim Einbau von Wärmetauschern in bestehende Kanalisationen, aus Sicht der Betreiber von Kanalisationsnetzen geachtet werden muss, d. h. welche Bedingungen und Vorgaben erfüllt sein müssen, damit eine Wärmenutzung reibungslos möglich ist.

Es sind somit diejenigen technischen Voraussetzungen herauszuarbeiten, die ein Kanalisationsabschnitt erfüllen muss, um für die Wärmenutzung geeignet zu sein.

4.1.2 Darstellung der technischen Voraussetzungen

4.1.2.1 Art und Funktion des Kanals

Es eignen sich grundsätzlich alle Arten von Abwasserkanälen (wie Kläranlagen-Zulaufkanäle, Hauptsammelkanäle, Sammelkanäle, Speicherkanäle, Fangkanäle etc.) mit Ihren verschiedenen Funktionen für die Abwasserwärmenutzung.

Misch- und Schmutzwasserkanalisationen eignen sich gleichermaßen für die Abwasserwärmenutzung, Niederschlagswasserkanalisationen eignen sich nicht.

Auch Abwasser-Druckleitungen (Abwasser-Pumpleitungen) sind grundsätzlich geeignet für den Einbau von Wärmetauschern. Auch hier sind jedoch die Leitungs-Durchmesser kleiner als bei Mischkanalisationen.

Die allgemeine Funktionsfähigkeit des Abwasserkanals darf durch Einbau, Betrieb und Unterhalt einer Wärmenutzungsanlage, insbesondere des Wärmetauschers, nicht beeinträchtigt werden. Der Kanal muss seine ursprüngliche Funktion als Element der Siedlungsentwässerung auch mit eingebautem Wärmetauscher erfüllen können.

4.1.2.2 Form und Material des Kanals

Der Einbau von Wärmetauschern in bestehende Kanäle ist bei allen Formen von Kanälen möglich. Seien es Kreisprofile, Ovalprofile, Rechteckprofile, quadratische Profile oder Gewölbeprofile - Wärmetauscher können den geometrischen Verhältnissen eines bestimmten Kanals, in den sie für die Abwasserwärmenutzung eingebaut werden sollen, angepasst werden und sind so für alle vorkommenden Kanalprofile möglich.[71]

Als geeignete Materialien bei Kanälen kommen für den Einbau von Wärmetauschern Beton (Kanäle aus Ortbeton oder Betonfertigelementen) und Zementrohre in Frage. Auch geeignet sind gemauerte oder mit Klinkerplatten ausgekleidete Kanäle. Nicht geeignete Materialien für den Einbau von Wärmetauschern sind GFK, Kunststoff, Stahl und Steinzeug.

---

[71] Es gibt auf dem Markt bereits für alle Kanalprofile verschiedene eingesetzte Systeme von Wärmetauschern, die im Bericht „Praxiserfahrungen in der Schweiz“ beschrieben werden. Sie oben, Kapitel 3.1.5.2, S. 37 ff.

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

4.1.2.3 Größe des Kanals

Damit Wärmetauscher in bestehende Kanäle eingebaut werden können, müssen die Kanäle einen Innendurchmesser von mindestens 800 mm (Kreisprofile) bzw. einen Kanalquerschnitt von mindestens 800 x 800 mm (Rechteck-, Ovalprofile) aufweisen (Mindestquerschnitt DN 800).

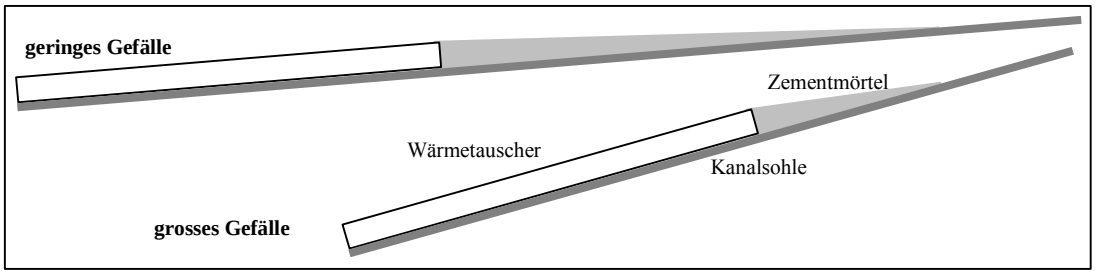
In Kanälen dieser Größe können einerseits die Wärmetauscher sicher eingebaut und gewartet werden (Zugänglichkeit und Sicherheit gewährleistet), andererseits verfügen sie in der Regel über ein ausreichendes Wärmeangebot im Abwasser für eine wirtschaftliche Abwasserwärmenutzung (ausreichende Abwassermenge).

Bei vorgefertigten Kanalelementen mit integriertem Wärmetauscher (Kanalisations-Neubauten mit integriertem Wärmetauscher) sind Kanaldurchmesser ab 500 mm möglich.

4.1.2.4 Kanalgefälle

Das Kanalgefälle spielt aus Sicht der Kanalbetreiber nur bezüglich des Einbaus von Wärmetauschern eine untergeordnete Rolle: Der Übergangsbereich von der Kanalsohle zum ersten Wärmetauscherelement (Auftragshöhe ca. 10-20 mm) muss gefällsmäßig mittels wasserdichtem Zementmörtel ausgeglichen werden, damit keine Grobstoffe hängen bleiben können. Dabei ist bei kleineren Kanalgefällen (kleinere Abflussgeschwindigkeiten) ein größerer Materialauftrag nötig, damit der Gefällswechsel einen möglichst geringen Einfluss auf die Hydraulik hat (möglichst kein Gegengefälle).

Übergangsbereich Kanalsohle-Wärmetauscher



Darstellung: Ryser Ingenieure AG

Weiter ist das Gefälle nur bei der detaillierten Dimensionierung der Wärmetauscher durch den Wärmetauscherlieferanten ein Einflussfaktor (größeres Gefälle → größere Abflussgeschwindigkeiten über der Wärmetauscheroberfläche → besserer Wärmedurchgang → größere Wärmetauscherleistung).

4.1.2.5 Kapazität des Kanals

Die Kapazität des betreffenden Kanalisationsabschnitts darf durch den Wärmetauscher und alle zugehörigen Einbauten wie Vor- und Rücklaufleitungen nur so stark vermindert werden, dass die maximale Durchflussmenge (auch bei Regenwetter) gemäss Auslegung der Kanalisation sowie allfälligen Reserven gemäß allfälliger Entwässerungsplanungen und Ausbauprojekte

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

(Erweiterung des Einzugsgebietes, Prognosezustand der Entwässerungsplanung) immer noch problemlos abfließen kann (kein Rückstau durch Kontrollschächte an die Terrainoberfläche).[72]

Der Wärmetauscher selbst vermindert den Kanalquerschnitt mit einem Auftrag von 10 - 20 mm nur geringfügig. Größer ist der Querschnittsverlust durch Vor- und Rücklaufleitungen. Je größer der Kanal ist, desto geringer ist der anteilsmäßige Querschnittsverlust durch den Einbau eines Wärmetauschers. Die nachfolgende Tabelle zeigt die Querschnittsreduzierung und dadurch folgende Verminderung der Abflusskapazität von Kanalisationsrohren verschiedenen Durchmessers (Kreisprofil) beim Einbau eines 1.000 mm breiten und 15 mm auftragenden Wärmetauschers inkl. Vor- und Rücklaufleitung mit einem Außendurchmesser von 150 mm (in der Praxis häufig verwendete Masse).

Reduktion von Kanalquerschnitt und Abflusskapazität durch Wärmetauschereinbau

Rohr-durch-messer [mm]	Kanalquerschnitt ohne Einbauten [m^2]	mit WT [m^2]	Reduk-tion [%]	mit WT und Vor-/Rücklauf [m^2]	Reduk-tion [%]	maximale Abflussmenge (freier Abfluss) ohne Einbauten [m^3/s]	mit WT [l/s]	Reduk-tion [%]	mit WT und Vor-/Rücklauf [l/s]	Reduk-tion [%]
800	0.50	0.49	**3.0**	0.45	**10.0**	0.92	0.89	**3.7**	0.81	**12.3**
1'000	0.79	0.77	**1.9**	0.74	**6.4**	1.68	1.63	**2.7**	1.55	**7.5**
1'200	1.13	1.12	**1.3**	1.08	**4.5**	2.73	2.67	**2.0**	2.55	**6.4**
1'500	1.77	1.75	**0.8**	1.72	**2.8**	4.94	4.85	**1.8**	4.77	**3.4**
2'000	3.14	3.13	**0.5**	3.09	**1.6**	10.64	10.57	**0.6**	10.36	**2.6**

Annahmen:
- Wärmetauscher (WT): 1m breit und 15 mm hoch
- Vor- und Rücklaufleitung: je 150 mm Aussendurchmesser
- Kanal: 4 Promille Gefälle / Strickler-Wert 85 $m^{1/3}$/s

Darstellung: Ryser Ingenieure AG

Die nötige Kapazität der Kanalisation ist bei Planung und Einbau eines Wärmetauschers in der Kanalisation in jedem Fall anhand der Vorgaben der Entwässerungsplanung durch Fachingenieure zu prüfen.

4.1.2.6 Abwassermenge

Für die Dimensionierung eines Wärmetauschers in der Kanalisation maßgebend ist der Abwasseranfall bei Trockenwetter, d. h. das anfallende Abwasser aus Haushalten, Gewerbe, Industrie sowie das Fremdwasser.

Aus technischen Gründen (genügende Wärmemenge) ist für die Abwasserwärmenutzung eine minimale Abwassermenge von 15 l/s (Jahresmittelwert des täglichen Trockenwetteranfalls) erforderlich.

Eine mittlere Trockenwetterabflussmenge von 15 l/s ist nach unseren Abschätzungen in Deutschland bei Kanälen ab rund 50.000 angeschlossenen Einwohnerwerten vorhanden.

[72] Gemäß bisheriger Erfahrungen aus der Schweiz ist eine Querschnittsverengung von bis zu 10 % in der Regel tolerierbar.

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

Abwassermenge bei Trockenwetter in Abhängigkeit der angeschlossenen Einwohnerwerte

Eiwohnerwerte [EW]	Mittlere Abwassermenge bei Trockenwetter [l/s]	[l/min]	[m^3/d]
2.000	5,8	350	500
3.000	8,7	520	750
4.000	11,6	700	1.000
5.000	14,5	870	1.250
6.000	17,4	1.040	1.500
8.000	23,1	1.390	2.000
10.000	28,9	1.740	2.500

Darstellung: Ryser Ingenieure AG

Der einzubauende Wärmetauscher muss beim Abfluss der maßgebenden Abwassermenge in der Kanalisation (mittlerer Trockenwetterabfluss) ganz im Abwasser eingetaucht sein.

Bei einem ausgeglichenen Abwasseranfall (flacher Tagesgang ohne große Spitzen und Minima, tritt eher bei größeren Einzugsgebieten auf) sind die Voraussetzungen für eine effiziente Abwasserwärmenutzung besser als bei einem Kanal mit großen Schwankungen im Abwasseranfall (bei kleinen Einzugsgebieten).

4.1.2.7 Abwassertemperatur

Grundsätzlich gilt: je höher die mittlere Temperatur des Abwassers, desto besser für die Abwasserwärmenutzung. Denn eine hohe Abwassertemperatur erlaubt grundsätzlich eine größere Abkühlung und damit einen größeren Wärmeentzug.

Damit die Reinigungsleistung einer nachgeschalteten Kläranlage nicht nachteilig beeinflusst wird, muss die durch die Abkühlung beim Wärmetauscher resultierende Abwassertemperatur im Kläranlagen-Zulauf auch im Winter (Mittelwert der Monate Dezember bis Februar) über 10 °C liegen und die Abkühlung im Kläranlagen-Zulauf darf höchstens 0,5 K betragen. Dabei sind allfällige weitere Abwasserwärmenutzungsanlagen im Einzugsgebiet der gleichen Kläranlage zu berücksichtigen (Prinzip „first come - first serve“).

Bei der Wärmenutzung aus Abwasser im Ablauf einer Kläranlage kann das Abwasser stärker abgekühlt werden, dafür ist aber oft die Distanz zu den Heizzentralen größer (lange Leitungen für Sekundärkreislauf bzw. Nahwärmenetz nötig, d.h. großer Wärmeverlust).

4.1.2.8 Linienführung und Lage des Kanals

Der Kanalabschnitt mit Wärmetauscher sollte möglichst geradlinig verlaufen und keine Kurven aufweisen (einfachere Konstruktion und Montage des Wärmetauschers). Ideal sind gerade Kanalabschnitte von 20 bis 200 m Länge, je nach Größe der Abwasserwärmenutzungsanlage.

Der gesamte Wärmetauscher sollte aus wärmeübergangstechnischen Gründen (Dimensionierung) nicht länger als 200 m sein, weil dadurch die mittlere Temperaturdifferenz zwischen Abwasser und Wärmetauschermedium (Sekundärkreislauf) zu klein für eine effiziente Wärmetauscherleistung wird (längere Wärmetauscher bringen durch zusätzliche Oberfläche nicht unbedingt mehr Leistung).

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

Aus wirtschaftlichen Gründen ist es ideal, wenn der Kanalabschnitt mit dem Wärmetauscher in unmittelbarer Nähe von den Standorten der Heizzentralen v.a. von öffentlichen Gebäuden (potentielle Wärmeabnehmer) verläuft (kurze Distanz für die Leitungsführung des Sekundärkreislaufs bzw. das Nahwärmenetz, damit die Wärmeverluste durch den Transport und der Energieverbrauch für die Umwälzung möglichst gering sind).

Dabei ist es wirtschaftlich günstiger, wenn der notwendige Leitungsbau für das Nahwärmenetz (muss in den Leitungskataster aufgenommen werden) in unbebautem Terrain erfolgen kann. Der Bestfall wäre eine direkte bestehende Verbindung für die Leitungsführung zur Heizzentrale, beispielsweise ein bestehender Seitenkanal.

Bei einer unmittelbar beim Abwasserkanal platzierten Heizzentrale sollten sich die Wärmeverbraucher innerhalb eines Radius von 100 m befinden (System „warme Nahwärme“). Eine vom Kanal weiter entfernte, direkt beim Wärmeverbraucher (große Überbauung oder großes öffentliches Gebäude) platzierte Heizzentrale sollte maximal zwei km vom Kanal entfernt sein (System „kalte Nahwärme“).

4.1.2.9 Alter des Kanals

Das Alter eines Kanals, d. h. das Baujahr, hat für die Abwasserwärmenutzung keine direkte Bedeutung. Wärmetauscher können sowohl in alte als auch neuere bestehende Kanäle eingebaut werden.

Von Vorteil für den Wärmetauschereinbau ist es, wenn der Kanal noch in relativ gutem Zustand ist. Der Einbau eines Wärmetauschers lässt sich aber auch gut kombinieren mit der Sanierung eines betreffenden Kanalabschnitts. Mit dem Wärmetauschereinbau kann zugleich eine Ausbesserung der Kanalsohle einhergehen, es erfolgt dann im Rahmen des Wärmetauschereinbaus eine gleichzeitige Werterhaltung. Muss ein Kanalabschnitt altershalber sowieso im Rahmen von Projekten der Entwässerungsplanung saniert, erneuert oder ersetzt werden, kann der Wärmetauschereinbau kostengünstig geplant und realisiert werden (Kostenteiler zwischen Kanalbetreiber und Wärmenutzer). Sind in der Nähe gleichzeitig auch noch Heizungssanierungen geplant, ist die Realisierung eine Abwasserwärmenutzungsanlage sinnvoll und es können allseits positive Synergien genutzt werden.

Am einfachsten und günstigsten ist die Erstellung eines Wärmetauschers zu Zwecken der Abwasserwärmenutzung bei Kanalisations-Neubauten, weil da das zusätzliche Element Wärmetauscher bereits in der Planungsphase einbezogen werden kann (freie Wahl des Wärmetauschersystems) und der Kanal entsprechend dimensioniert werden kann. Das Wärmetauscherelement inkl. Vor- und Rücklaufleitungen kann bereits im Werk direkt in ein neues Kanalisationsrohr integriert werden.

4.1.2.10 Zugänglichkeit und Sicherheit

Während der Einbauphase eines Wärmetauschers müssen bei der Zugänglichkeit und Sicherheit besondere Bedingungen gegenüber dem späteren Betrieb der Kanalisation mit Wärmetauscher eingehalten werden. Deshalb wird in diesem Kapitel unterschieden zwischen

- Zugänglichkeit und Sicherheit während der Bauphase / Provisorien sowie
- Zugänglichkeit und Sicherheit im Betrieb

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

(1) Zugänglichkeit und Sicherheit während der Bauphase / Provisorien

Bei Neubauten sollten spezielle Montage- und Einstiegsöffnungen (80x80 cm mit ausziehbaren Einstiegsleitern) für die Zugänglichkeit zum Wärmetauscher bereits in der Planung vorgesehen und realisiert werden.

Montageöffnung in Zwingen (Basel, CH)

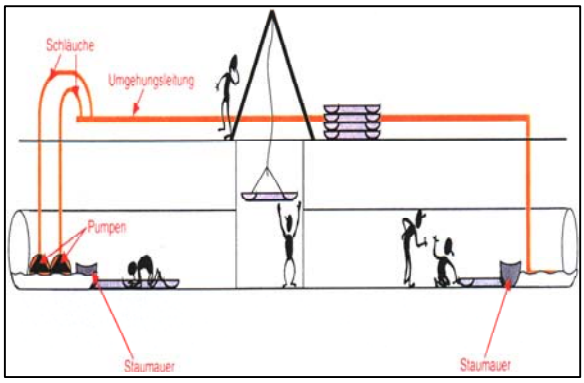
Darstellung: Ryser Ingenieure AG

Beim Einbau von Wärmetauschern in bestehende Kanäle sind mindestens provisorische (oder verbleibende) Montageöffnungen für die Einbringung der Wärmetauscherelemente nötig. Für die möglichst einfache Montage sollten einzelne Wärmetauscherelemente nicht länger als 3 m sein. Idealerweise werden auch beim nachträglichen Wärmetauschereinbau in bestehende Kanäle spezielle Einstiegsöffnungen (80 x 80 cm) mit ausziehbaren Einstiegsleitern, evtl. Bau eines zusätzlichen Kontrollschachtes) sowohl für Installationsarbeiten als auch für die spätere Zugänglichkeit für Wartungs- und Reparaturarbeiten vor Ort erstellt. Mit dem Einbau eines Wärmetauschers wird so auch für eine bessere Zugänglichkeit zur Kanalisation gesorgt, was der Werterhaltung der Kanalisation dienlich ist.

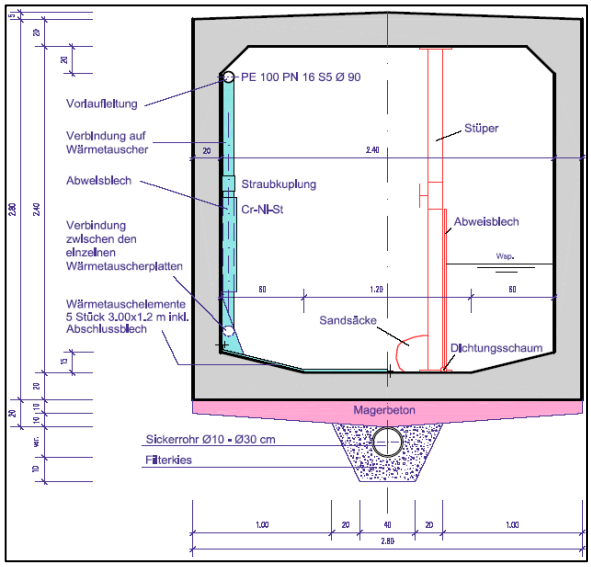
Beim Einbau eines Wärmetauschers in eine bestehende Kanalisation muss vorab sichergestellt werden, dass das anfallende Abwasser auch während der Bauphase abfließen kann. Aus diesem Grund müssen geeignete Provisorien oder Umleitungen erstellt und betrieben werden. Da die Bauzeit für den Einbau des Wärmetauschers in den meisten Fällen nur 5 bis 10 Arbeitstage dauert, sind dabei möglichst einfache Lösungen anzustreben, die an die örtlichen Gegebenheiten angepasst sind. Bei kleineren Kanälen mit geringen Trockenwetterabflussmengen (bis ca. 50 l/s) kann eine mobile, temporäre Pumpleitung eingesetzt werden (siehe nachfolgende Abbildung). Auch denkbar ist die Fassung und Ableitung des Trockenwetterabflusses in einem kleinen Rohr innerhalb des Kanals (bei Trockenwetterabflussmengen bis ca. 30 l/s denkbar – bei 30 l/s wird ein Rohr mit einer Nennweite von 300 mm benötigt). Bei größeren Kanälen mit hohen Abflussmengen (bei Abflussmengen > 50 l/s wird das Umpumpen sehr aufwendig und teuer) kann der Kanal in der Mitte mit einer Trennwand bestehend aus Stüper, Abweisblech, Sandsäcken und Dichtungsschaum aufgeteilt werden, so dass auf der einen Seite das Abwasser abfließen kann, während auf der anderen Seite der Wärmetauscher eingebaut wird (siehe nachfolgende Abbildung).

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

Umleitung mittels Abwassertauchpumpen



Umleitung mittels Kanalaufteilung



Darstellung: Ryser Ingenieure AG

Die folgenden Sicherheitsmaßnahmen sollten beim Einbau eines Wärmetauschers in eine bestehende Kanalisation mit fließendem Abwasser (Provisorium) angewendet werden (ist entweder vom montierenden Unternehmer in die Kosten einzurechnen und auszuführen oder bauseits vom Kanalnetzbetreiber zu übernehmen):

- Akustische (Horn) und optische (Blinklicht) Warnung bei ansteigendem Wasserspiegel in der Kanalisation (Messung mittels Echolot), Ausfall einer Pumpe oder bei Regenereignis im Einzugsgebiet (Vorwarnzeit je nach Einzugsgebiet und Lage im Kanalnetz rund 10 bis 30 Minuten).
- Auffangnetz auf der Abflussseite des Wärmetauschers mit möglichem Ausstieg aus der Kanalisation.
- Zusätzliche Sicherheit durch doppelte Staumauer im Kanal vor dem Wärmetauscher (ergibt eine geringe Vorwarnzeit bei steigender Abflussmenge)

(2) Zugänglichkeit und Sicherheit im Betrieb

Der gesamte Kanalbereich mit dem integrierten Wärmetauscher muss unter Einhaltung der aktuell gültigen gesetzlichen Arbeitssicherheitsvorschriften für Kontrollgänge und allfällige Reparaturarbeiten zugänglich sein. Eine arbeitstechnisch den Sicherheitsvorschriften entsprechende Zugänglichkeit zum Wärmetauscher sowie den Vor- und Rücklaufleitungen muss möglich sein. Dazu sind entweder Kontrollschächte oder falls keine solchen im entsprechenden Kanalabschnitt vorhanden sind, eine separate Montageöffnung für den Wärmetauscher, nötig. Ansonsten gelten für Zugänglichkeit und Sicherheit beim Betrieb einer Kanalisation mit integriertem Wärmetauscher die allgemein gültigen Vorschriften für Kanalisationen in Deutschland.

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

4.1.2.11 Wartung und Unterhalt

Grundsätzlich bleibt der Aufwand für Wartung und Unterhalt der Kanalisation nach dem Einbau eines Wärmetauschers für den Kanalnetzbetreiber unverändert. Kanalreinigungs- und TV-Arbeiten werden durch den Wärmetauscher nicht tangiert.

Als zusätzlicher Aufwand sind regelmäßige Kontrollen des Kanalisationsabschnitts mit Wärmetauscher durch den Betreiber der Wärmenutzungsanlage in Absprache mit und/oder zusammen mit dem Kanalnetzbetreiber (Abläufe und Verantwortlichkeiten sind in Vereinbarungen zu definieren) durchzuführen. Diese Kontrollen sollten bei eingespieltem Betrieb der Abwasserwärmenutzungsanlage ca. 1 bis 2 mal pro Jahr erfolgen. In der ersten Phase nach Einbau und Inbetriebnahme des Wärmetauschers sollte diese Kontrolle im Rahmen einer Qualitätssicherung häufiger erfolgen (ca. alle 2 Monate: Hängenbleiben von Grobstoffen, Verbesserung allfälliger Problemzonen).

Bei den regelmäßigen Kontrollen entdeckte allfällige Schäden am Wärmetauscher mit zugehörigen Einbauten müssen nach Angaben des Betreibers der Wärmenutzungsanlage in Absprache mit und unter Aufsicht des Kanalnetzbetreibers behoben werden. Dafür muss der gesamte Kanalisationsbereich mit Wärmetauscher entsprechend zugänglich sein. Kontrollen und Reparaturen müssen an jeder Stelle möglich sein. Deshalb sind geeignete Montageöffnungen einzuplanen und zu erstellen.

4.1.2.12 Reinigung des Wärmetauschers

Je nach Verschmutzung des Wärmetauschers ist allenfalls eine periodische Reinigung der Wärmetauscheroberfläche nötig, um die Leistung des Wärmetauschers langfristig auf dem gleichen Niveau erhalten zu können.

Die Verschmutzung und damit die nötigen Reinigungsintervalle sind stark abhängig von den örtlichen Gegebenheiten, den hydraulischen Verhältnissen und dem Abwasser (Anteil und Art von Schmutzstoffen), weshalb dazu kaum allgemeine Aussagen gemacht werden können. Das Ausmaß der Wärmetauscher-Verschmutzung kann heute noch nicht einfach vorhergesehen werden.

Grundsätzlich kann die Aussage getroffen werden, dass bei größeren Abwassermengen und -geschwindigkeiten (größeres Kanalgefälle und größere Schleppkraft des Abwassers) die Verschmutzung der Wärmetauscheroberfläche geringer ist. In Mischkanalisationen erfolgt bei Regenwetter eine Selbstreinigung und Spülung des Wärmetauschers mit Regenwasser. Erste Untersuchungen im Zusammenhang mit Biofilmbildung auf Wärmetauschern und deren Verminderung wurden in der Schweiz durch die Eidgenössische Anstalt für Abwasserreinigung, Wasserversorgung und Gewässerschutz (EAWAG) durchgeführt (Oberflächenbehandlung und Beschichtung von Wärmetauschern, kein Einbezug der Abwasserzusammensetzung).

Als Stand der Technik bei der Reinigung der Wärmetauscher werden momentan die folgenden Lösungen praktiziert und empfohlen:

1. Die Verschmutzung des Wärmetauschers wird in Kauf genommen und es wird auf eine periodische Reinigung verzichtet. Der Wärmetauscher wird entsprechend großzügig dimensioniert und ausgelegt (Faktor 1,5 größer).

2. Es wird eine periodische Reinigung des Kanalabschnitts mit Wärmetauscher durch ein spezialisiertes Kanalreinigungsunternehmen in Absprache mit dem Kanalnetzbetreiber durchgeführt (beispielsweise im Abonne-

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

ment). Die allfällige periodische Reinigung des Wärmetauschers sollte in die bestehenden Wartungs- und Unterhaltsabläufe eines Kanalnetzbetreibers einbezogen werden.

Bei Fällen mit starker Verschmutzung ist auch der Einsatz einer fix installierten automatischen Spül- und Reinigungseinrichtung (Schwallspülung) denkbar. Dazu liegen aber noch keine Praxiserfahrungen im speziellen Zusammenhang mit Wärmetauschern in Kanalisationen vor. Für die Reinigung von Kanalisationen werden solche Verfahren jedoch bereits in der Praxis angewendet und sind auf dem Markt erhältlich.

4.1.2.13 Reinigung der Kanalisation allgemein

Routinemäßige Spül- und Reinigungsarbeiten an der Kanalisation oder Kanalreinigungs- und TV-Arbeiten im Rahmen von Entwässerungsplanungen dürfen durch die Einbauten im Kanal nicht verhindert werden, oder es muss ein spezieller Reinigungsvorgang für den betreffenden Kanalabschnitt definiert und angewendet werden. Auch Instandstellungs- und Erneuerungsarbeiten am Kanal müssen weiterhin möglich sein. Dabei müssen alle bestehenden Arbeitssicherheitsvorschriften jederzeit eingehalten werden können.

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

4.2 Anforderungen der Netzbetreiber an den Einbau von Wärmetauschern in Abwasserkanalisationen

4.2.1 Technische Anforderungen: Vollzug der Entwässerungsaufgabe

4.2.1.1 Aus Bau und Betrieb von Kanalisationen resultierende Anforderungen

Sofern WT-Elemente in Abwasserkanälen eingebaut werden, sind sie als Bauteil der Ortsentwässerung bzw. Entwässerungsanlage anzusehen. Anforderungen ergeben sich aus dem Bau, dem Betrieb und der Sanierung der Bauteile, die den geltenden Regelwerken wie dem ATV-Arbeitsblatt ATV-DVWK-A 157,[73] der DIN EN 752-2[74] oder den Unfallverhütungsvorschriften (UVV) entnommen werden können.

Neben den baulichen Anforderungen

- Standsicherheit,
- Wasserdichtheit gemäß den Prüfanforderungen sowie
- Widerstandsfähigkeit gegen innere und äußere schädliche Einflüsse

bestehen weitere, auf den baulichen Anforderungen aufbauende Anforderungen aus dem Betrieb von Entwässerungssystemen. Im Einzelnen sind dies

- verstopfungsfreier Betrieb,
- Begrenzung der Überflutungshäufigkeiten auf die vorgeschriebenen Werte,
- Schutz von Gesundheit und Leben der Öffentlichkeit,
- Begrenzung der Überlastungshäufigkeiten auf die vorgeschriebenen Werte,
- Schutz von Gesundheit und Leben des Betriebspersonals,
- Schutz der Vorfluter vor Verschmutzung im Rahmen festgelegter Grenzen,
- Ausschluss der Gefährdung von bestehenden angrenzenden Bauten und Ver- und Entsorgungseinrichtungen durch Abwasserkanäle und –leitungen,
- Erreichung der geforderten Nutzungsdauer und Erhaltung des baulichen Bestandes,
- Vermeidung von Geruchsbelästigungen und Giftigkeit sowie
- Sicherstellung der geeigneten Zugänglichkeit für Unterhaltungszwecke.

---

[73] ATV-DVWK-Arbeitsblatt 157, ATV A 157, Bauwerke der Kanalisation, November 2000.

[74] DIN EN 752-2: Entwässerungssysteme außerhalb von Gebäuden, Teil 2: Anforderungen. Ausgabe September 1996, Berlin 1996.

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

4.2.1.2 IKT-Prüfungen an Wärmetauschern

4.2.1.2.1 Prüfbedarf

Vor dem Einbau von Wärmetauscherelementen im Rahmen von Neubau oder Sanierungsmaßnahmen ist in einem ersten Schritt zu klären, inwieweit die baulichen Anforderungen durch das gewählte Wärmetauschersystem erfüllt werden. Die Standsicherheit ist dann gewährleistet, wenn die Bauwerke so gegründet und konstruiert sind, dass Setzungen soweit wie möglich ausgeschlossen sind bzw. die zu erwartenden Belastungen sicher aufgenommen werden können. Dies ist nachzuweisen. In der statischen Berechnung sind die Lastfälle Eigengewicht, horizontaler Erddruck, Erdauflast, Verkehr, Grundwasser u.a. zu berücksichtigen. Beim Anschluss von Rohren an Bauwerke können unzulässige Zwängungsbeanspruchungen, z.B. durch unterschiedliche Setzungen von Schacht und Rohrleitung und unmittelbaren Einfluss von Verkehrsbelastung auftreten. Daher sind bei Rohren mit Nennweiten bis DN 1200 die Abwasserkanäle und -leitungen doppelgelenkig anzuschließen. Im Einzelfall kann auf die Doppelgelenkigkeit verzichtet werden, wenn nachgewiesen wird, dass diese Einflüsse nicht auftreten oder von Schacht und Rohr schadlos aufgenommen werden können. Bei Rohren mit Nennweiten > DN 1200 kann auf Doppelgelenkigkeit verzichtet werden. Die Auftriebssicherheit ist unter Berücksichtigung der ungünstigsten Wasserstände nachzuweisen. Die horizontalen und vertikalen Bauwerksfugen müssen alle vertikalen und horizontalen Lasten störungsfrei übertragen können.

Die Wasserdichtheit der Bauwerke ist nach DIN EN 1610 zu prüfen. In Wasserschutzgebieten und noch nicht förmlich festgesetzten Wassergewinnungsgebieten für die öffentliche Trinkwasserversorgung sind die jeweiligen gesetzlichen Bestimmungen und das Arbeitsblatt ATV- A 142[75] zu beachten.

Zudem müssen alle Bauteile und Baustoffe eine ausreichende Widerstandsfähigkeit gegenüber der Aggressivität des Grundwassers und der anstehenden Böden sowie der Zusammensetzung des Abwassers besitzen.

Die betrieblichen Anforderungen können in zwei Gruppen untergliedert werden. In der ersten Gruppe finden sich Anforderungen, die sich durch die Funktion des Bauwerks ergeben. Zu nennen ist beispielsweise die Begrenzung der Überflutungshäufigkeiten auf die vorgeschriebenen Werte oder der Schutz der Vorfluter vor Verschmutzung im Rahmen festgelegter Grenzen. In der zweiten Gruppe finden sich Anforderungen, die Auswirkungen auf den Betrieb der Entwässerungsbauwerke durch das Kanalbetriebspersonal haben. Vor dem Hintergrund der Anforderungen und des Prüfbedarfs ist im IKT das nachfolgend dargestellte Prüfprogramm entwickelt und durchgeführt worden.

4.2.1.2.2 Überblick über das IKT-Prüfprogramm

Die IKT - Untersuchungen wurden mit dem Ziel durchgeführt, spezielle, durch den Einbau von Wärmetauscherelementen auftretende Fragestellungen zu beantworten. Es wurden Versuche zur Beurteilung der Arbeitssicherheit, der Dauerhaftigkeit und der Auswirkung von Kanalreinigungen durchgeführt.

---

[75] ATV-DVWK-Arbeitsblatt 142, ATV A 142 Abwasserkanäle und –leitungen in Wassergewinnungsgebieten, November 2002.

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

(1) Arbeitssicherheit

Das Arbeiten auf einer abwassertechnischen Anlage und in der Kanalisation gehört überwiegend zu den gefährlichen Arbeiten. Zum sicheren Betrieb einer abwassertechnischen Anlage müssen bauliche Mindestanforderungen eingehalten werden. Richtlinien der Europäischen Union, Vorschriften der gesetzlichen Unfallversicherungsträger, DIN- und EN- Normen geben hierzu verbindliche Hinweise. Zu ergreifende Maßnahmen sind in den Unfallverhütungsvorschriften (UVV) enthalten.

Als Wärmetauscherelemente werden häufig Edelstahlelemente eingesetzt, die einen direkten Kontakt mit dem Abwasser haben und für Inspektions- und Wartungsarbeiten begangen werden müssen. Während Erfahrungen der Netzbetreiber mit Werkstoffen wie Beton, Steinzeug etc. bezüglich der Gefahr des Ausrutschens vorliegen, gibt es diese Erfahrungen für in Abwasser befindliche Edelstahloberflächen nicht. Im Rahmen der IKT-Prüfungen wurden deshalb zur Beurteilung der Gefahr des Ausrutschens Reibungsbeiwerte mit zwei unterschiedlichen Verfahren ermittelt. Die ermittelten Werte wurden im Rahmen einer Begehung eines mit WT-Elementen versehenen Kanalabschnitts einer subjektiven Plausibilitätsüberprüfung unterzogen, um auf dieser Grundlage schließlich Hinweise zur Arbeitssicherheit zu erarbeiten.

(2) Dauerhaftigkeit und Kanalreinigung

Im Prüfungsschwerpunkt Dauerhaftigkeit wurden im IKT Edelstahlbauteile unterschiedlichen betrieblichen Einwirkungen ausgesetzt, das jeweilige Bauteil nach der Einwirkung untersucht und aufgrund der Ergebnisse bewertet. Es wurden Abriebversuche in der sogenannten Darmstädter Kipprinne durchgeführt und die Auswirkungen der Kanalreinigung insbesondere durch die Einwirkung von Hochdruckreinigungsdüsen sowie deren Wasserstrahlen untersucht. Darüber hinaus wurde die Beständigkeit der Edelstahlbauteile gegenüber Korrosion untersucht, wobei die Korrosionsversuche auf die besonderen Belastungen durch Abrieb und Kanalreinigung sowie den sich daraus ergebenden Veränderungen der Edelstahloberfläche abgestimmt wurden. Einen Überblick über das IKT-Prüfprogramm gibt die nachfolgende Tabelle.

Übersicht zum IKT-Prüfprogramm

	Versuch	**Prüfkriterium/Ergebnis**
Arbeitssicherheit	Kastenschergerät	Haft- u. Gleitreibungsbeiwert
	Insitu-Gleitreibungsbeiwertbestimmung	Gleitreibungsbeiwert
	Begehung	Gefahr des Ausrutschens
Dauerhaftigkeit	Einlagerung nach DIN EN 175	Inaugenscheinnahme und Masseverlust
	Einlagerung nach betrieblicher Belastung	Inaugenscheinnahme
	Darmstädter Kipprinne	Abrieb
Kanalreinigung	Schleifversuche mit einem Düsenkörper	mechanische Beanspruchung
	Schlagversuche	mechanische Beanspruchung
	Hamburger Spülversuch	hydrodynamische Beanspruchung

IKT – eigene Darstellung

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

4.2.1.2.3 Untersuchungen zur Dauerhaftigkeit

4.2.1.2.3.1 Abrieb

(1) Versuchsaufbau

Durch Abwasserkanäle und –leitungen wird Abwasser in unterschiedlicher Zusammensetzung transportiert. So finden sich im Abwasser gelöste Stoffe, z.B. chemische Reinigungsmittel, aber auch nicht lösbare Feststoffe, wie Sand oder Schotter. Die Strömungsgeschwindigkeit des Abwassers reicht üblicherweise aus, um diese Feststoffe z.B. bis zu einer Kläranlage zu transportieren. Das transportierte Wasser-Feststoff-Gemisch verursacht auf der Sohle der durchflossenen Abwasserrohre einen mechanischen Angriff in Form von Abrieb, der in Abhängigkeit vom Rohrwerkstoff unterschiedlich groß sein kann.

Mit Hilfe eines Versuchs, der in verschiedene Normen zur Bestimmung der Abriebfestigkeit herangezogen wird,[76] kann der Abrieb bzw. die Abriebfestigkeit eines Rohres unter Laborbedingungen überprüft werden. Der Abrieb als Maß für den mechanischen Verschleiß von Rohren wird im sogenannten Darmstädter Kipprinnenversuch festgestellt. Bei diesem Versuch wird eine Rohrhalbschale, üblicherweise DN 300 mit einer Länge von 1000 mm, in einen Versuchsstand (vgl. nachfolgende Abbildungen) eingebaut und anschließend über eine Exzenterwelle um jeweils 22,5° gegen die Horizontale hin und her gekippt. In der Halbschale befindet sich ein definiertes Gemisch aus Wasser und verschiedenen Zuschlagstoffen (Feststoffe), durch welches beim Kippen der mechanische Angriff entsteht. Der Versuch wird mit 200.000 Lastspielen durchgeführt. Der Abrieb wird mit einer mechanischen Messuhr, die über eine Messbrücke geführt wird, an zuvor festgelegten Stellen bestimmt und nach 50.000, 100.000 und 200.000 Lastspielen ermittelt.

Im Rahmen der IKT-Untersuchungen wurde die Abriebfestigkeit der Edelstahlrinne (System Rabtherm) mit Hilfe gesondert hergestellter Probekörper ermittelt. Es wurde eine Edelstahlhalbschale mit der Werkstoffnummer[77] 1.4571, einem Durchmesser DN 320 und einer Länge von 1000 mm verwendet. Die Wandstärke von 3 mm entspricht der Wandstärke der in Leverkusen eingesetzten Wärmetauscherelemente. Die Abriebtiefe wurde nach 50.000, 100.000 und 200.000 Lastspielen ermittelt.

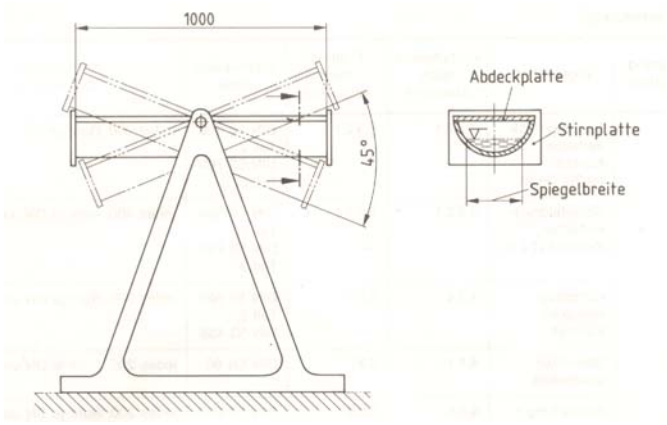
---

76 Vgl. bspw. DIN EN 19565, DIN EN 295 und DIN EN 598.

77 Werkstoffe werden firmenunabhängig mit einem Zahlenkürzel, der sogenannten Werkstoffnummer nach DIN EN 10088 gekennzeichnet. Über die Werkstoffnummer sind die jeweiligen prozentualen Anteile der zugegebenen Legierungsmittel definiert, die maßgeblich die Eigenschaften der rostfreien Edelstähle beeinflussen. Legierungsmittel sind Kohlenstoff (C), Silizium (Si), Mangan (Mn), Phosphor (P), Schwefel (S), Chrom (Cr), Stickstoff (N), Molybdän (Mo), Nickel (Ni) und Titan (Ti). Die Werkstoffnummer 1.4571 steht für eine definierte Materiallegierung.

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

Kipprinnenversuch, Prinzipskizze



IKT-Kipprinne im Betrieb, Beispiel

IKT – eigene Darstellung

(2) Versuchsergebnisse

Die maximale Abriebtiefe nach 200.000 Lastspielen betrug 0,24 mm. Das entspricht 8 % der Gesamtwandstärke der Edelstahlhalbschale. Die Edelstahlhalbschalen zeigten nach Abschluss der Abriebversuche mit 200.000 Lastwechseln leichte Veränderungen der Oberfläche. Die Abbildungen auf S. 83 zeigen die durch Abrieb beanspruchten Innenflächen der Probekörper nach 200.000 Lastwechseln in Form einer heller erscheinenden Abriebspur sowie eine Stelle im Bereich der Abriebspur, an der eine kleine Vertiefung festgestellt wurde. Vermutlich entstand diese Vertiefung dadurch, dass eine bestehende Fehlstelle im Metall durch den Abrieb freigelegt wurde. Es verbleibt eine Wandstärke in Höhe von 2,76 mm. Weitere Auswirkungen durch den Abrieb auf den Kanalbetrieb sind nicht zu erkennen.

Maximale Abriebtiefe der Edelstahlrohrhalbschale					
Probenbez.IKT WEB-Nr.*	**Probenbezeichnung Auftraggeber**	**Nennweite [mm]**	**Anzahl der Lastwechsel Max. Abrieb [mm]**		
			50.000	100.000	200.000
H1471-3		DN 320	0,03	0,05	0,24
* IKT-WEB-Nr. = IKT-**W**aren**E**ingangs**B**uchnummer					

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

Edelstahlhalbschale mit Abriebspur nach der Abrieb-prüfung mit 200.000 Lastwechseln

Abriebspur in der Halbschale: ca. 0,5 mm große Vertiefung

IKT – eigene Darstellung

4.2.1.2.3.2 Korrosion

4.2.1.2.3.2.1 Zum Begriff der Korrosion

Im Rahmen von systematischen Untersuchung von Abwassernetzen wurden zunehmend Korrosionsschäden festgestellt.[78] Nach einer Erhebung der ATV-DVWK über den Zustand der Kanalisation in der Bundesrepublik Deutschland wird Korrosion als vierthäufigste Schadensursache hinter Riss-/Scherbenbildung, Undichtigkeiten und Abflusshindernissen genannt. Bei Korrosionsfragen besteht bisher häufig noch weitgehende Unsicherheit unter den Planern und Betreibern von Abwasseranlagen. Deshalb soll zunächst der Begriff "Korrosion" definiert werden:[79]

"Unter Korrosion im Bereich von Abwasseranlagen werden alle Reaktionen an nicht metallischen und metallischen Bau- und Werkstoffen mit ihrer Umgebung verstanden, die durch chemische, elektrochemische oder mikrobiologische Vorgänge zu einer Beeinträchtigung des Bau-/Werkstoffes führen. Schädigungen infolge mechanischer Einwirkungen, wie Abrieb, Erosion oder Frost, sind gesondert zu betrachten. Es ist nicht auszuschließen, dass solche Schäden, die als 'Korrosion' bezeichnet werden, durch eine kombinierte Beanspruchung von chemischen, mikrobiologischen und mechanischen Einwirkungen verursacht werden."

---

78 Der Zustand der öffentlichen Kanalisation in der Bundesrepublik Deutschland - Ergebnisse der ATV-Umfrage 1990, Korrespondenz Abwasser, 37. Jg., Heft 10, 1990. Schadenshäufigkeitsverteilung bei TV-untersuchten Abwasserkanälen. Korrespondenz Abwasser Nr. 39, H. 3, S. 363-367, 1992. Schadensanalyse an Abwasserkanälen aus Beton- und Steinzeugrohren der Bundesrepublik Deutschland - West. Korrespondenz Abwasser Nr. 40, H. 2, S. 168-179, 1993.

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

4.2.1.2.3.2.2 Korrosionsvorgänge

4.2.1.2.3.2.2.1 Einfluss des Abwassers

Korrosionsvorgänge an Abwasserleitungen und -kanälen können durch die Wechselwirkungen zwischen Boden und Grundwasser, den speziellen Eigenschaften in natürlichen Böden sowie in künstlichen Böden stattfinden. Für Wärmetauscherelemente, die sich im Inneren von Kanalrohren befinden, hat vor allem die Abwasserzusammensetzung und die Kanalatmosphäre einen Einfluss auf die Dauerhaftigkeit dieser Bauteile.

Nach den kommunalen Ortssatzungen dürfen mit den Abwässern keine Stoffe abgeleitet werden, die den Bestand der öffentlichen Abwasseranlagen beeinträchtigen können. Einleitungsbegrenzungen existieren lt. ATV-A 115[80] insbesondere für den pH-Wert (6,5 - 10), für Sulfate (600 mg SO_4/l) und für die Abwassertemperatur (35 °C). Regenwasser bewirkt im Allgemeinen keinen chemischen Angriff.

Je nach Nutzung des Wassers - vor allem im gewerblichen und industriellem Bereich - können Abwässer dennoch verschiedene werkstoffangreifende Stoffe enthalten. Erfahrungsgemäß ist trotz der satzungsmäßigen Einleitungsbegrenzungen bei gewerblichen und industriellen Abwasserableitungen möglicherweise aggressiven Abwasserinhaltsstoffen Rechnung zu tragen, da der Betreiber öffentlicher Abwasseranlagen auch für Folgeschäden haftet, die durch verbotswidrige Abwasserableitungen entstehen, wenn der Verursacher nicht ermittelt werden kann. In Industriegebieten sollte daher korrosionsbeständiges Material verwendet werden.[81]

4.2.1.2.3.2.2.2 Biogene Schwefelsäure-Korrosion

Die Atmosphäre geschlossener Abwasseranlagen zeichnet sich allgemein durch eine hohe Feuchtigkeit mit Neigung zur Kondenswasserbildung aus. Bei ungeschützten metallischen Werkstoffen kann es dadurch zu Korrosionserscheinungen kommen. Die Anwesenheit von Schwefelwasserstoff führt an feuchten Stellen oberhalb des Wasserspiegels zur Bildung von Schwefelsäure mit einem entsprechend sehr starken Angriffsgrad bei zementgebundenen und ungeschützten metallischen Baustoffen. Die biogene Schwefelsäure-Korrosion (BSK) wird vorwiegend durch die biologische Umsetzung von Sulfatschwefel zu Sulfiden unter anaeroben Bedingungen im Unterwasserbereich induziert, selten auch durch Sulfide, die von Industriebetrieben eingeleitet werden. Vereinfacht lässt sich der Mechanismus des Sulfatumsatzes und der biogenen Schwefelsäure-Korrosion folgendermaßen beschreiben:

- Biologische Reduktion von Sulfaten und anderen Schwefelkomponenten im Abwasser unter anaeroben Bedingungen zu Sulfiden,
- Freisetzung von Schwefelwasserstoffgas in die Kanalatmosphäre, das sich an der feuchten Kanalwand löst;
- Biologische Oxidation des auf Baustoffen oberhalb des Abwasserspiegels gelösten H_2S zu Schwefelsäure und elementarem Schwefel.

---

79 ATV – M 168, Korrosion von Abwasseranlagen - Abwasserableitung - Juli 1998.

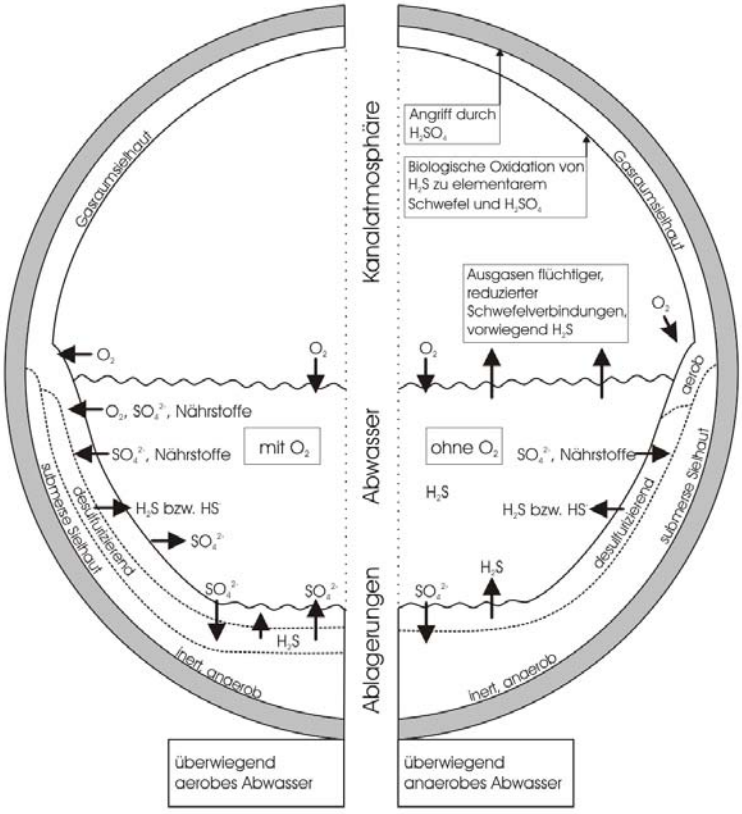
80 ATV-A 115: Einleiten von nicht häuslichem Abwasser in eine öffentliche Abwasseranlage, Oktober 1994

81 Vgl. Imhoff, K. (1999).

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

Die Arten des Sulfatumsatzes in überwiegend aerobem bzw. anaerobem Abwasser sowie ein durch biogene Schwefelssäurekorrosion geschädigtes Schachtbauwerk zeigen die nachfolgenden Abbildungen.

Sulfatumsatz in Abwasserkanälen mit überwiegend aeroben bzw. anaeroben Abwasser



Überwiegend aerobes Abwasser	*Überwiegend anaerobes Abwasser*
In einem Abwasserkanal finden Abbauvorgänge unter aeroben Verhältnissen statt. In der Sielhaut und in den Ablagerungen findet die Reduktion von Sulfaten und Eiweißverbindungen aus dem Abwasser statt. Sulfat, Nährsalze, Sauerstoff und organisches Substrat diffundieren aus dem Abwasser in die Sielhaut und die Ablagerungen. Ist der gelöste Sauerstoff aufgezehrt (bei Sielhäuten schon nach wenigen Zehntel Millimetern), beginnt die Reduktion des Sulfates zu Sulfid durch die strikt anaeroben Desulfurikanten. Das Sulfid diffundiert in Richtung auf das Abwasser, wobei es die obere, aerobe Schicht der Sielhaut bzw. der Ablagerungen passieren muß. Hier wird es, noch bevor es in das Abwasser gelangt, wieder zu Sulfat oxidiert. Unter aeroben Bedingungen kommt es demnach zwar in der Tiefe der Sielhaut und der Ablagerungen zu einer Sulfatreduktion, die reduzierten Schwefelverbindungen werden allerdings vor dem Erreichen des Abwassers wieder oxidiert.	Unter anoxischen oder anaeroben Abwasserbedingungen findet bereits in den oberen Schichten von Sielhaut und Ablagerungen die Reduktion von Sulfat statt. Die dabei entstehenden Sulfide können ungehindert in das Abwasser diffundieren. Hier stellt sich in Abhängigkeit vom pH-Wert des Abwassers ein Gleichgewicht zwischen H_2S und HS- ein. Bei üblichen pH-Werten im Abwasser zwischen pH 7 und 8 kann der Schwefelwasserstoffanteil zwischen 50 und 10 % betragen. Je niedriger der pH-Wert des Abwassers ist, um so größer ist der Anteil des H_2S am Gesamt-Sulfid und um so größer ist auch das H_2S-Potential, das in die Kanalatmosphäre freigesetzt werden kann und neben Korrosion auch zu Geruchsproblemen und Lebensgefährdung führen kann.

Modifiziert entnommen aus ATV-M 168, Korrosion von Abwasseranlagen - Abwasserableitung - Juli 1998

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

Auswirkungen biogener Schwefelsäure-Korrosion auf ein Schachtbauwerk

4.2.1.2.3.2.3 Korrosionsbeständigkeit von Bauteilen aus rostfreiem Edelstahl

Wärmetauscherelemente, die dem Abwasser direkt ausgesetzt sind, sollten aus einem Werkstoff gefertigt sein, der eine angemessenen Widerstandsfähigkeit gegenüber den betrieblichen Belastungen, insbesondere der Korrosionsbeständigkeit aufweist und zusätzlich einen angemessenen Wärmedurchgang garantiert. Zu der Werkstoffgruppe, die diesen Anforderungen genügt, zählen sogenannte rostfreie Edelstähle, welche unter Firmenbezeichnungen wie V2A, V4A, Nirosta oder Remanit bekannt sind. Firmenunabhängig werden diese Werkstoffe mit einem Zahlenkürzel, der sogenannten Werkstoffnummer nach DIN EN 1008882 (Wst.Nr., vgl. nachfolgende Tabelle) gekennzeichnet. Über die Werkstoffnummer sind die jeweiligen prozentualen Anteile der zugegebenen Legierungsmittel definiert, die maßgeblich die Eigenschaften der rostfreien Edelstähle beeinflussen. Legierungsmittel sind Kohlenstoff (C), Silizium (Si), Mangan (Mn), Phosphor (P), Schwefel (S), Chrom (Cr), Stickstoff (N), Molybdän (Mo), Nickel (Ni) und Titan (Ti). Zusätzlich existieren für die Werkstoffe sogenannte Kurznamen, die sich aus den Kürzeln und prozentualen Anteilen der verwendeten Legierungsmittel zusammensetzen.

[82] DIN EN 10088-1, Ausgabe:1995-08 Nichtrostende Stähle - Teil 1: Verzeichnis der nichtrostenden Stähle; Deutsche Fassung EN 10088-1:1995.

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

Werkstoffnummern rostfreier Edestähle

Wst.Nr.	Kurzname	Analyse in % Gesamtanteil									
		C	Si	Mn	P	S	Cr	N	Mo	Ni	Sonst.
1.4401	X5CrNiMo17-12-2	≤ 0,07	≤ 1,00	≤ 2,00	≤ 0,045	≤ 0,015	16,5-18,5		2,0-2,5	10,0-13,0	
1.4404	X2CrNiMo17-12-2	≤ 0,03	≤ 1,00	≤ 2,00	≤ 0,045	≤ 0,015	16,5-18,5	≤ 0,110	2,0-2,5	10,0-13,0	
1.4571	X6CrNiMoTi17-12-2	≤ 0,08	≤ 1,00	≤ 2,00	≤ 0,045	≤ 0,015	16,5-18,5		2,0-2,5	10,5-13,5	Ti ≤ 0,70

Als nicht rostend gelten Stähle, die sich durch besondere Beständigkeit gegen chemisch angreifende Stoffe auszeichnen. Sie haben im Allgemeinen einen Massenanteil Chrom von mindestens 12 % und einen Massenanteil Kohlenstoff von höchstens 1,2 %. Die Ursache der Korrosionsbeständigkeit ist eine sich an der Oberfläche bildende Passivschicht, die sich bei dem genannten Gehalt an Chrom ausbildet. Die Passivität von nicht rostenden Stählen wird durch einen erhöhten Chromgehalt und durch Zusatz von Molybdän bedeutend erhöht. Die Passivschicht besteht aus einer sehr dünnen Metalloxidhydratschicht auf der Stahloberfläche, in der Chrom gegenüber der Stahlzusammensetzung erheblich angereichert ist. Dieser Vorgang der Passivierung kann nur in Anwesenheit wässriger Lösungen stattfinden. Die gebildete Passivschicht steht nach ausreichend langer Zeit im Gleichgewicht mit dem sie umgebenden Medium und ist daher nicht auf ein anderes Medium übertragbar. Wenn ein solcher Gleichgewichtszustand erreicht ist, wird der Oberflächenabtrag durch Korrosion im Allgemeinen vernachlässigbar klein (ebene oder ebenmäßige Korrosion). Kann sich eine ausreichende Passivschicht nicht bilden, oder wird die vorhandene passive Oberflächenschicht örtlich durchbrochen oder ganz zerstört, so ist die Möglichkeit eines Korrosionsschadens gegeben.[83]

4.2.1.2.3.2.4 Korrosionsarten

Als Korrosionsarten können ebenmäßige Korrosion, Lochkorrosion, Spaltkorrosion und Spannungsrisskorrosion angeführt werden.

Ebenmäßige Korrosion tritt bei allen Edelstahlwerkstoffen, abhängig vom angreifenden Medium auf. Für ebenmäßige Korrosion können sogenannte Abrostungsgeschwindigkeiten bzw. Masseverlustraten [g/h*m^2] oder Korrosionsraten [mm/Jahr] für die unterschiedlichen Edelstahlwerkstoffe angegeben werden. Die Einteilung der Edelstähle erfolgt in sogenannte Beständigkeitsstufen.

[83] Firmeninformation der Edelstahl Witten-Krefeld GmbH: Thermax, Remanit, Thermon – RSH- und hochwarmfeste Edelstähle. www.edelstahl-witten-krefeld.de.

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

Beständigkeitsstufen von Edelstählen gegenüber ebenmäßiger Korrosion

Beständig-keitsstufen	Beschreibung	Massenverlustrate [g/h*m^2]	Korrosionsrate Dickenabnahme [mm/Jahr]
0	beständig gegen abtragende Flächenkorrosion	<0,1	0,11
1	geringer Angriff durch abtragende Flächenkorrosion, in gewissen Fällen verwendbar	0,1 bis 1,0	0,11 bis 1,1
2	kaum beständig gegen abtragende Flächenkorrosion, praktisch nicht verwendbar	1,1 bis 10,0	1,1 bis 11,0
3	unbeständig gegen abtragende Flächenkorrosion	> 10	> 11

Vgl. Firmeninformation der Edelstahl Witten-Krefeld GmbH: Thermax, Remanit, Thermon – RSH- und hochwarmfeste Edelstähle. www.edelstahl-witten-krefeld.de

Loch- und Spaltkorrosion werden hauptsächlich durch hohe Chloridkonzentrationen im Medium verursacht. Mit zunehmenden Legierungsanteilen wächst die Beständigkeit gegen Loch- und Spaltkorrosion. Neben dem Chromgehalt ist vor allem der Molybdängehalt und bei den höherlegierten Stählen auch der Stickstoffgehalt von Einfluss auf die Beständigkeit.

Mit Spannungsrisskorrosion wird eine interkristalline oder transkristalline Korrosion bezeichnet, die bei Zusammentreffen hoher Zugspannungen (z.B. Spannbetonbau), empfindlichen Stählen und spezifischen Korrosionsmedien vorkommt. Viele mit der Spannungsrisskorrosion verbundene Fragen sind noch offen.

4.2.1.2.3.2.5 Untersuchung der Korrosion von WT-Elementen

4.2.1.2.3.2.5.1 Allgemeine Vorbemerkungen

Der in Leverkusen eingesetzte Wärmetauscher (System Rabtherm®) wurde aus rostfreiem Edelstahl mit der Werkstoffnummer 1.4571 gefertigt. Dieser Werkstoff stellt den gängigsten Vertreter dieser Werkstoffgruppe in der chemischen Industrie dar.[84] Er ist beständig gegen flächenabtragende Korrosion. Darüber hinaus ist der Werkstoff gegenüber einer Vielzahl von Stoffen beständig, die Lochkorrosion begünstigen können.

Werkstoffe in Abwasserleitungen und –kanälen, insbesondere in der ständig vom Abwasser benetzen Kanalsohle, sind einer Kombination aus mechanischer und chemischer Beanspruchung ausgesetzt. Kanäle werden mechanisch durch die transportierten organischen und insbesondere mineralischen Feststoffe beansprucht. Reicht die Transportleistung des Abwassers nicht mehr aus, um die enthaltenen Feststoffe weiterzutransportieren, bilden sich Ablagerungen, die durch eine Kanalreinigung mobilisiert und entfernt werden. Zudem werden für die Kanalreinigung oftmals Hochdruckreinigungsfahrzeuge eingesetzt, die mit Hochdruckreinigungsdüsen die Kanalwerkstoffe auf unterschiedliche Arten beanspruchen können.[85] Das sind zum einen mechanische Beanspruchungen durch den Düsenkörper (Düsenschleifen und Düsenfallen), zum anderen die Beanspruchungen durch Düsenstrahlen (vgl. Kapitel Kanalreinigung).

---

84 Kunze, Egon (Hrg.): Korrosion und Korrosionsschutz, Band 5: Korrosion und Korrosionsschutz in verschiedenen Gebieten, Teil 2.

85 Bosseler, B./M. Schlüter (2004).

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

Im Rahmen der IKT-Versuche wurden die Veränderungen des in Leverkusen eingesetzten Edelstahls mit der Werkstoffnummer 1.4571 gegenüber chemischen bzw. mechanisch-chemischen Beanspruchungen untersucht. Die Untersuchungen wurden mit vier unterschiedlichen Medien durchgeführt. Mit Schwefelsäure (H_2SO_4) und Natronlauge (NaOH) wurden zwei Chemikalien ausgewählt, die einen sehr niedrigen pH-Wert (pH 2 bei Schwefelsäure) bzw. einen hohen pH-Wert (pH 12 bei Natronlauge) repräsentieren und oberhalb bzw. unterhalb des in ATV-A 115[86] beschriebenen Grenzbereichs für den pH-Wert 6,5 - 10 liegen. Um die Einwirkung eines Reinigungsmittels untersuchen zu können, wurde ein Mittel mit hohem Wasserstoffperoxidanteil ausgewählt. Im konkreten Fall wurde das Reinigungsmittel mit dem Produktnamen „Domestos“ verwendet. Als pH-neutrale Flüssigkeit wurde destilliertes Wasser (aqua dest., ~ pH 7) verwendet. Als Probekörper kamen flache Edelstahlplatten mit den Maßen (Breite x Höhe x Dicke) 50 x 50 x 2 mm und Edelstahlhalbschalen mit einem Innendurchmesser von 320 mm, einer Länge von 1000 mm und einer Wandstärke von 3 mm zum Einsatz. An den Metallplatten wurde der jeweilige Masseverlust ermittelt und Veränderungen durch Inaugenscheinnahme festgestellt. Die Rohrhalbschalen wurden entweder ohne mechanische Belastung mit den o.g. Flüssigkeiten befüllt oder im Anschluss an die oben beschriebenen mechanischen Belastungen einer zusätzlichen chemischen Belastung ausgesetzt. Veränderungen wurden durch Inaugenscheinnahme ermittelt. In der nachfolgenden Übersicht sind Probekörper, Art der Beanspruchung sowie Beurteilungsmethode zusammenfassend dargestellt.

Chemische Beständigkeit: Probekörper, Beanspruchungen und Beurteilungsmethode

Probekörper	Beanspruchung		Beurteilungsmethode
	mechanisch	chemisch[87]	
Metallplatten (ca. 50 x 50 x 2 mm)	-	Aqua dest.	Inaugenscheinnahme /Masseverlust
Metallplatten (ca. 50 x 50 x 2 mm)	-	Schwefelsäure (10 %ig)	Inaugenscheinnahme /Masseverlust
Metallplatten (ca. 50 x 50 x 2 mm)	-	Peroxidlösung (10 %ig)	Inaugenscheinnahme /Masseverlust
Metallplatten (ca. 50 x 50 x 2 mm)	-	Natronlauge (10 %ig)	Inaugenscheinnahme /Masseverlust
Rohrhalbschalen	-	Aqua dest.	Inaugenscheinnahme
Rohrhalbschalen	-	Schwefelsäure (10 %ig)	Inaugenscheinnahme
Rohrhalbschalen	-	Peroxidlösung (10 %ig)	Inaugenscheinnahme
Rohrhalbschalen	-	Natronlauge (10 %ig)	Inaugenscheinnahme
Rohrhalbschalen	Abrieb, Düsenfallen, -schleifen	Aqua dest.	Inaugenscheinnahme
Rohrhalbschalen	Abrieb, Düsenfallen, -schleifen	Schwefelsäure (10 %ig)	Inaugenscheinnahme
Rohrhalbschalen	Abrieb, Düsenfallen, -schleifen	Peroxidlösung (10 %ig)	Inaugenscheinnahme
Rohrhalbschalen	Abrieb, Düsenfallen, -schleifen	Natronlauge (10 %ig)	Inaugenscheinnahme

IKT-interne Darstellung

[86] ATV-A 115: Einleiten von nicht häuslichem Abwasser in eine öffentliche Abwasseranlage, Oktober 1994.

[87] DIN EN ISO 175: Kunststoffe, Prüfverfahren zur Bestimmung des Verhaltens gegen flüssige Chemikalien. Berlin, Oktober 2000.

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

4.2.1.2.3.2.5.2 Einlagerungsversuche mit Metallplatten

(1) Versuchsaufbau

Im Rahmen der IKT-Versuche wurden separat hergestellte Probekörper aus Edelstahl mit der Werkstoffnummer 1.4571 und den Maßen von ca. 50 x 50 x 2 mm in vier Prüfmedien über einen Zeitraum von 28 Tagen bei Raumtemperatur eingelagert, die Veränderungen durch Inaugenscheinnahme beurteilt und die Massenabnahme durch vergleichende Wägung ermittelt. Die Beurteilung durch Inaugenscheinnahme erfolgte nach den in DIN EN ISO 175 beschriebenen Kriterien (Beurteilungsskala: keine, kaum wahrnehmbare, geringe, mittlere, starke Änderung). Als Beurteilungskriterien wurde z.B. die Bildung von Rissen und Sprüngen, die Bildung von Blasen, Lochfraß oder ähnliches sowie das Auftreten eines Belags herangezogen.

Wie in der nachfolgenden Tabelle dargestellt, wurden als Prüfmedien Schwefelsäure (H_2SO_4, 10-%ig), Natronlauge (NaOH, 10-%ig), ein Haushaltsreiniger mit einem hohen Anteil Wasserstoffperoxid (Domestos, 10-%ig) und destilliertes Wasser verwendet.

Prüfungen an Edelstahlplatten mit den Maßen 50 mm x 50 mm x 2 mm

Anzahl	Prüfungsart	Prüfmedium	WEB Nr.	Prüfmethode
4	Chem. Beständigkeit	Schwefelsäure, 10-%ig	H1471-5.1 bis -5.4	Massenverlust / Inaugenscheinnahme
4	Chem. Beständigkeit	Natronlauge, 10-%ig	H1471-6.1 bis -6.4	Massenverlust / Inaugenscheinnahme
4	Chem. Beständigkeit	Reinigungsmittel	H1471-7.1 bis -7.4	Massenverlust / Inaugenscheinnahme
4	Chem. Beständigkeit	aqua dest.	H1471-8.1 bis -8.4	Massenverlust / Inaugenscheinnahme

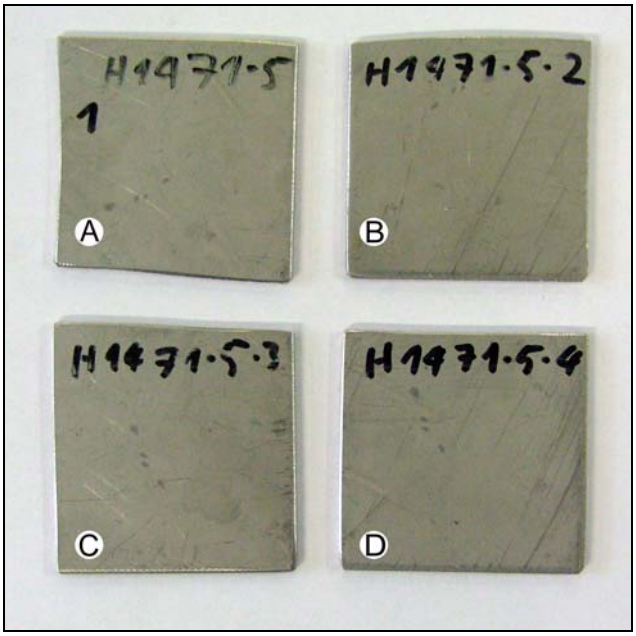
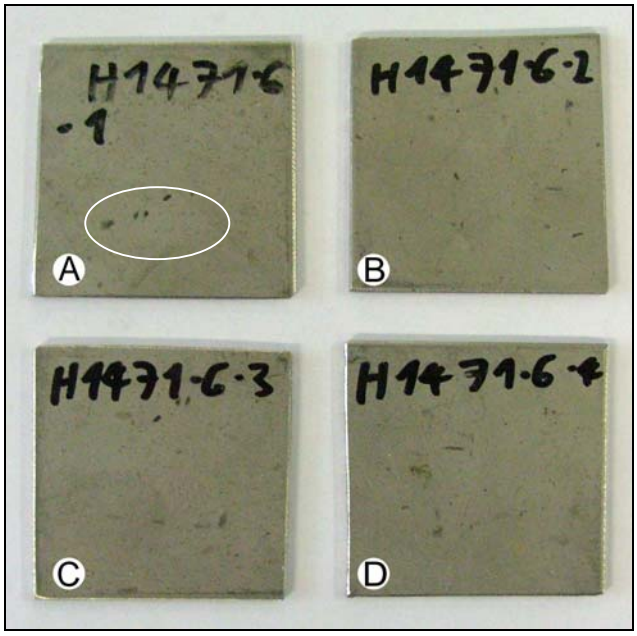
IKT – interne Darstellung

(2) Versuchsergebnisse

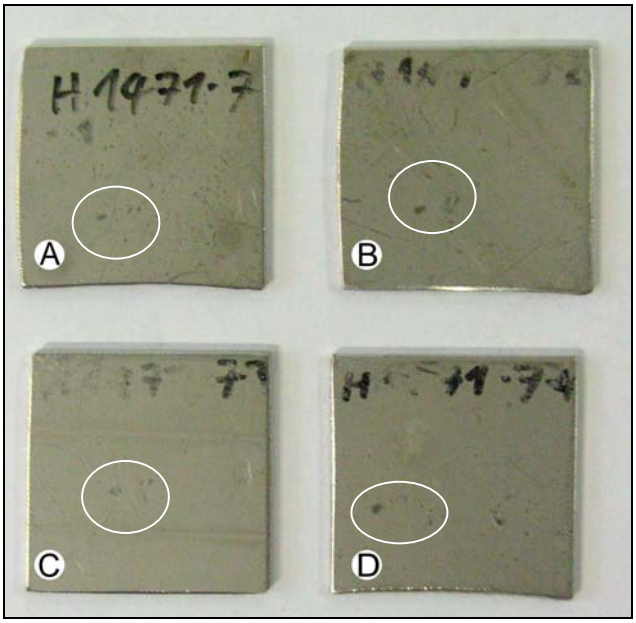
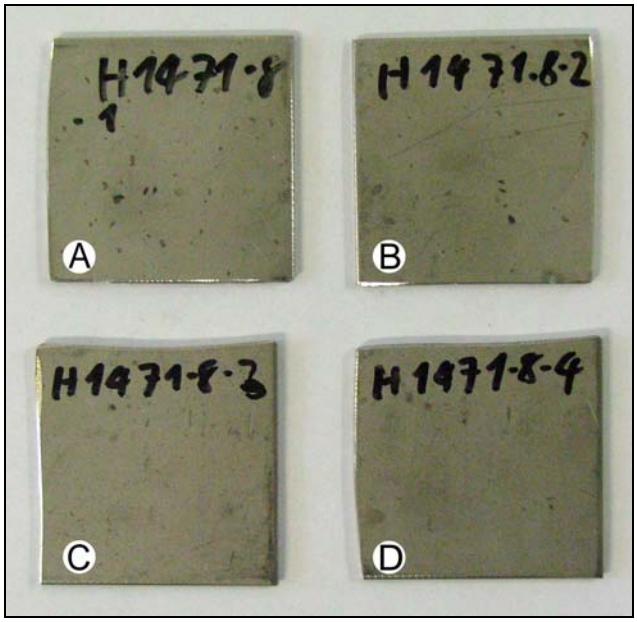
Die Ergebnisse der Beurteilung der Probekörper durch Inaugenscheinnahme sind in der nachfolgenden Tabelle zusammengefasst. Bei keinem der Probekörper wurden starke Veränderungen festgestellt. Nach der Schwefelsäurelagerung erschienen diese Probekörper gereinigt. Nach der Einlagerung in Natronlauge, Reinigungsmittel bzw. destilliertem Wasser waren mit dem Auge oberflächliche Flecken erkennbar (vgl. nachfolgende Abbildungen). Die runden Markierungen in den Bildern deuten auf Vertiefungen als Folge einer mechanischen Belastung hin und sind nicht durch die einwirkenden Prüfmedien entstanden.

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

Beurteilung der Veränderungen der Probekörper (in Anlehnung an DIN EN ISO 175)			
WEB-Nr.	Prüfmedium	Prüfzeit und Temperatur	Veränderungen
H1471-5.1	H2SO4 (10 %ig)	28 d, 22°C	keine
H1471-5.2	H2SO4 (10 %ig)	28 d, 22°C	keine
H1471-5.3	H2SO4 (10 %ig)	28 d, 22°C	keine
H1471-5.4	H2SO4 (10 %ig)	28 d, 22°C	keine
H1471-6.1	NaOH (10 %ig)	28 d, 22°C	kaum wahrnehmbar
H1471-6.2	NaOH (10 %ig)	28 d, 22°C	kaum wahrnehmbar
H1471-6.3	NaOH (10 %ig)	28 d, 22°C	kaum wahrnehmbar
H1471-6.4	NaOH (10 %ig)	28 d, 22°C	kaum wahrnehmbar
H1471-7.1	Reinigungsmittel (10%-ig)	28 d, 22°C	kaum wahrnehmbar
H1471-7.2	Reinigungsmittel (10%-ig)	28 d, 22°C	kaum wahrnehmbar
H1471-7.3	Reinigungsmittel (10%-ig)	28 d, 22°C	kaum wahrnehmbar
H1471-7.4	Reinigungsmittel (10%-ig)	28 d, 22°C	kaum wahrnehmbar
H1471-8.1	aqua dest. (10 %ig)	28 d, 22°C	kaum wahrnehmbar
H1471-8.2	aqua dest. (10 %ig)	28 d, 22°C	kaum wahrnehmbar
H1471-8.3	aqua dest. (10 %ig)	28 d, 22°C	kaum wahrnehmbar
H1471-8.4	aqua dest. (10 %ig)	28 d, 22°C	kaum wahrnehmbar
IKT – eigene Darstellung			

Probekörper H1471-5.1 bis -5.4. nach der Trocknung, Schwefelsäure als Prüfmedium	Probekörper H1471-6.1 bis -6.4 nach der Trocknung, Natronlauge als Prüfmedium.
	
IKT – eigene Darstellung	

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

Probekörper H1471-7.1 bis -7.4 nach der Trocknung, Reiniger als Prüfmedium.	Probekörper H1471-8.1 bis -8.4 nach der Trocknung, Aqua dest. als Prüfmedium
	

IKT – eigene Darstellung

Als maximal zulässiger Grenzwert für den Masseverlust des Edelstahls mit der Werkstoffnummer 1.4571 wurde der Wert von 0,1 g/m² angegeben.[88] Im Rahmen der durchgeführten Einlagerungsversuche wurde dieser Wert nicht erreicht. Die Einlagerung in Schwefelsäure ergab einen Masseverlust von 0,003 g/m², in Natronlauge von 0,001 g/m², in Reinigungsmittel von 0,003 g/m² und in destilliertem Wasser einen Masseverlust von 0,0009 g/m².

4.2.1.2.3.2.5.3 Modifizierte Einlagerungsversuche

(1) Versuchsaufbau

Die Ursache der Korrosionsbeständigkeit von Edelstählen ist eine sich an der Oberfläche der Bauteile bildende Passivschicht, die sich bei einem Chrom-Gehalt > 12 % ausbildet. Die Passivschicht besteht aus einer sehr dünnen Metalloxidhydratschicht auf der Stahloberfläche, in der Chrom gegenüber der Stahlzusammensetzung erheblich angereichert ist. Die Passivschicht kann durch den Betrieb von Wärmetauscherelementen in Abwasserleitungen und –kanälen mechanisch durchbrochen werden und es können Korrosionsschäden als Folge dieser Vorbelastung auftreten. Hinweise auf diesen Zusammenhang finden sich auch in ATV-M 168.[89] In der Praxis erfolgt eine mechanische Belastung der Kanalsohle in Form von Abrieb durch transportierte Feststoffe und durch die über die Sohle schleifende bzw. auf die Sohle fallende Hochdruckreinigungsdüse bei der Kanalreinigung.

---

88 Siehe oben, Tabelle „Beständigkeitsstufen von Edelstählen gegenüber ebenmäßiger Korrosion“, Kapitel 4.2.1.2.3.2.4, S. 87 f.

89 ATV – M 168, Korrosion von Abwasseranlagen - Abwasserableitung - Juli 1998: *Schädigungen infolge mechanischer Einwirkungen, wie Abrieb, Erosion oder Frost, sind gesondert zu betrachten. Es ist nicht auszuschließen, dass solche Schäden, die als 'Korrosion'*

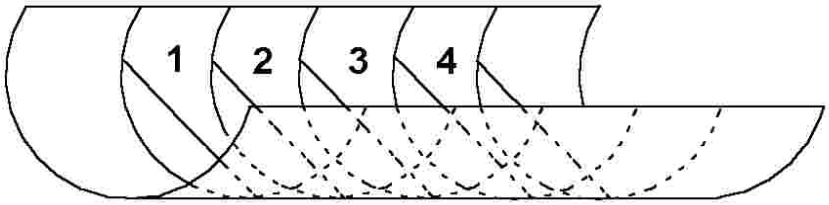
© 2005 All rights reserved by GEK mbH

Die im IKT durchgeführten Versuche werden als modifizierte Einlagerungsversuche bezeichnet, weil Edelstahlbauteile mit der Werkstoffnummer 1.4571 auf mögliche Korrosionsschäden infolge der Kombinationen aus mechanischer und chemischer Belastung untersucht wurden.

Als mechanisch vorbelastete Bauteile wurden zwei Edelstahlhalbschalen verwendet. Die im Rahmen der Abriebversuche belastete Edelsstahlhalbschale wurde zusätzlich durch Düsenschleifen und Düsenschlagen belastet. Eine weitere, nicht durch Abriebversuche belastete Edelstahlhalbschale wurde ausschließlich durch Düsenschleifen und Düsenschlagen belastet.

Beide Rohrhalbschalen wurden dann durch Holzsegmente in jeweils vier Kammern unterteilt. In die Kammern wurden unterschiedliche Prüfmedien eingefüllt. Zum Einsatz kam 10%ige Schwefelsäure, 10%ige Natronlauge, ein Haushaltsreiniger mit einem hohen Anteil Wasserstoffperoxid (Domestos, 10%ig) und destilliertes Wasser.

Trennung der Rohrhalbschalen in vier Prüfkammern



IKT-eigene Darstellung

Die Verweildauer der Prüfmedien in den Kammern betrug 28 Tage. Die Temperatur betrug gleichbleibend 22 °C.

(2) Versuchsergebnisse

Die modifizierten Einlagerungsversuche mit dem Prüfkörper, der lediglich Schleif- und Schlagspuren infolge der Beanspruchung durch die Reinigungsdüse aufwies, brachten folgende Ergebnisse hervor: Nach 28 Tagen der Einlagerung des mechanisch vorbelasteten Prüfkörpers lässt sich erkennen, dass sich in allen Kammern kaum wahrnehmbare Veränderungen eingestellt haben. Die stärksten Veränderungen wurden im Randbereich der Kammern festgestellt. In den Bereichen, die bereits mechanische Belastungsspuren aufwiesen, waren keine Veränderungen zu erkennen.

Die modifizierten Einlagerungsversuche mit dem Prüfkörper, der überdies auch Abriebspuren aus dem Kipprinnenversuch aufwies, brachten folgende Ergebnisse hervor: Nach 28 Tagen der Einlagerung des mechanisch vorbelasteten Prüfkörpers lässt sich erkennen, dass sich in allen vier Kammern nur geringe Veränderungen eingestellt haben. In der Kammer Nr. 4 (Prüfmedium: aqua dest.) erscheinen die Veränderungen in Form von Verfärbungen am stärksten ausgeprägt. Diese treten wiederum im Randbereich der Prüfmedien am deutlichsten in Erscheinung. Im Bereich der mechanischen Belastungen sind in den mit Schwefelsäure, Natronlauge und Reinigungsmittel gefüllten Kammern keine Veränderungen erkennbar. In der mit destilliertem

---

bezeichnet werden, durch eine kombinierte Beanspruchung von chemischen, mikrobiologischen und mechanischen Einwirkungen verursacht werden.“

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

Wasser gefüllten Kammer sind Veränderungen im Bereich der mechanischen Belastung zu erkennen, diese sind über den ganzen eingelagerten Bereich gleichmäßig verteilt.

Ein interessanter Effekt stellte sich an der Kontaktfläche des als Abdichtungsmaterials verwendeten Silikons mit Reinigungsmittel und Schwefelsäure als Prüfmedium ein. Hier bildeten sich rot-braune Verfärbungen, die mit einem Stofftuch teilweise entfernt werden konnten.

Verfärbungen des Prüfkörpers an der Silikonschicht

Zustand vor dem Reinigen mit einem Stofftuch

Zustand nach dem Reinigen mit einem Stofftuch

IKT – eigene Darstellung

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

4.2.1.2.4 Untersuchungen zur Kanalreinigung

4.2.1.2.4.1 Ableitung von Reinigungsbedarfen

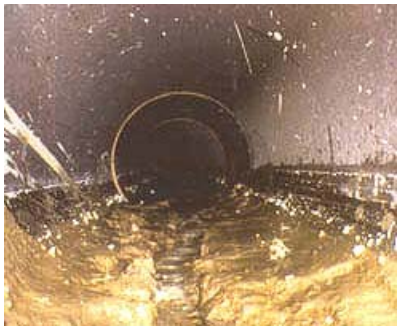
4.2.1.2.4.1.1 Anlass und Zweck der Kanalreinigung

Kanalablagerungen gehören zu den unerwünschten Begleiterscheinungen im Bereich der Abwasserableitung, da sie die hydraulischen und hygienischen Gegebenheiten in Kanalisationsbauwerken beeinflussen und mitunter Störungen des Kanalisationsbetriebs verursachen können.[90]

Die Beseitigung von Ablagerungen zur Gewährleitung eines störungsfreien Betriebs des Kanalnetzes stellt eine Aufgabe der NB dar. Nicht haftende Ablagerungen, die ausschließlich aus mineralischen Bestandteilen bestehen, lassen sich i. d. R. leicht lösen und aus dem Netz entfernen. Auch rein organische Ablagerungen sind leicht lösbar, da ihnen die Stabilität aus den mineralischen Kornfraktionen fehlt. Der Reinigungsaufwand für rein organische und insbesondere rein mineralische Ablagerungen ist damit hauptsächlich durch die Ablagerungsmenge bestimmt. Mineralische Ablagerungen herrschen im Allgemeinen vor.

Lockere Ablagerungen, Bildbeispiele

grobe mineralische Ablagerungen



feine mineralische Ablagerungen

organische Ablagerungen

Vgl. Bosseler, B./ M. Schlüter (2004).

Kanalreinigungen sind zur Aufrechterhaltung der hydraulischen Eigenschaften von Kanalisationen in mehr oder weniger regelmäßigen Abständen erforderlich. Diesbezüglich ist auf die nordrhein-westfälische Selbstüberwachungsverordnung Kanalisation (SüwV Kan[91]) zu verweisen, welche die Reinigung des Kanalnetzes im Abstand von zwei Jahren vorsieht. Andere Reinigungsintervalle sind dann zulässig, wenn die Reinigung nach einem auf das Kanalnetz abgestimmten Spülplan erfolgt.

Über die Aufrechterhaltung der hydraulischen und hygienischen Anforderungen an den Kanalbetrieb hinaus ist die Beseitigung von Ablagerungen zudem erforderlich, um die Zustandserfassung der Kanalsubstanz durch optische Inspektionen durchführen zu können. Zu diesem Zweck müssen nicht nur die sich auf der Rohrsohle befindlichen Ablagerungen entfernt werden, sondern auch die sogenannte Sielhaut. Die Sielhaut ist ein Biofilm, der sich sowohl auf der überströmten Rohroberfläche als auch auf der Rohroberfläche im Gasraum bildet. In der Regel stellt die vollständige Entfernung der Sielhaut keinen besonderen Auf-

---

90 Vgl. Meyer, P. (2002). Zu den wesentliche Ursachen für die Bildung von Kanalablagerungen siehe. Weyand, M. (1991), Nowak, B. (1984), sowie Ashley, R.M. (1992), S. 1-12.

91 Verordnung zur Selbstüberwachung von Kanalisationen und Einleitungen von Abwasser aus Kanalisationen im Mischsystem und im Trennsystem (Selbstüberwachungsverordnung Kanal - SüwV Kan). Gesetz- und Verordnungsblatt für das Land NRW, Nr. 49: S. 64-67, Düsseldorf 1995

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

wand dar, allerdings kann bei großen Dimensionen die vergleichsweise geringe Aufprallkraft des Spülstrahls und unzureichende Spülstrahlbreite einer zuverlässigen Entfernung der Sielhaut entgegenstehen (vgl. nachfolgende Abbildung).

Sielhaut vor der Reinigung (links), Sielhautstreifen nach der Reinigung, Bildbeispiele (Mitte und rechts)

Vgl. Bosseler / Schlüter (2004).

4.2.1.2.4.1.2 Anlass und Zweck der Reinigung von WT-Elementen

In Abwasserkanalisationen eingebaute WT-Elemente werden dauerhaft von dem Abwasserstrom überspült. Folglich bilden sich auf WT-Elementen Ablagerungen und Sielhäute. Diese setzen sich wie eine Isolationsschicht auf dem Wärmetauscher ab und verringern folglich den Wärmeübergang.

Der Einfluss der Biofilmbildung auf die Leistung des Wärmeüberträgers wurde durch die Eidgenössischen Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz (EAWAG, Schweiz) untersucht.[92] In dem in der nachfolgenden Abbildung dargestellten Versuchsstand floss Abwasser unter reproduzierbaren Bedingungen über ein in Betrieb befindliches Wärmetauscherelement.

92 Zu den nachfolgenden Ausführungen zur Biofilmbildung auf WT siehe Wanner, O. (2003b), passim.

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

Prüfstand zur Untersuchung des Einflusses der Biofilmbildung auf die Leistung des Wärmeüberträgers

Vgl. Wanner, O. (2003 b), S. 2

Im Rahmen des Versuche konnte ermittelt werden, dass sich infolge der Bildung eines Biofilms die Wärmeübertragungsleistung des WT auf 61 % der Leistung eines sauberen WT verringert. Durch periodische Erhöhungen des den WT überströmenden Abwasservolumens konnte der Biofilm zu einem großen Teil abgeschwemmt werden. Die Wärmeübertragungsleistung des Wärmetauschers lässt sich durch derartige Spülvorgänge auf 81 % der Leistung eines sauberen WT erhöhen. Siehe hierzu die nachfolgenden Abbildungen.

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

Biofilm auf einem WT-Element

Biofilmbildung nach 16 Tagen (1,8 x 2,4 cm Ausschnitt)

Biofilmoberfläche nach Abschwemmung (2,4 x 3,2 cm Ausschnitt)

Vgl. Wanner, O. (2003b), S. 6 und S. 8.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Bildung von Biofilmen zu einer Verringerung der Leistung von WT führt. Der Biofilm lässt sich durch eine Erhöhung der Fließgeschwindigkeit teilweise abtragen, eine vollständige Entfernung des Biofilms war unter den oben beschriebenen Randbedingungen nicht möglich.

Damit stellt sich nun die Frage nach dem spezifischen Reinigungsbedarf für WT-Elemente. Reinigungsbedarfe für WT-Elemente können sich aus den Leistungsanforderungen von AWN-Anlagen ergeben: Sofern sich die Biofilmbildung auf den WT-Elementen auf die Heizleistung der AWN-Anlage auswirkt, können Reinigungsleistungen erforderlich werden. Zu berücksichtigen ist in diesem Zusammenhang, dass die biofilmbedingte Leistungsminderung durch eine erhöhte Anzahl von WT-Elementen kompensiert werden kann. Insofern ist im Einzelfall in Abhängigkeit von der Art und Intensität der Ablagerungen zu untersuchen, ob zusätzliche, d.h. über die Kanal-Reinigungsbedarfe hinausgehende Reinigungsbedarfe zur Aufrechterhaltung der Betriebsfähigkeit von WT-Elemente bestehen. Grundsätzlich können dieses Bedarfe auftreten, wenn Ablagerungen zu entsprechenden Minderungen der Wärmeübertragung führen. Ferner sind zum Zweck der Inspektion der WT-Elemente Reinigungen erforderlich. Sofern diese nicht synchron zu den Inspektionen der Kanäle stattfinden oder eine höhere Reinigungsintensität verlangen, ist ein zusätzlicher Reinigungsbedarf der WT-Elemente zu konstatieren.

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

4.2.1.2.4.2 Reinigungsverfahren

Zur Beseitigung von Ablagerungen und Sielhäuten stehen verschiedene Reinigungsverfahren zur Verfügung:

- Schwallspülung durch Absperrorgane an Schächten mit Klappen und Schiebern
- Stauspülungen durch das Einbringen von Geräten in den Kanal mit Spülschilden, Spülkugeln (Göttinger Kugel), Spülschrauben, seilgeführten Kugeln und Spülsäcken
- Mechanische Reinigungsverfahren: manuell mit Hilfsmitteln (Spitzhacken, Drucklufthämmer, schonende Sprengung, etc.), durch Reinigungsgeräte (Sielwolf, Windenzug, Spiralen) oder mit Spezialgeräten (Schlagende Geräte, Bohr- bzw. Fräsgeräte, Schneidgeräte, Sandstrahlgeräte etc.)
- Hochdruckspülverfahren

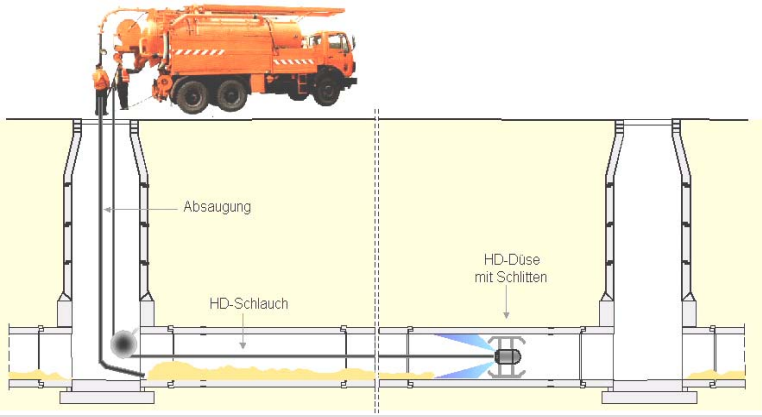
In mehr als 90 % aller Kanalreinigungsmaßnahmen wird sowohl zur Beseitigung von Ablagerungen als auch zur Vorbereitung einer Kanalinspektion oder Sanierung das Hochdruckspülverfahren (HD-Spülverfahren) eingesetzt.[93] Es ist in der Regel nicht anwendbar bei sehr stark verfestigten Ablagerungen oder zur Beseitigung einragender Anschlusskanäle, künstlicher Hindernisse und Wurzeln. In diesen Fällen muss zusätzlich auf mechanische Reinigungsverfahren oder -geräte zurückgegriffen werden, die zum Teil auch direkt durch die Hochdruckspülfahrzeuge angetrieben werden können.

Die Kanalablagerungen werden bei der Hochdruckspülung durch Druckwasserstrahlen von der Rohrwandung gelöst und bis zu dem Arbeitsschacht gespült. Die gesamte Gerätetechnik ist auf einem Fahrzeug installiert und besteht im Wesentlichen aus den Komponenten Fahrzeugtank, Hochdruckpumpe, Unterdruckpumpe, Spülschlauch, Saugschlauch und Kanalreinigungsdüsen (vgl. nachfolgende Abbildung).

[93] Falk, C. (2000).

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

Hochdruckreinigung: Gerätetechnik und Fahrzeug-Komponenten



Arbeitende Düse im Rohr

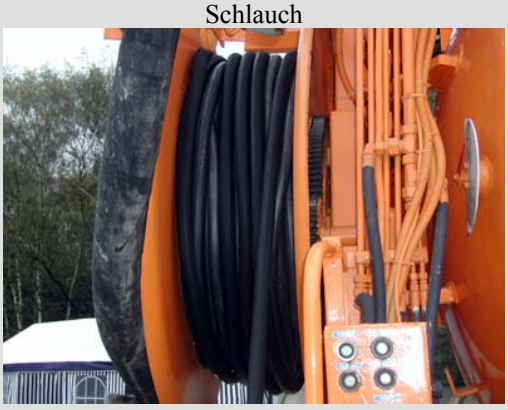
Reinigungsfahrzeug

Saugrohr

Düsenauswahl

Pum-
pe

Schlauch



Düsenein-
satz

Vgl. Bosseler / Schlüter (2004).

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

Kanalreinigungsdüsen haben im Wesentlichen die zwei Aufgaben,

- den Schmutz von der Rohrwandung zu lösen und
- die Abwasserfließgeschwindigkeit zum Transport der Feststoffe zu erhöhen.

Die örtlichen Netzbedingungen sowie die Menge und Hartnäckigkeit der Verschmutzung beeinflussen den Schwierigkeitsgrad dieser Aufgabe. Düsenhersteller bieten vor diesem Hintergrund ein breites Angebot an Kanalreinigungsdüsen an. Die Düsen unterscheiden sich bspw. nach Form, Gewicht, Anzahl und Durchmesser der Düseneinsätze, Wasserführung im Düsenkörper und im Düseneinsatz und dem Schlauchanschluss. Für die unterschiedlichen Reinigungsaufgaben werden verschiedene Reinigungswerkzeuge genutzt, z.B.

- **rundumstrahlende** Düsen, um die gesamte Rohrwandung (bis ca. DN 600) bspw. für eine Inspektion zu reinigen,
- **rotierendstrahlende Düsen,** um Inkrustrierungen zu lösen,
- **Stocher-/Fräsdüsen** mit Vorstrahl**,** um Verstopfungen zu lösen,
- **Sohlenreiniger** zum Transport von losen Ablagerungen in der Sohle großer Kanäle ab DN 500.

Rundumstrahlende Düsen unterscheiden sich nach Anzahl der Düseneinsätze (6 – 30 Stück) und deren Abstrahlwinkel. Ein flacher Abstrahlwinkel (6 – 15 Grad) erzeugt eine hohe Zugleistung der Düse. Bei einem weiten Winkel (15 – 35 Grad) erhöht sich die Lösekraft gegenüber hartnäckigen Verschmutzungen an der Rohrwandung. Mit zunehmender Kanalquerschnittsgröße (ca. ab DN 500) verringert sich das Räumvermögen, um gelöste Ablagerungen bis zum Entnahmeschacht zu transportieren. Aufgrund ihrer Strahlcharakteristik erzeugen rundumstrahlende Düsen große Luftbewegungen im Kanal. Dies kann u.U. die Aerosolbelastung am Arbeitsschacht und das Risiko für Ausblasungen von Geruchsverschlüssen bei Grundstücksentwässerungsanlagen erhöhen. Mit einem weiten Abstrahlwinkel oder auch niedrigeren Druck- und Durchflusswerten verringert sich dieses Risiko.

Rotierendstrahlende Düsen werden zur Reinigung des gesamten Rohrumfangs eingesetzt, insbesondere zum Lösen von Inkrustationen, Fett und leichten Wurzeleinwüchsen. Die Verteilung der Hochdruckwasserstrahlen erfolgt durch einen rotierenden Körper in der Düsenmitte. Dadurch kann die gesamte Rohrinnenfläche mit nur wenigen, aber energiereichen Strahlen gereinigt werden. Darüber hinaus soll die Reinigungswirkung bei einigen Produkten durch Vibration der Düse begünstigt werden.

Fräsdüsen bzw. Stocherdüsen sind durch eine im Querschnitt scharfkantige Bauform und mehrere nach vorn gerichtete Bohrstrahlen zur Beseitigung von Verstopfungen geeignet. Damit lassen sich Ablagerungen von schwer zugänglichen Stellen mitunter bis zum nächsten Schacht transportieren. Einige rundumstrahlende Düsen sind ebenfalls mit einem Vorstrahl ausgestattet, um ggf. Verstopfungen aufzulockern.

Sohlenreiniger werden überwiegend zur Reinigung der Kanalsohle und zur Räumung von schweren Ablagerungen in größeren Kanälen (ab DN 500) eingesetzt. Um nicht in größeren Abwasserströmen aufzuschwimmen, sind Sohlenreiniger im Quer-

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

schnitt größer und massiger als die meisten rundumstrahlenden Düsen. Sohlenreinigende Düsen sind häufig für hohe Förderströme, z.B. 320 l/min, ausgelegt.

Darüber hinaus kann mit Hilfe von **Ejektordüsen** ein außerordentlich hoher Volumenstrom erzeugt werden, der unter Einbeziehung des im Kanal befindlichen Abwassers Ablagerungen aufwirbelt und transportiert.

4.2.1.2.4.3 Auswirkungen der Hochdruckreinigung auf WT-Elemente

4.2.1.2.4.3.1 Test-Programm

Die Ergebnisse der Belastungstests an Rohrwerkstoffen im Rahmen des IKT-Forschungsvorhabens „Kanalreinigung“[94] zeigen, dass an den untersuchten Rohrprodukten z.T. deutlich erkennbare Materialveränderungen auftreten. Art und Umfang der Veränderungen werden insbesondere durch die Eigenschaften der HD-Strahlen beeinflusst.

Beachtenswert ist darüber hinaus das Bewegungsverhalten des Düsenkörpers während der HD-Spülung. Im Gesamtblick ist die Aussage, dass Düsen unkontrolliert gegen die Rohrwandung schlagen, sicherlich nicht zutreffend. Andererseits zeigen die Ergebnisse des IKT-Projektes „Kanalreinigung“, dass Düsen mitunter im Kanal schweben oder sich an Muffenversätzen verhaken können. Als Folge kann die Rohrsubstanz mechanisch belastet werden. Das Risiko von Schäden durch den Aufprall des Düsenkörpers gegen die Rohrwandung erhöht sich vermutlich mit zunehmendem Düsentempo.

Aufgrund der oben beschriebenen Möglichkeiten, Bauteile der Entwässerung durch die Hochdruckreinigung zu verändern, zu beschädigen und sogar ihre Funktionsfähigkeit einzuschränken, wurden die Wärmetauscherelemente Prüfungen unterzogen, die die Einwirkungen der Kanalreinigung simulieren. Die in der Praxis relevanten Grundbelastungsarten (HD-Strahl, Feststoff, Schleifen, Fallen) lassen sich durch die nachfolgend dargestellten Prüfmethoden gezielt untersuchen.

Nach dem sogenannten Hamburger Modell[95] wird die Widerstandsfähigkeit von Rohren, Rohrverbindungen und eingebundenen Seitenzuläufen gegenüber der Hochdruckreinigung an einem mindestens 20 m langen Rohrstrang untersucht.[96] Der Versuch wird grundsätzlich mit den zum Prüfzeitpunkt üblichen Reinigungsfahrzeugen, Spülschläuchen und Spüldüsen durchgeführt. Alle für die Prüfung eingesetzten Betriebsmittel entsprechen dem jeweiligen Stand der Technik. Entsprechend einer Lebensdauer von 30 Jahren und jährlichen Reinigungen werden insgesamt 30 Spüldurchgänge durchgeführt. Vor jedem Reinigungszyklus, bestehend aus dem Einbringen und Zurückziehen der Spüldüse, werden fünf Liter Prüfgeschiebe am Ende der Haltung eingefüllt. Durch die Reinigung wird das Geschiebe durch die Haltung transportiert und schließlich herausgespült. Dieser Transportvorgang erzeugt praxisnahe Beanspruchungen an den Rohrwandungen, den Rohrverbindungen und an den Zuläufen. Zusätzlich wird im Rahmen des Hamburger Spülversuchs eine stationäre Dauerbelastung von drei Minuten an drei Stellen gefordert. Für beide Prüfungen wird eine Prüfdüse mit acht Düseneinsätzen und einem Strahlwinkel von 30° eingesetzt (vgl. nachfolgende Abbildung).

---

94 Bosseler, B. / M. Schlüter (2004).

95 Hoppe, F. (2002).

96 Entwickelt wurde der Hamburger Spülversuch 1988 von der Hamburger Stadtentwässerung mit Blick auf die tägliche Reinigungspraxis.

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

Prüfdüse mit 8 Düseneinsätzen und einem Strahlwinkel von 30° für den Hamburger Spülversuch

Vgl. Bosseler / Schlüter (2004).

In Schleifversuchen wird die mechanische Belastung durch einen über Rohrsohle und Rohrverbindungen schleifenden Düsenkörper praxisnah simuliert. Zur Untersuchung der Auswirkung von Hochdruckreinigungen auf WT-Elemente wurde im IKT die in obiger Abbildung dargestellte Prüfdüse mit einer Geschwindigkeit von 0,1 m/sec durch Edelstahlrohrhalbschalen vor- und zurückgezogen. Vor der Schleifbewegung wurde die Rohrsohle mit Wasser benetzt. Nach 30 Zyklen wurden die Rohre hinsichtlich optisch feststellbarer Beanspruchungsspuren überprüft.

Die Beanspruchung der Rohrwandung (hier: WT-Element) durch eine fallende Düse wird im Rahmen von Düsenfallversuchen untersucht. In den IKT-Versuchen wurde eine handelsübliche rundumstrahlende, 4,5 kg schwere Düse im Rohr aus einer Höhe von 30 cm auf ein WT-Element fallengelassen. Um dabei die Praxis realitätsnah nachzuempfinden, wurde die Düse an einen Hochdruckspülschlauch aus Gummi DN 32 angeschlossen. Im Rahmen der Fallversuche erfolgte eine optische Inspektion der Auftrefffläche sowie eine Dokumentation der eingetretenen Veränderungen des WT-Elementes.

Die nachfolgende Tabelle gibt eine Übersicht über die Versuche zur Beurteilung der Auswirkungen der Hochdruckreinigung auf die Wärmetauscherelemente.

Übersicht der Versuche zur Auswirkung der Hochdruckreinigung auf Wärmetauscherelemente		
Versuch	**Versuchparameter**	**Art der Beurteilung**
Hamburger Spülversuch	1. 30 Spüldurchgänge; Achtstrahlige Düse mit Strahlwinkel 30°; 120 bar Druck an der Düse bei einem Durchfluss von 320 l/min. Zugabe von 5 l Geschiebe bei jedem Spüldurchgang.	Inaugenscheinnahme
	2. Stationäre Belastung mit 120 bar Druck an der Düse und einem Durchfluss von 320 l/min.	Inaugenscheinnahme
Schleifversuch	Düsenkörper 4,5 kg, 30 Zyklen, Geschwindigkeit 0,1 m/s	Inaugenscheinnahme
Fallversuch	Düsenkörper 4,5 kg, Fallhöhe 30 cm	Inaugenscheinnahme
IKT – eigene Darstellung		

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

4.2.1.2.4.3.2 Hamburger Spülversuch

(1) Versuchsaufbau

Die Versuche zur Prüfung der Hochdruckspülfestigkeit nach dem Hamburger Modell wurden an zwei separat hergestellten Rohrhalbschalen aus Edelstahl mit der Werkstoffnummer 1.4571, einem Innendurchmesser von 320 mm und einer Wandstärke von 3 mm durchgeführt. Eine Rohrhalbschale wurde 30 Reinigungszyklen unterzogen, wobei ein Zyklus jeweils aus einer Vor- und einer Rückwärtsbewegung durch die gesamte Versuchsstrecke besteht. Je Zyklus wurden 5 Liter Kalkstein-Edelsplitt (Körnung 2-5 mm) als Prüfgeschiebe zugegeben. Die Prüfung wurde mit einer Düse mit 8 Düseneinsätzen und Strahlwinkeln von 30° durchgeführt.

Anschließend wurden an einer zweiten Rohrhalbschale an zwei Stellen punktuelle Dauerbelastungen über drei Minuten durch Stillstand der Düse aufgebracht.

Die Rohrhalbschalen wurden für die Prüfung jeweils in der Sohle eines Rohrstranges aus GFK eingebaut, um insbesondere bei der Zugabe des Prüfgeschiebes einen gerichteten Materialtransport durch den Rohrstrang sicherzustellen. Hierbei ist anzumerken, dass die mit hoher Geschwindigkeit (ca. 100 m/s) austretenden, gerichteten Düsenstrahlen einen Sog im Rohr verursachen, durch den das Prüfgeschiebe zunächst angesaugt und bei Erreichen des Strahlkegels weiter beschleunigt wird.

Stationäre Belastung einer Edelstahlhalbschale

Die Abbildung zeigt die in ein GfK-Rohr eingebaute Edelstahl-Halbschale. Zur Durchführung der 30 Reinigungszyklen unter Zugabe von Prüfgeschiebe wurde die Rohrverbindung zusammenschoben.

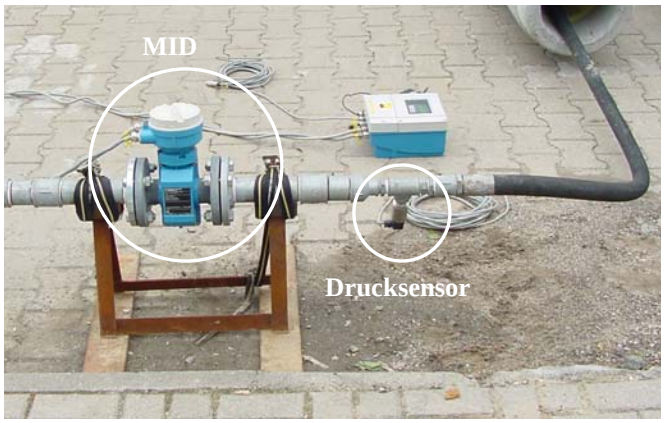
IKT – eigene Darstellung.

Der von dem eingesetzten HD-Pumpe erzeugte Druck und Volumenstrom wurden durch einen Drucksensor bzw. ein magnetisch-induktives Durchfluss-Messsystem (MID) vor den Versuchen erfasst und während der Durchführung der Versuche kon-

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

trolliert. Der Druck an der Düse betrug 120 ± 3 bar bei einem Volumenstrom von ca. 320 l/min. Die wesentlichen Randbedingungen der Prüfung sind in der nachfolgenden Abbildung dargestellt.

Randbedingungen der Prüfung



Prüfdruck:	(120 ± 3) bar an der Düse
Durchmesser der Düseneinsätze:	2,8 mm
Anzahl der Düseneinsätze:	8
Strahlwinkel:	30°
Volumenstrom:	ca. 320 l/min
Reinigungsgeschwindigkeit:	ca. 0,1 m/s

IKT – eigene Darstellung

Blick in den Rohrstrang

A) Die Prüfdüse steht vor der Kante der Edelstahlhalbschale. Die Hochdruckpumpe des Reinigungsfahrzeuges ist noch nicht aktiv.

B) Stationäre Belastung der Edelstahlhalbschale. Die Hochdruckpumpe arbeitet mit 120 bar Druck an der Düse bei einem Durchfluss von ca. 320 l/min.

IKT-eigene Darstellung.

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

(2) Versuchsergebnisse

Nach Abschluss der Prüfung mit 30 Reinigungszyklen unter Zugabe von 5 Litern Prüfgeschiebe konnte auf Basis einer Inaugenscheinnahme festgestellt werden, dass die Beanspruchungen der Hochdruckreinigung keine sichtbaren, signifikanten Materialveränderungen an den Edelschalhalbschalen hinterlassen hatten.

Zu erkennen waren oberflächliche Schleifspuren in der Rohrsohle auf einer maximalen Breite von 4 cm. Zudem haben sich auf der Edelstahlfläche infolge der auftreffenden Körner des Prüfgeschiebes geringfügige Krater herausgebildet. Die Krater haben eine Tiefe von ca. 0,2 mm.

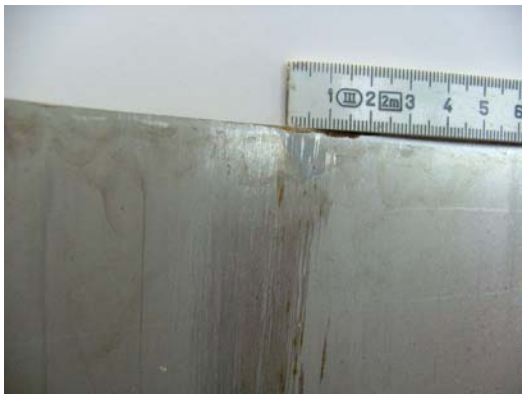
Infolge der stationären Belastung an zwei Punkten über einen Zeitraum von 3 Minuten konnten keine sichtbaren Veränderungen festgestellt werden.

Rohrhalbschale nach dem Hamburger Spülversuch (Belastung mit 30 Reinigungszyklen)

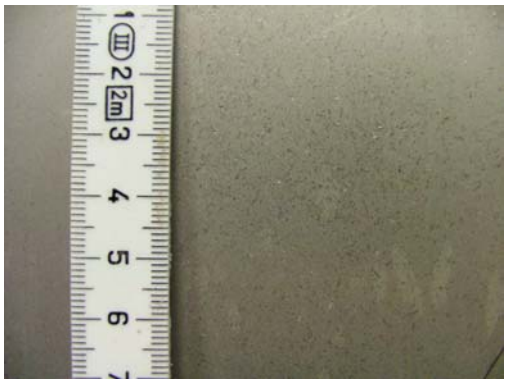
A Schleifspuren infolge der Einwirkung der Reinigungsdüse auf einer maximalen Breite von 4 cm

B. Rostspuren der Prüfdüse durch Materialabtrag der Prüfdüse an der Edelstahlkante

C 4 cm Breite Schleifspur



D Geringfügige Kraterbildung auf der Halbschale durch den Aufschlag des spitzkörnigen Gefüges



IKT- eigene Darstellung.

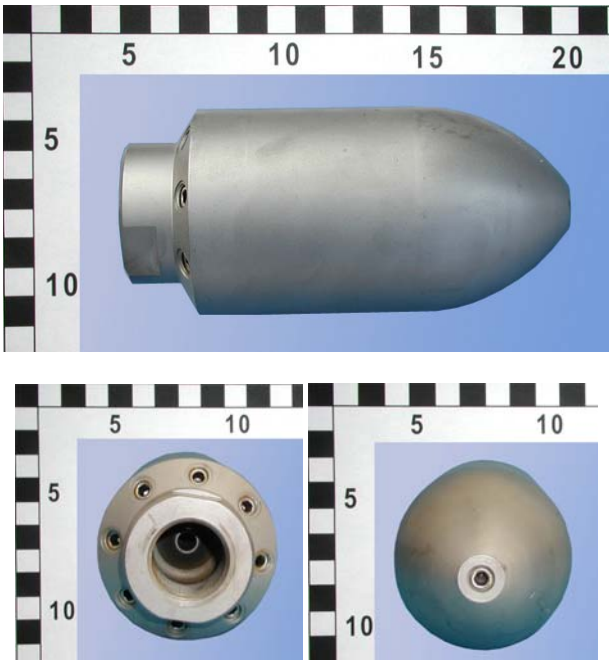
© 2005 All rights reserved by GEK mbH

4.2.1.2.4.3.3 Schleifversuch

(1) Versuchsaufbau

Durch Schleifversuche wird die mechanische Belastung infolge eines über die Sohle des WT (hier: Edelstahlhalbschale mit einem Innenmaß von 320 mm und einer 3 mm starken Wandung) schleifenden Düsenkörpers simuliert. Dazu wurde eine praxisübliche Reinigungsdüse mit einem Gewicht von 4,5 kg an einen Hochdruckspülschlauch DN 32 aus Gummi angeschlossen. In Anlehnung an das zuvor dargestellte „Hamburger Modell“ wurden 30 Belastungszyklen, entsprechend einer Lebensdauer von 30 Jahren bei jährlicher Reinigung, durchgeführt. Ein Belastungszyklus besteht aus dem Einbringen und dem Zurückziehen der Spüldüse. Die Versuche wurden ohne Wasserdruck an der Düse verrichtet (vgl. nachfolgende Abbildungen). Die Oberfläche der Edelstahlrinne war mit Wasser benetzt und entsprach damit insofern den Bedingungen im Kanal während einer HD-Reinigung, bei der die HD-Spüldüse im feuchten Kanal auch lediglich über einen Abwasserfilm Kontakt zur Rohroberfläche hat.

HD-Düse (4,5 kg)



IKT – eigene Darstellung

Prüfaufbau des Düsen-Schleifversuches

IKT – eigene Darstellung

Vor Beginn der Versuche und nach Vollendung der 30 Belastungszyklen wurde die Oberfläche der Edelstahlrinne auf optisch feststellbare Auffälligkeiten bzw. Veränderungen untersucht.

Insgesamt wurden zwei Versuchsreihen mit unterschiedlichen Edelstahlhalbschalen durchgeführt. Eine Halbschale wurde vor Prüfbeginn in einem Abriebversuch in der Darmstädter Kipprinne mit 200.000 Lastwechseln belastet. Mit dem Abriebversuch wurde eine praxisnahe Beanspruchung der Halbschale nachempfunden. Die Oberfläche war bereits einem Stofftransport, ähnlich wie im Abwasser, ausgesetzt, womit sie den Bedingungen im Kanal entsprechend als belasteter Probekörper angesehen werden kann. Zum Vergleich wurde in der zweiten Versuchsreihe eine neuwertige Edelstahlrinne als Probekörper verwendet.

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

Während des Versuchs wurden die Halbschalen in einem speziell für Kanalrohre angefertigten Auflager in Position gehalten, so dass sich die HD-Spüldüse im Sohlbereich der Probekörper bewegen konnte.

(2) Versuchsergebnisse

In beiden Versuchsreihen stellte sich heraus, dass die Probekörper nach 30 Belastungszyklen lediglich leichte oberflächliche Schleifspuren ohne messbare Tiefe aufwiesen. Zur Illustration dienen die nachfolgenden Abbildungen.

Probekörper 1 vor Prüfbeginn

IKT-eigene Darstellung.

Probekörper 1 nach 30 Belastungszyklen

IKT-eigene Darstellung.

Probekörper 2 vor Prüfbeginn

IKT-eigene Darstellung.

Probekörper 2 nach 30 Belastungszyklen

IKT-eigene Darstellung.

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

4.2.1.2.4.3.4 Fallversuche

(1) Versuchsaufbau

Infolge eines plötzlich auftretenden Druckabfalls ist ein Fallen der Düse auf die Rohrwandung möglich. Je nach Art des Rohrmaterials sind mehr oder minder schwerwiegende Beschädigungen denkbar. Erfahrungswerte für das Material Edelstahl liegen nicht vor. Die Auswirkungen einer auf die Rohrwandung fallenden Düse sind im Rahmen einer IKT-Versuchsreihe bestimmt worden. Es wurde eine handelsübliche rundumstrahlende Düse mit einem Gewicht von 4,5 kg um ca. 30 cm angehoben (Durchmesser DN 300) und fallengelassen. Zudem wurde die Düse an einen Hochdruckspülschlauch aus Gummi DN 32, entspricht $1^1/_2$ Zoll, angeschlossen, um möglichst praxisnahe Bedingungen zu simulieren. Die Edelstahlhalbschale wurde auf einem Rohrauflager gelagert und war somit über die gesamte Länge gegen ein Kippen fixiert. Die Sohle der Edelstahlhalbschale wurde vor Prüfbeginn auf Auffälligkeiten untersucht. Nach dem Fallen der HD-Düse erfolgte zunächst eine Dokumentation, ohne die Lage der Düse zu verändern. Anschließend wurde die Düse angehoben und die Prüfstellen bzw. der Auftreffort detailliert auf Auffälligkeiten untersucht. Insgesamt wurde der Fallversuch sechs Mal entlang der Rohrsohle wiederholt.

(2) Versuchsergebnisse

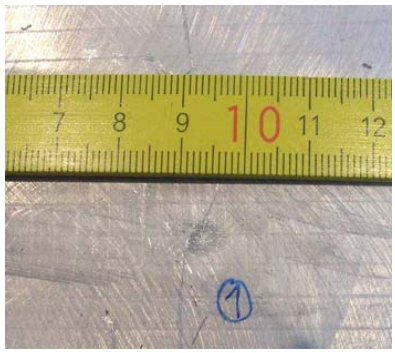
Die Auswertung der Fallversuche führte zu dem Ergebnis, dass bei keinem der Versuche auffällige Veränderungen am Prüfkörper auftragen. Lediglich leichte Schleifspuren waren im Bereich des Auftrefforts zu verzeichnen. Beulen oder Risse im Material traten nicht auf.

Anheben der Düse

Düse nach dem Auftreffen

Eingemessene Fallhöhe

Dokumentation des Auftreffpunktes



IKT-eigene Darstellungen

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

4.2.1.2.5 Untersuchungen zur Arbeitssicherheit

4.2.1.2.5.1 Vorbemerkungen

Nahezu jeder fünfte Arbeitsunfall in der gewerblichen Wirtschaft in Deutschland wird durch Stolpern, Rutschen und Stürzen - so genannte SRS-Unfälle - verursacht. Das sind über 1.000 Arbeitsunfälle am Tag. Mehr als 6.000 dieser Unfälle führen jährlich zu schwerwiegenden Verletzungen, dass die Betroffenen eine Unfallrente erhalten. In einem Betrachtungszeitraum von 1998 bis 2002 ergab sich, dass mehr als die Hälfte aller SRS-Unfälle ihren Ursprung im Rutschen, Ab- oder Ausrutschen haben. Unfälle durch Stolpern und Stürzen teilen sich fast gleichmäßig die verbleibenden 48 %.[97]

Bei der Begehung abwassertechnischer Anlagen kann das Betriebspersonal Gefährdungen durch Stolpern, Rutschen und Stürzen ausgesetzt sein. Die Gefahr des Rutschens bzw. Ausrutschens im Kanal hängt u.a. damit zusammen, dass die verschiedenen, im Kanal vorfindbaren Werkstoffe unterschiedliche Oberflächeneigenschaften aufweisen können. Eine physikalische Größe, die mit der Gefahr des Ausrutschens in Verbindung gebracht werden kann, ist die sogenannte Haftreibungszahl bzw. der Haftreibungskoeffizient μ_H oder die Gleitreibungszahl bzw. der Gleitreibungskoeffizient μ_G. Der Haftreibungskoeffizient μ_H ist in der Regel größer als der Gleitreibungskoeffizient μ_G.[98]

Der Einbau von Wärmetauscherelementen in die Kanalisation kann, abhängig vom gewählten WT-System, zur Veränderung der Oberflächeneigenschaften des zu begehenden Kanalabschnittes führen. Das ist insbesondere dann der Fall, wenn ein Edelstahl direkt mit dem Abwasser in Berührung kommt. Inwieweit mit einer höheren Gefahr des Ausrutschens auf den WT-Elementen gerechnet werden muss, wurde im IKT mit Hilfe von zwei Versuchsreihen durch Bestimmung von Haft- und Gleitreibungsbeiwerten untersucht. Zusätzlich wurde der in Leverkusen eingebaute und in Betrieb befindlichen Wärmetauscher, System Rabtherm®, begangen, um die Messergebnisse in der Realität subjektiv auf ihre Plausibilität zu überprüfen.

Im Rahmen der ersten Versuchsreihe wurden die Haftreibungs- bzw. Gleitreibungsbeiwerte zwischen Edelstahl mit der Werkstoffnummer 1.4571 und einem Elastomer an separat hergestellten Probekörpern unter Variation der Oberflächenbeschaffenheit bestimmt. Als Versuchsstand diente ein modifiziertes Kastenschergerät[99] bei dem die Auflast und auch die Schergeschwindigkeit mit hoher Genauigkeit eingestellt werden konnten.

Im Rahmen der zweiten Versuchsreihe wurde mit Hilfe eines speziell konstruierten Versuchsstandes der Gleitreibungsbeiwert zwischen einer Schuhsohle und einem originalen WT-Element aus Edelstahl bzw. einer Schuhsohle und einer Betonoberfläche ermittelt. Die Untersuchung wurde unter Berücksichtigung der speziellen WT-Elemente-Geometrie und ggfs. bei Zugabe von Gleitmitteln durchgeführt.

---

97 Homepage der BGFE, Berufsgenossenschaft der Feinmechanik und Elektrotechnik http://www.bgfe.de/pages/thema/archiv/feb04.htm, Stand 16.12.2004.

98 Vgl. Lindner, H. (1993), S. 61-62.

99 Ein Kastenschergerät, auch Rahmenschergerät genannt, wird zur Bestimmung von Scherparametern von Böden eingesetzt und besteht aus zwei gegenüberliegenden, starren Rahmen mit quadratischem oder kreisförmigem Grundriss (60 bis 100 mm lichte Weite), in die ein Boden eingebracht wird. Durch senkrechte Belastung des Bodenkörpers und weggesteuertes Ziehen des verschieblichen Rahmens wird eine sogenannte Scherlast erzeugt und gemessen. Im Rahmen der hier durchgeführten Versuche wurde der Rahmen so modifiziert, dass statt der Bodenparameter die Haft- bzw. Gleitreibungskoeffizienten einer Edelstahloberfläche gegenüber einer Elastomeroberfläche bestimmt werden konnten. Vgl. Smoltczyk, Ulrich (1990), S. 163 f.

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

Ungefähre Haft- bzw. Gleitreibungsbeiwerte für unterschiedliche Kombinationen von Werkstoffen, bspw. Stahl / Stahl, Metall / Holz oder gebremstes Auto / Straßenpflaster können der Literatur entnommen werden und sind beispielhaft in der nachfolgenden dargestellt. Untersuchungen zu den Haft- und Gleitreibungsbeiwerten für Schuhsohlen auf Edelstahl oder Schuhsohlen auf Beton sind in der Literatur bislang nicht behandelt.

Beispiele für Haft- und Gleitreibungsbeiwerte				
Material	Haftreibung μ_H	Gleitreibung μ_G		
		trocken	geschmiert	mit Wasser
Stahl/Stahl	0,15	0,1	0,009	
Metall/Holz	0,6 ... 0,5	0,5 ... 0,2	0,08 ... 0,02	0,25
gebremstes Auto/Asphalt	-	0,3		0,15
Vgl. Lindner, H. (1993), S. 62.				

In der nachfolgenden Tabelle sind die Kenngrößen Kraft [N] und Fläche [mm²] sowie die resultierende Spannung in der Gleitflächen, definiert als Kraft/Fläche [N/mm²], der beiden Versuchsstände dargestellt. Es wurden jeweils drei Laststufen derart gewählt, dass die jeweiligen Spannungen in den Gleitflächen der beiden unterschiedlichen Versuchsstände in vergleichbaren Spannungsbereichen lagen.

Vergleich der Spannungen in den Gleitfläche der Versuchsstände						
	Modifiziertes Kastenschergerät			**Gleitreibungsprüfgerät**		
	Kraft [N]	Fläche [mm²]	***Spannung [N/mm²]***	Kraft [N]	Fläche [mm²]	***Spannung [N/mm²]***
Laststufe 1	1.000	10.000	***0,1***	65,5	432	***0,15***
Laststufe 2	2.000	10.000	***0,2***	100,5	432	***0,23***
Laststufe 3	3.000	10.000	***0,3***	150,5	432	***0,35***
IKT – eigene Darstellung						

4.2.1.2.5.2 Bestimmung der Haft- und Gleitreibungsbeiwerte mit einem modifizierten Kastenschergerät an separat hergestellten WT-Probekörpern

(1) Versuchsvorbereitungen

Zur Versuchsdurchführung wurden Edelstahlplatten der Qualität 1.4571 mit den Abmessungen 100 x 100 x 2 mm (L x B x H) durch die Fa. Wallstein Ingenieur-Gesellschaft mbH, Recklinghausen, hergestellt. Sie bestehen somit aus dem Edelstahl, der auch bei den in Leverkusen eingebauten WT-Elemente verwendet wurde, so dass die Untersuchungen an dem gleichen Material durchgeführt werden konnten. Für die Probekörper wurden die jeweiligen Haft- und Gleitreibungsbeiwerte in drei unterschiedlichen Zuständen ermittelt: Nach der Reinigung der Oberflächen wurden die Testreihen zunächst mit trockenen, an-

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

schließend mit Wasser benetzten und schließlich mit einem Biofilm bestrichenen Probekörpern durchgeführt. Im Rahmen der dritten Testreihe wurde die Bildung einer Sielhaut auf der Edelstahlplatte simuliert. Diese Vorgehensweise wurde gewählt, da Untersuchungen durch das IKT in der Vergangenheit[100] gezeigt haben, dass das gezielte Heranziehen von Sielhaut, bspw. durch Einlagerung der Probekörper im Zulauf einer Kläranlage, auch nach sechs Wochen Einlagerungszeit keine sichtbaren Biofilme erkennen ließ. Die alternative Vorgehensweise bestand darin, Biofilme aus einem Teich von Steinen zu entnehmen und auf die zu untersuchenden Probekörper aufzubringen. Einen Eindruck eines mit Biofilm vorbereiteten Probekörpers vermittelt die nachfolgende Abbildung.

Edelstahlprobekörper mit Biofilm

IKT – eigene Darstellung

(2) Versuchsdurchführung

Nach der Vorbehandlung der Probekörper wurden mittels eines modifizierten Kastenschergerätes (siehe nachfolgende Abbildungen) Prüfungen zur Bestimmung der Haft- bzw. Gleitreibungskoeffizienten durchgeführt. Es wurden jeweils drei Versuchsreihen gefahren, die sich in der Ausbildung der Gleitschicht zwischen Elastomer und Edelstahl unterschieden. Die Probekörper wurden mit einer trockenen, nassen oder mit Biofilm bestrichenen Gleitfläche eingebaut.

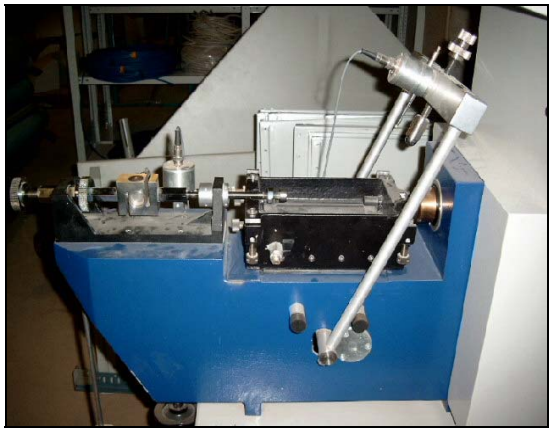
[100] Redmann A. (2002).

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

Kastenschergerät

Ansicht

Belastungseinheit (Draufsicht)

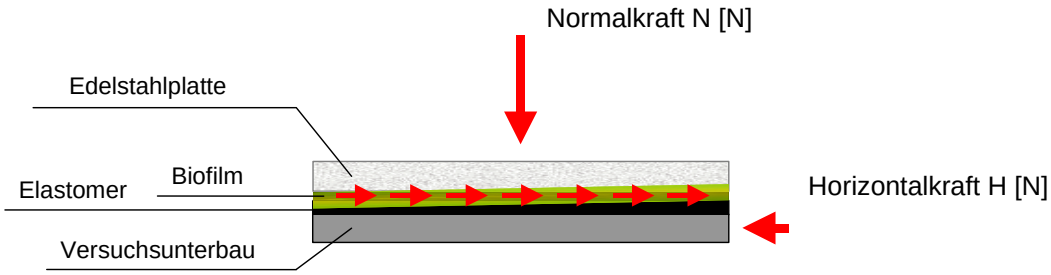


Belastungseinheit (Seitenansicht)

IKT – eigene Darstellung

In jeder der drei Versuchsreihen wurden jeweils drei unterschiedliche vertikale Belastungen auf die Probekörper aufgebracht und jeder Versuch insgesamt drei Mal durchgeführt. Daraus ergibt sich eine Gesamtanzahl von 27 Einzelversuchen. Der Versuchsaufbau ist nachfolgend schematisch dargestellt.

Versuchsaufbau



IKT – eigene Darstellung

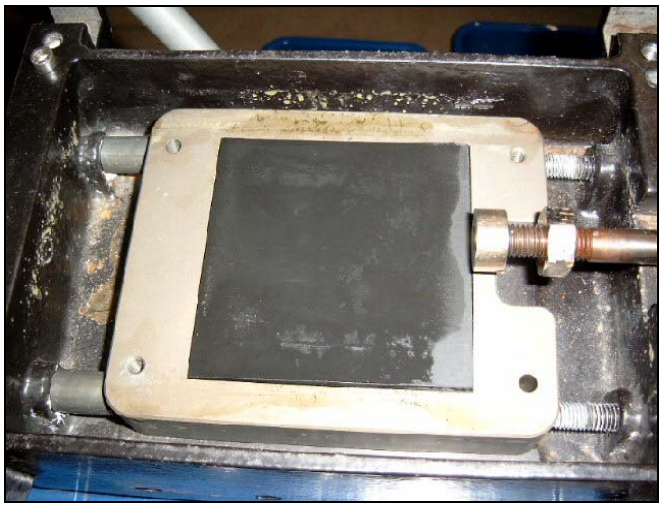
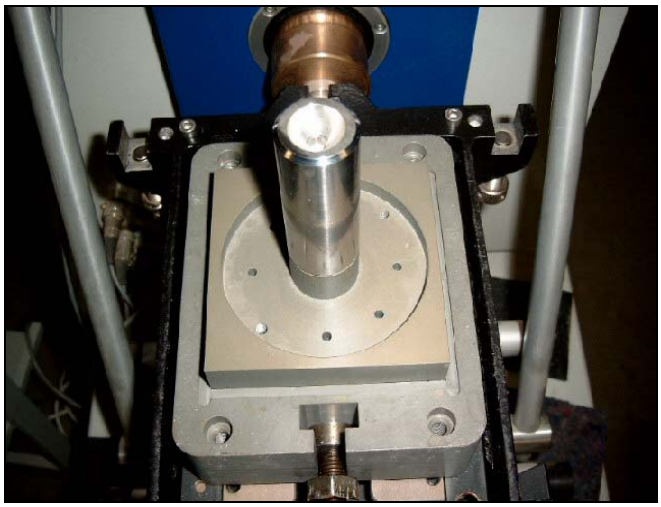
In den Versuchen wurde ein Elastomer mit den Abmessungen 100 mm x 100 mm auf den Versuchsunterbau gelegt und darauf jeweils ein Edelstahlprobekörper im Scherrahmen platziert. Über ein Gestänge und einen Stempel wird die senkrecht zur Gleitfläche wirkende Normalkraft N aufgebracht.

Eine Arbeitsschuhsohle ließ sich als realitätsnaher Probekörper nicht in das Kastenschergerät einbauen. Bei Versuchsdurchführung gelang es nicht, die Edelstahlplatte reproduzierbar auf der Sohle gleiten zu lassen. Aufgrund der unebenen Oberfläche der Arbeitsschuhsohle stieß die Edelstahlplatte entlang der Gleitfläche wiederholt gegen den Unterbau des Kastenschergeräts. Dieses hatte eine Unterbrechung des Gleitvorgangs und eine sprunghaften Anstieg der zu ermittelnden Horizontalkraft H zur

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

Folge. Als Ersatz für die Arbeitsschuhsohle wurde eine mit Gewebe verstärkte Teichfolie mit genoppter Oberfläche aus einem elastomeren Material verwendet.

Versuchsaufbau ohne Scherrahmen und Stempel (links), Belastungsstempel (rechts)

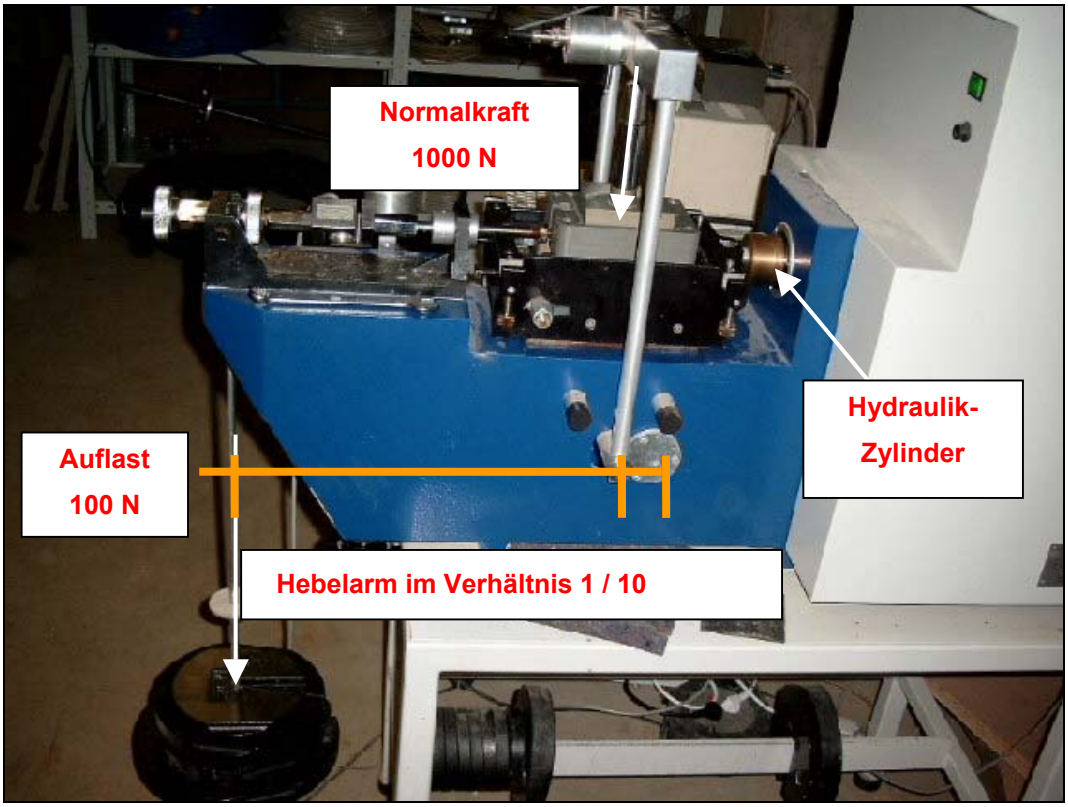



IKT – eigene Darstellung

Der Versuchsaufbau lässt sich anhand der nachfolgenden Darstellung skizzieren: Die senkrecht wirkende Normalkraft N wurde mechanisch über einen Hebelarm mit dem Übersetzungsverhältnis 1/10 auf die Edelstahlplatte aufgebracht, so dass z.B. bei einer Belastung des Probekörpers in Höhe von 1.000 N ein entsprechendes Gewicht von 100 N aufgelegt werden musste. Die Laststeigerung auf 2.000 N bzw. 3.000 N erfolgte dann jeweils durch Auflegen weiterer 100 N Gewichte. Mit dem in der nachfolgenden Abbildung dargestellten Hydraulikzylinder wurden die auf diese Weise belasteten Edelstahlplatten weggeregelt über das Elastomer bewegt und die aus der Reibung zwischen Edelstahlplatte und Elastomer resultierende Horizontalkraft H gemessen.

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

Lasteinleitung



IKT – eigene Darstellung

Nach dem Einbau der Probekörper wurden die beiden Gleitflächen mit einer konstanten Geschwindigkeit von 1,0 mm/Minute gegeneinander verschoben und die resultierende Horizontalkraft H kontinuierlich aufgezeichnet. Der Haftreibungskoeffizient μ_H errechnet sich aus dem Verhältnis des gemessenen Maximus der Horinzontalkraft (H) zur eingestellten Normalkraft (N). Nachfolgend sind die insgesamt 27 Einzelversuche den jeweiligen Versuchsrandbedingungen zugeordnet dargestellt.

Anzahl und Art der durchgeführten Versuche

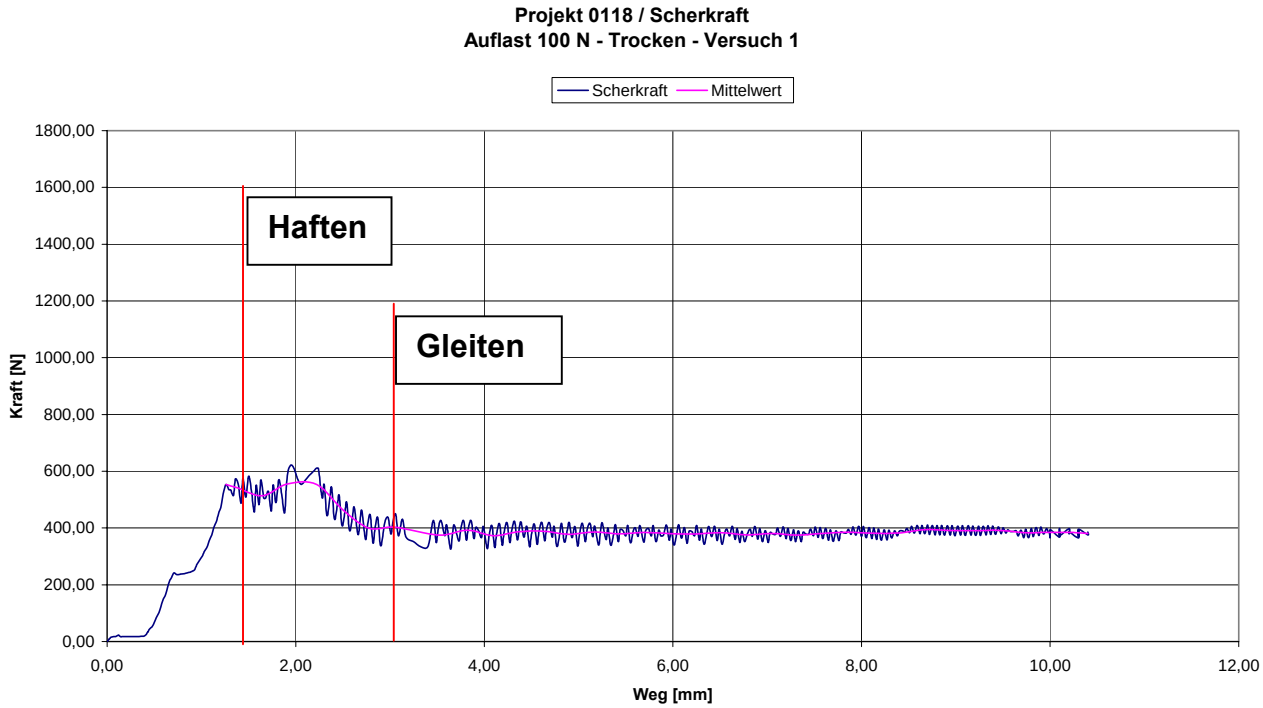
Gleitmittel		Normalkraft		
		1.000 N	2.000 N	3.000 N
Zustand Probekörper	**ohne (trocken)**	1	4	7
	ohne (trocken)	2	5	8
	ohne (trocken)	3	6	9
	Wasser (nass)	10	13	16
	Wasser (nass)	11	14	17
	Wasser (nass)	12	15	18
	Biofilm (nass)	19	22	25
	Biofilm (nass)	20	23	26
	Biofilm (nass)	21	24	27

IKT – eigene Darstellung

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

Bei den Versuchen mit Wasser befand sich ein Wasserfilm zwischen Edelstahlplatte und Elastomer. Dieser Wasserfilm wurde durch das Aufbringen von je 10 ml Wasser auf das Elastomer und anschließendem Auflegen der Edelstahlplatte erzeugt. Nach jedem Versuch wurde der gesamte Versuchsaufbau getrocknet, so dass bei jedem Versuch ausschließlich 10 ml Wasser zur Erzeugung des Wasserfilms verwendet wurden. Die trockenen Versuche wurden ohne jegliches Aufbringen eines zusätzlichen Gleitmittels zwischen Elastomer und Edelstahl durchgeführt. Die Kraft-Weg-Kurven der Versuchsreihe „trocken“, Versuche 1 - 9, lassen sich derart beschreiben, dass zu Beginn des Versuchs ein hoher Kraftanstieg erforderlich ist, um den Haftreibungswiderstand zu überwinden.

Kraft-Weg-Diagramm bei einer Auflast am Probekörper von 10 x 100 N = 1.000 N und trockenen Gleitflächen

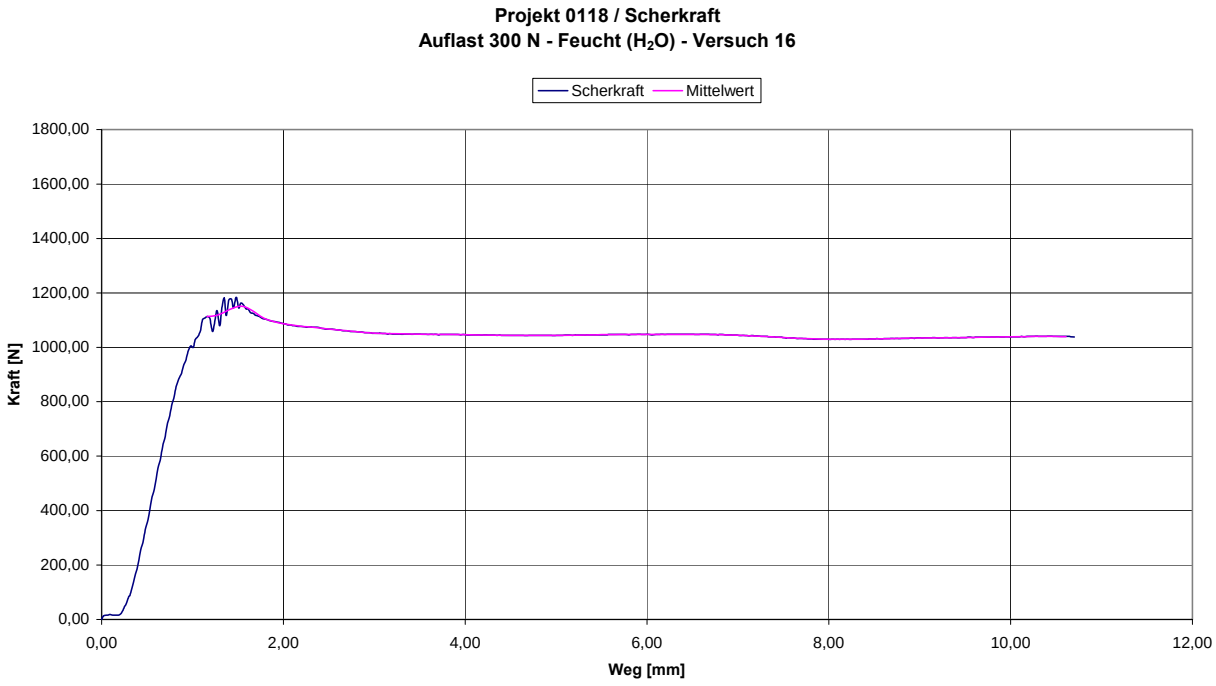


IKT – eigene Darstellung

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

Ohne Gleitmittel zwischen dem Elastomer und dem Edelstahlprobekörper kommt es bei Erreichen des Haftreibungswiderstands zu einer ruckartigen Bewegung. Anschließend fällt die Horizontalkraft H ab, um dann bis zum erneuten Erreichen des Haftreibungswiderstands wieder anzusteigen. Dieser Vorgang wiederholt sich, bis es zu einem Gleiten des Edelstahlprobekörpers auf dem Elastomer kommt. In diesem Gleitzustand ist kein gleichmäßiger Kraftverlauf zu beobachten. Die Kraft alterniert mit einer Amplitude von bis zu 80 N um einen Mittelwert von ca. 390 N. Die Versuche mit Wasser auf der Gleitfläche (Versuche 10 – 18), zeichnen sich dadurch aus, dass es auch hier zunächst zu einer ruckartigen Überwindung des Haftreibungswiderstands kommt. Je größer die wirkende Normalkraft auf der Fläche der Edelstahlplatte ist, um so eher stellt sich dann aber ein gleichmäßiges Gleiten des Edelstahlprobekörpers auf dem Elastomer ein (siehe nachfolgende Abbildung).

Kraft-Weg-Diagramm bei einer Auflast am Probekörper von 10 x 300 N = 3000 N und nassen Gleitflächen.

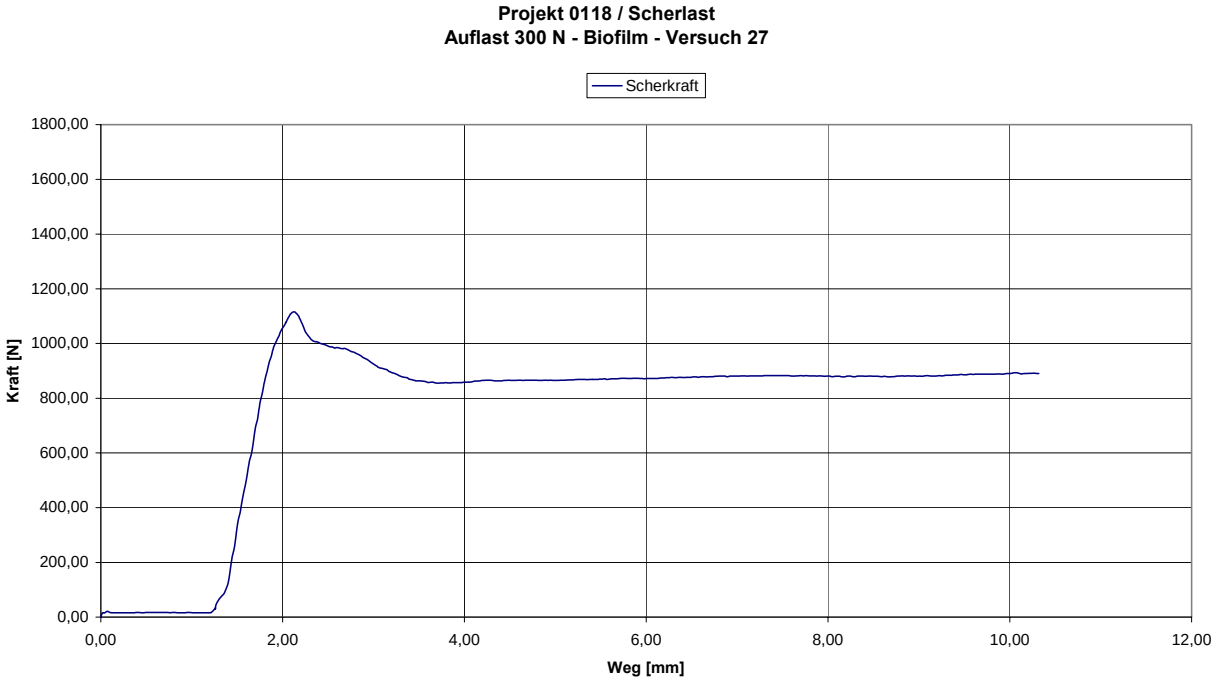


IKT – eigene Darstellung

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

Die anschließende Versuchsreihe (Versuche 19 – 27) mit einem Biofilm als Gleitmittel zwischen Edelstahlprobekörper und Elastomer zeigt, dass der Übergang zwischen Haften und Gleiten fließend ist. Nach Erreichen des Haftreibungswiderstands kommt es direkt zu einem Übergang ins Gleiten. Bei Aufbringen einer Normalkraft von 1.000 N bzw. 2.000 N ist kaum ein Unterschied zwischen der Horizontalkraft H zur Überwindung des Haftreibungswiderstands und der Horizontalkraft H zur Überwindung des Gleitreibungswiderstands zu erkennen. Lediglich bei hoher Normalkraft (3.000 N) fällt die Scherkraft nach Überwindung des Haftreibungswiderstands gleichmäßig ab, bis sich eine konstante Horizontalkraft H einstellt, die den Edelstahlprobekörper zum Gleiten auf dem Elastomer bringt (siehe nachfolgende Abbildung).

Kraft-Weg-Diagramm bei einer Auflast am Probekörper von 10 x 300 N = 3000 N und Biofilm zwischen den Gleitflächen.



IKT – eigene Darstellung

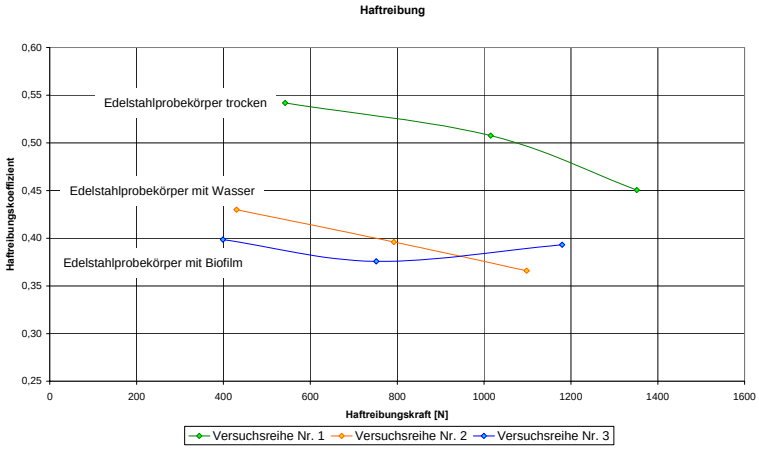
(3) Versuchsergebnisse und Interpretation

Die durchgeführten Versuche zeigen, dass bei Verwendung eines Biofilms als Gleitmittel ein mittlerer Haftreibungskoeffizienten μ_H von 0,39 ermittelt werden konnte. Bei zunehmender Auflast nimmt der Haftreibungskoeffizient ab. Dieses war bei allen drei Versuchsreihen zu beobachten. Unter Verwendung von Wasser als Gleitmittel ergibt sich ein mittlerer Haftreibungskoeffizient von 0,40. Es ist also festzustellen, dass sich keine signifikanten Unterschiede bei der Verwendung von Wasser bzw. eines Biofilms als Gleitmittel zwischen den jeweiligen Haftreibungskoeffizienten ergeben. Vor dem Hintergrund dieser Ergebnisse wird die Schlussfolgerung gezogen, dass ein mit Biofilm benetztes Edelstahlbauteil kein höheres arbeitssicherheitstechnisches Risiko darstellt als ein mit Wasser benetztes Edelstahlbauteil.

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

Die Versuche im trockenen Zustand, also ohne Gleitmittel zwischen Edelstahlprobekörper und Elastomer, weisen im Mittel mit $\mu_H = 0{,}50$ einen wesentlich höheren Haftreibungskoeffizienten auf. Bei trockener Oberfläche des Wärmetauschers ist die Standsicherheit auf dem Edelstahl höher als bei einer mit Abwasser benetzten Oberfläche (vgl. nachfolgende Abbildung).

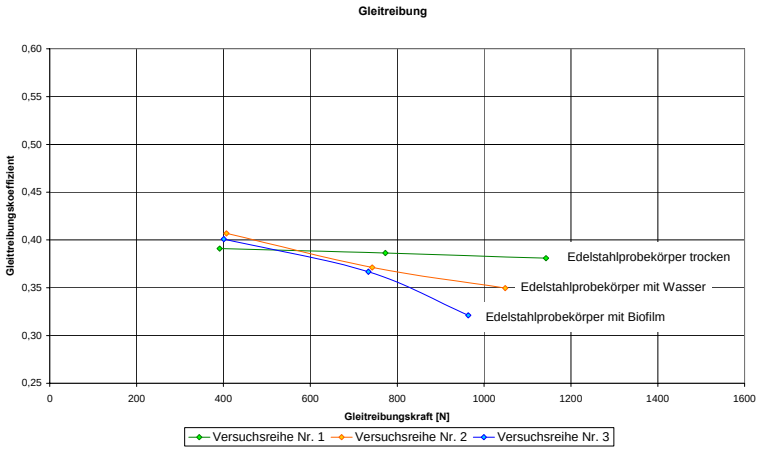
Darstellung der ermittelten Haftreibungskoeffizienten



IKT – eigene Darstellung

Die Gleitreibungskoeffizienten μ_G liegen bei trockener Oberfläche wesentlich unter den Haftreibungskoeffizienten; im Mittel ergibt sich für μ_G ein Wert von 0,39. Bei Verwendung von Wasser oder eines Biofilms als Gleitmittel fallen die Gleitreibungskoeffizienten geringfügig niedriger aus als die korrespondierenden Haftreibungskoeffizienten. Die Versuchsreihe mit Wasser als Gleitmittel weist im Mittel einen Gleitreibungskoeffizient $\mu_G = 0{,}38$ auf. Bei Verwendung eines Biofilms als Gleitmittel stellt sich ein Gleitreibungskoeffizient $\mu_G = 0{,}36$ ein.

Darstellung der ermittelten Gleitreibungskoeffizienten



IKT – eigene Darstellung

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

Zur Beurteilung der Gefahr des Rutschens bzw. Ausrutschens auf einer Oberfläche ist der Haftreibungskoeffizient der maßgebende Faktor, da erst die Haftreibung überwunden werden muss, um ins Rutschen zu kommen. Die Ergebnisse der Einzelversuche sind in der nachfolgenden Tabelle zusammengefasst.

Darstellung der Versuchsergebnisse

			Haftreibung			Gleitreibung		
Versuch Nr.	Auflast [N]	Normalkraft [N]	Horizontalkraft [N]	Haftreibungskoeffizient μ	Mittelwert μ	Horizontalkraft [N]	Gleitreibungskoeffizient μ	Mittelwert μ
Versuchsreihe 1			Trocken			Trocken		
1	100	1000	553	0,55		383	0,38	
2	100	1000	501	0,50	**0,54**	397	0,40	**0,39**
3	100	1000	572	0,57		393	0,39	
4	200	2000	1087	0,54		716	0,36	
5	200	2000	977	0,49	**0,51**	783	0,39	**0,39**
6	200	2000	982	0,49		819	0,41	
7	300	3000	1352	0,45		1144	0,38	
8	300	3000	1332	0,44	**0,45**	1125	0,38	**0,38**
9	300	3000	1371	0,46		1159	0,39	
Versuchsreihe 1			Wasser			Wasser		
10	100	1000	451	0,45		409	0,41	
11	100	1000	418	0,42	**0,43**	417	0,42	**0,41**
12	100	1000	421	0,42		395	0,40	
13	200	2000	775	0,39		766	0,38	
14	200	2000	801	0,40	**0,40**	709	0,35	**0,37**
15	200	2000	801	0,40		752	0,38	
16	300	3000	1113	0,37		1044	0,35	
17	300	3000	1120	0,37	**0,37**	1066	0,36	**0,35**
18	300	3000	1061	0,35		1037	0,35	
Versuchsreihe 3			Biofilm			Biofilm		
19	100	1000	397	0,40		400	0,40	
20	100	1000	399	0,40	**0,40**	394	0,39	**0,40**
21	100	1000	400	0,40		409	0,41	
22	200	2000	697	0,35		742	0,37	
23	200	2000	811	0,41	**0,38**	747	0,37	**0,37**
24	200	2000	747	0,37		712	0,36	
25	300	3000	1210	0,40		1021	0,34	
26	300	3000	1140	0,38	**0,39**	992	0,33	**0,32**
27	300	3000	1116	0,37		878	0,29	

IKT – eigene Darstellung

4.2.1.2.5.3 Bestimmung der Haft- und Gleitreibungsbeiwerte mit einem speziell konstruierten Gleitreibungsprüfgerätes

(1) Versuchsvorbereitung

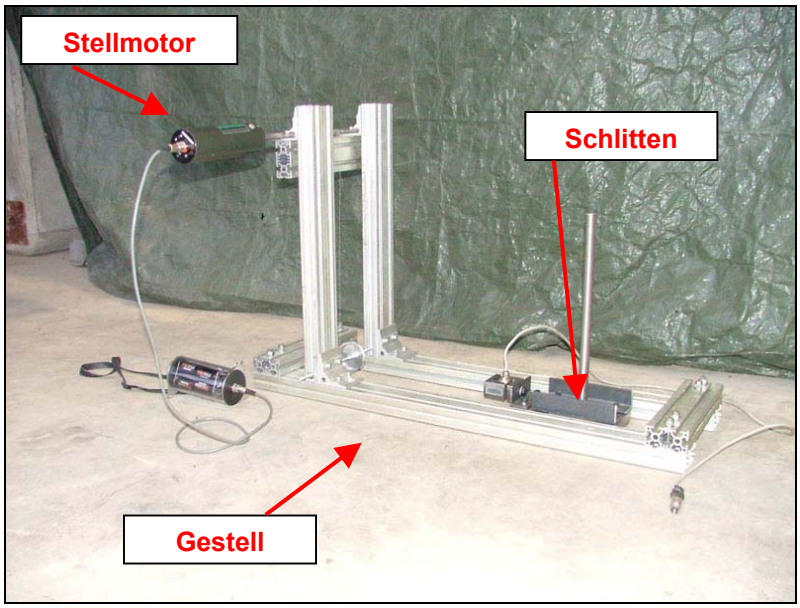
Im Rahmen einer zweiten Versuchsreihe wurden die Gleitreibungskoeffizienten an bestehenden Wärmetauscherelementen unter Nutzung eines für diese Zwecke gebauten Gleitreibungsprüfgerätes ermittelt. Während bei der Messung mit dem modifizierten Kastenschergerät das Gleiten mit hoher Präzision und mit hoher Wiederholungsgenauigkeit eingestellt werden konnte, dient das im Rahmen dieser Versuche konstruierte Gleitreibungsprüfgerät dazu, die Randbedingungen wie Schuhsohlengeometrie (Profilierung), Härte der Schuhsohle, Wärmetauschergeometrie etc. nachzustellen.

Das Gleitreibungsprüfgerät besteht aus 3 Baugruppen. Die erste Baugruppe besteht aus einem Gestell mit einer Umlenkrolle über die ein auf einer Stange aufgewickeltes Stahlseil um 90° umgelenkt wird. Am Ende des parallel zum Boden laufenden Stahlseiles befindet sich ein Schlitten mit Kraftmesseinrichtung, der über den Boden gezogen wird. Die Zugbewegung des Schlittens wird über einen Stellmotor sichergestellt.

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

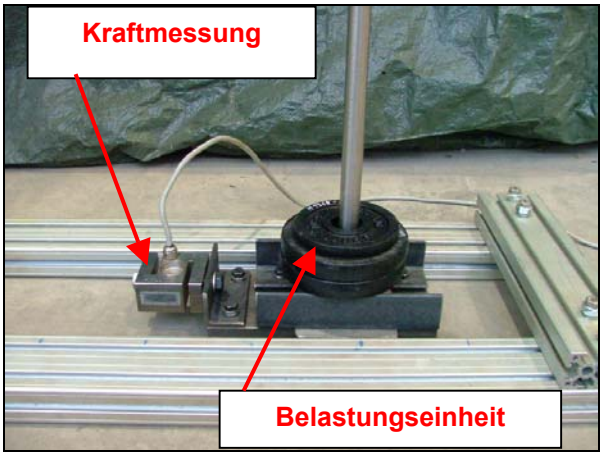
Auf dem Schlitten befindet sich eine Kraftmessdose, um die bei der Zugbewegung auftretenden Kraft messtechnisch zu erfassen. Weiterhin lässt sich das Eigengewicht und somit die senkrecht wirkende Kraftkomponente N des Schlittens durch Auflegen von Gewichten schrittweise erhöhen. Auf der Unterseite des Schlittens befinden sich drei Stücke der profilierten Sohle eines Arbeitsschuhs.

Ansicht des Gerätes zur Bestimmung der Haft- bzw. Gleitreibung

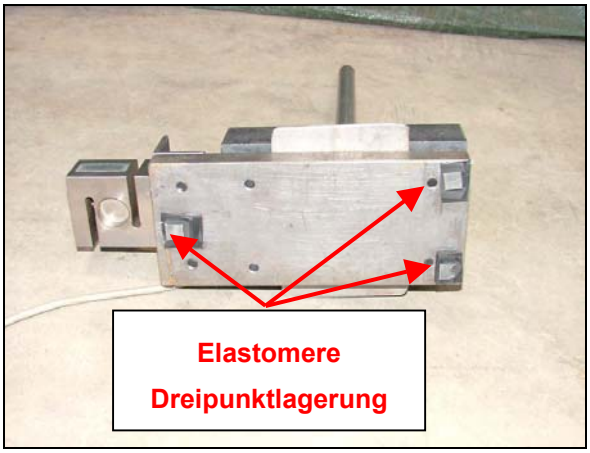


IKT – eigene Darstellung

Schlitten in der Detailansicht



Kraftmesseinrichtung und Belastungseinheit



Unterseite mit elastomerer Dreipunktlagerung

IKT – eigene Darstellung

Als weiterer Bestandteil des Gerätes ist der nachfolgend abgebildete Stellmotor anzuführen. Bei diesem batteriebetriebenen Motor kann die Drehzahl des Antriebes im Bereich zwischen 2,0 und 11,7 U/min stufenlos eingestellt werden. Änderungen des

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

Drehmomentes haben keine Änderung der Drehzahl zur Folge, so dass die Versuche mit unterschiedlichen Normallasten N vergleichbar bleiben.

Stellmotor mit stufenlos einstellbarer Umdrehungszahl

IKT – eigene Darstellung

(2) Versuchsdurchführung

Durch die Versuche zur Bestimmung des Haft- bzw. Gleitreibungskoeffizienten mit Hilfe des modifizierten Kastenschergerätes (vgl. Kapitel 4.2.1.4.4.2) konnte nachgewiesen werden, dass sich die Haft- und Gleitreibungskoeffizienten für Edelstahl und Elastomer mit Wasser oder Biofilm als Gleitmittel nur unwesentlich unterscheiden. Aus diesem Grunde wird bei den folgenden Versuchen auf die Verwendung von Biofilmen als Gleitmittel verzichtet. Die Versuche werden lediglich im trockenen und im nassen Zustand durchgeführt.

Die Versuchsprinzipien dieser Versuchsreihe sind mit den im vorangegangenen Kapitel beschriebenen Versuchen identisch. Auch hier wurde eine senkrecht wirkende Normalkraft N mit Gewichten aufgebracht und die resultierende Horizontalkraft H gemessen, die notwendig ist, um die Reibung zwischen dem Edelstahl und den Schuhsohlsegmenten zu überwinden.

Insgesamt werden 36 Einzelversuche durchgeführt. 18 Einzelversuche mit einem WT-Element aus Edelstahl als Auflagefläche und 18 Einzelversuche mit Beton als Auflagefläche. Die Versuche unterscheiden sich jeweils in der Variation der senkrecht wirkenden Normalkraft N. Folgende drei Laststufen kommen zur Anwendung: Laststufe 1 = 6,55 kg (65,5 N), Laststufe 2 = 10,05 kg (100,5 N) und Laststufe 3 = 15,05 kg (150,5 N). Bei konstanter Schergeschwindigkeit wird die Horizontalkraft H über die Zeit aufgezeichnet.

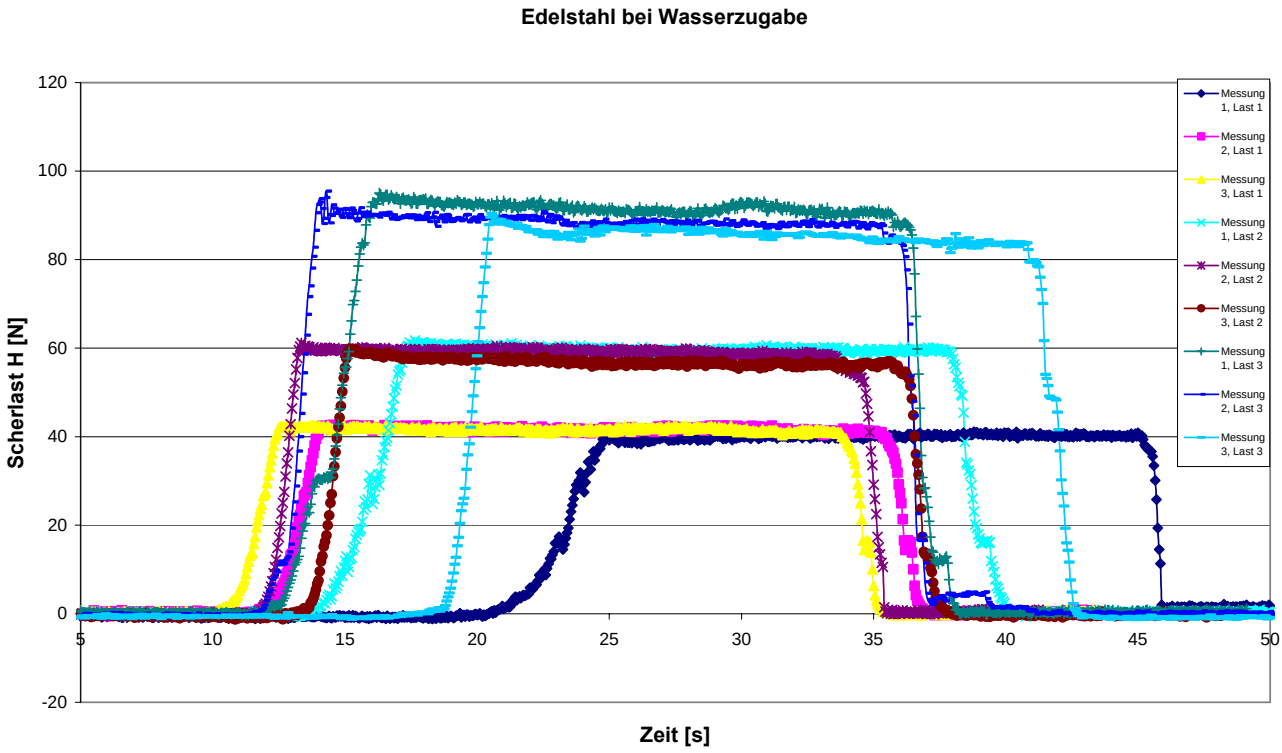
© 2005 All rights reserved by GEK mbH

(3) Versuchsergebnisse und Interpretation

Der Kraftverlauf in den neun Einzelversuchen mit Edelstahl-WT als Auflagefläche bei Verwendung von Wasser als Medium zwischen den Gleitflächen ist beispielhaft in einem Kraft-Zeit-Diagramm in der nachfolgenden Abbildung dargestellt.

Abweichend von den mit dem modifizierten Kastenschergerät ermittelten Kraft-Weg-Kurven lässt sich kein Unterschied zwischen Haftreibung und Gleitreibung festgestellt. Ein signifikantes Maximum am Anfang der Kurve (Lastanstieg), aus dem die Haftreibung abgelesen werden kann, kam nicht zur Aufzeichnung.

Kraft-Zeit-Diagramm für eine Schuhsohle auf einem Edelstahl für drei Laststufen



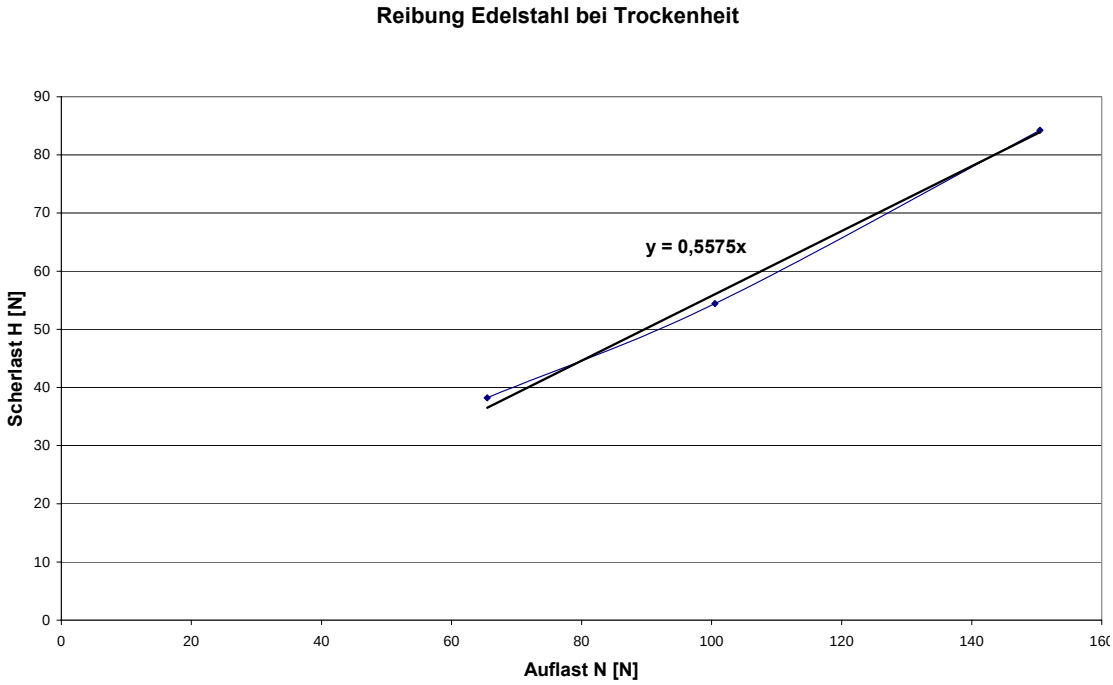
IKT – eigene Darstellung

Zur Auswertung wurde aus den einzelnen Kraft-Zeit-Kurven im Bereich der parallel zur x-Achse laufenden Kurven-Abschnitte ein Bereich ausgewählt, in dem die Kraftlinie einen annähernd konstanten Verlauf aufwies. Aus den Werten dieses Bereiches wurde ein Mittelwert gebildet. Auf diese Weise ergaben sich jeweils drei Mittelwerte für eine Laststufe. Aus den drei Mittelwerten jeder Laststufe wurde wiederum ein gemeinsamer Mittelwert gebildet, so dass am Ende den drei Laststufen 65,5 N, 100,5 N und 150,5 N (Normalkraft N) jeweils eine Horizontalkraft H zugeordnet werden konnte. Diese drei Wertpaare wurden sodann in einem Kraft-Kraft-Diagramm abgebildet. Auf der Abszisse sind die Normalkräfte N dargestellt, auf der Ordinate jeweils die Horizontalkraft H. Die Steigung der Regressionsgeraden, die sich auf der Grundlage der drei abgebildeten Punkte ermitteln lässt, repräsentiert den gemeinsamen Gleitreibungsbeiwert μ_G.

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

Das Ergebnis für den Lastfall Schuhsohle auf einem Wärmetauscher aus Edelstahl im trockenen Zustand ist nachfolgend dargestellt. Der ermittelte Gleitreibungsbeiwert μ_G beträgt 0,56.

Kraft-Kraft-Diagramm - Bestimmung des Gleitreibungsbeiwertes für Schuhsohle auf trockenem Edelstahl

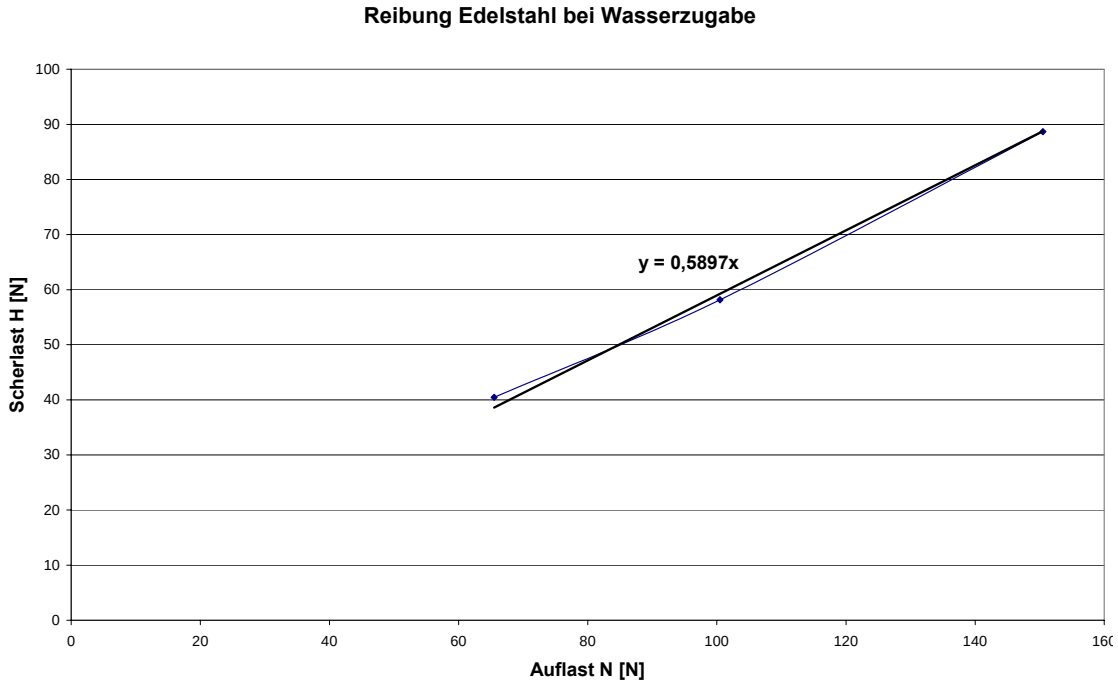


IKT – eigene Darstellung

Bei Verwendung von Wasser als Gleitmittel und Edelstahl als Auflagefläche für die Schuhsohle wurde der Gleitreibungskoeffizient von μ_G = 0,59 ermittelt. Dieser liegt somit höher als der Gleitreibungskoeffizient des Wärmetauscherelementes ohne Verwendung eines Gleitmittels. Der Gleitreibungsbeiwerte μ_G für Beton als Auflagefläche wurden im trockenen Zustand mit μ_G = 0,81 und mit Wasser als Gleitmittel zu 0,78 ermittelt.

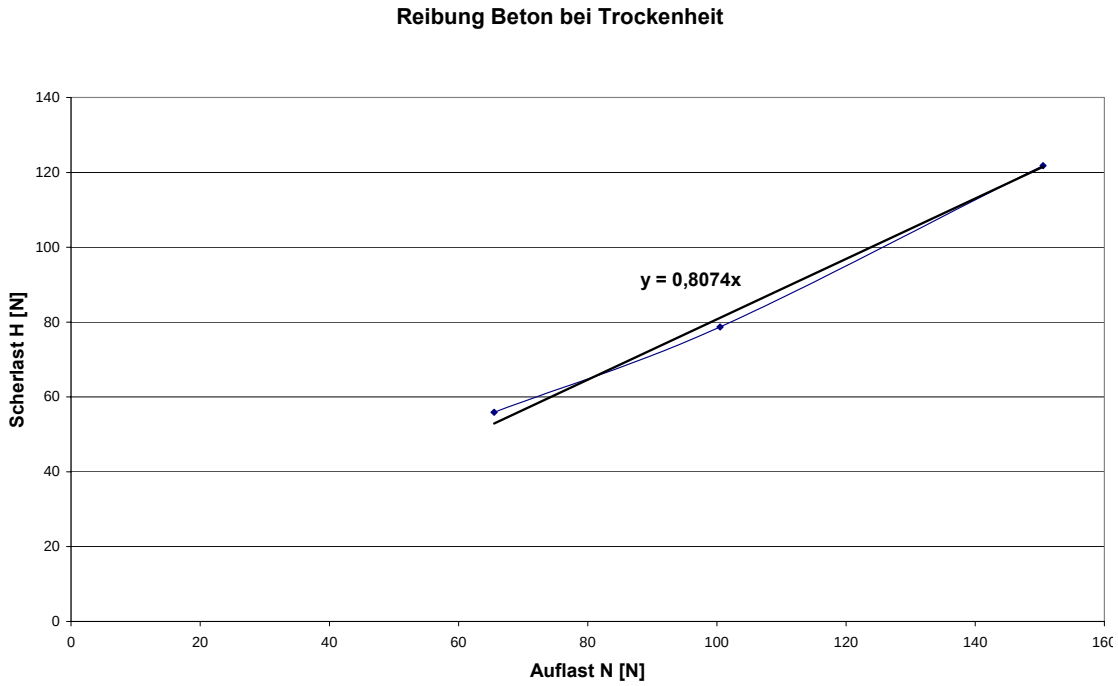
© 2005 All rights reserved by GEK mbH

Kraft-Kraft-Diagramm - Bestimmung des Gleitreibungsbeiwertes für Schuhsohle auf nassem Edelstahl



IKT – eigene Darstellung

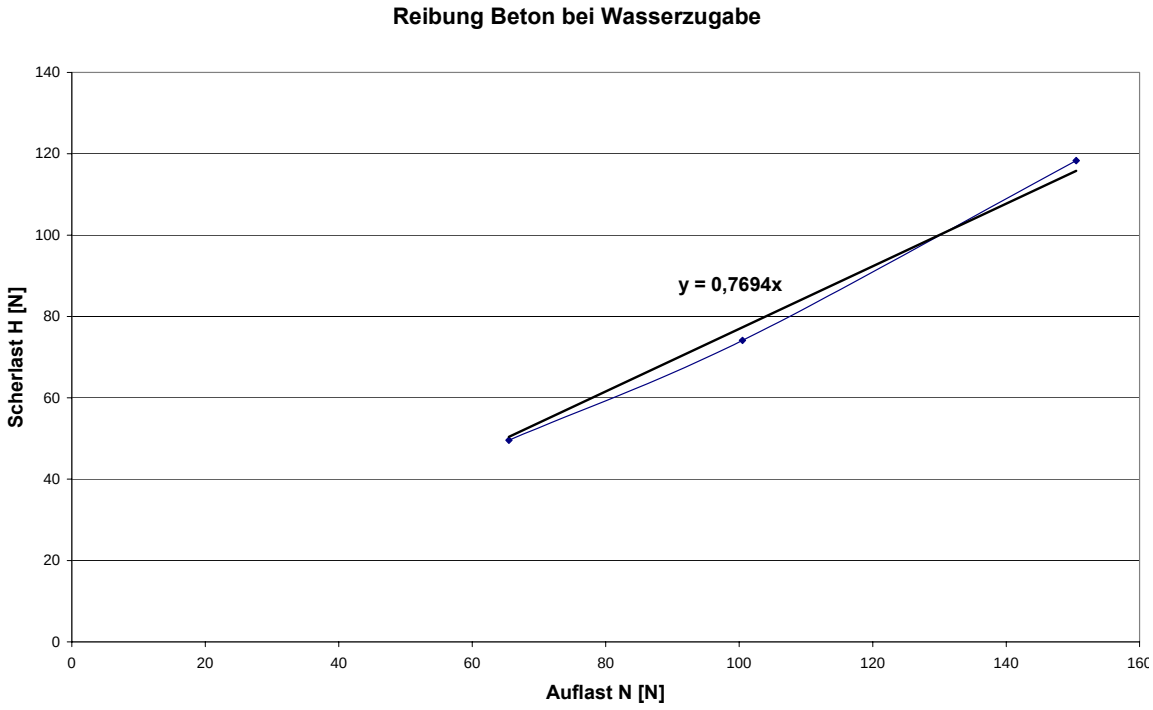
Kraft-Kraft-Diagramm - Bestimmung des Gleitreibungsbeiwertes für Schuhsohle auf trockenem Beton



IKT – eigene Darstellung

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

Kraft-Kraft-Diagramm - Bestimmung des Gleitreibungsbeiwertes für Schuhsohle auf nassem Beton



IKT – eigene Darstellung

Zusammenfassend sind die Ergebnisse der Versuche mit dem modifizierten Kastenschergerät und dem Gleitreibungsprüfgerät in einer vergleichenden Übersicht dargestellt. Ergänzend sind die bereits früher im IKT ermittelten Gleit- und Haftreibungskoeffizienten für den Leitungswerkstoff Beton angeführt. Diese Untersuchungen wurden unter Verwendung des gleichen Elastomers durchgeführt.

Zusammenfassung der Haft- bzw. Gleitreibungskoeffizientenbestimmungen

Leitungswerkstoff	Gleitfläche	modifiziertes Kastenschergerät		Gleitreibungsprüfgerät
		μ_H	μ_G	μ_G
Edelstahl 1.4571	trocken	0,50	0,39	0,56
	nass	0,40	0,37	0,59
Beton	geringer Anteil Biofilm	0,64[101]	-	0,81*
	hoher Anteil Biofilm	0,36[101]	-	0,78**
*Versuche ohne Gleitmittel. **Versuche mit Wasser als Gleitmittel				
IKT – eigene Darstellung				

[101] Redmann A. (2002).

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

Erkennbar ist, dass die beiden Versuchseinrichtungen unterschiedliche Ergebnisse liefern. Die mit dem modifizierten Kastenschergerät ermittelten Reibungskoeffizienten sind durchgehend niedriger als die mit dem Gleitreibungsprüfgerät ermittelten Werte. Zudem liefert das Gleitreibungsprüfgerät bei nassen Gleitflächen höhere Koeffizienten. Ein Grund für beide Effekte kann in der Wahl der gewählten Elastomerauflagen gesehen werden. Während bei den Versuchen mit dem modifizierten Kastenschergerät das Elastomer jeweils vollflächig auflag, wurden bei dem Gleitreibungsprüfgerät bewusst das Sohlenprofil eines Arbeitsschuhs verwendet. Diese Punktlagerung führt wahrscheinlich dazu, dass das zwischen den Gleitflächen befindliche Wasser verdrängt wird und so der Unterschied zwischen trockenen und nassen Oberflächen nicht ins Gewicht fällt. Profilierte Sohlen sorgen dafür, die Gefahr des Ausrutschens zu vermindern.

4.2.1.2.5.4 Subjektive Beurteilung der Ausrutschgefahr auf Wärmetauscherelementen aus Edelstahl

Die Versuche mit dem modifizierten Kastenschergerät und dem Gleitreibungsprüfgerät führten zu abweichenden Ergebnissen. Deshalb wurde die Gefahr des Ausrutschens auf den in Leverkusen eingebauten Wärmetauscherelemente System Rabtherm® überprüft.

Bei dem in Leverkusen eingebauten und betriebenen Wärmetauschersystem wurde eine Begehung durchgeführt, um die in den Versuchen ermittelten Ergebnisse zur Haftreibung vor Ort einer subjektiven Verplausibilisierung zu unterziehen. Bei der Begehung wurden die Eindrücke der vor Ort auftretenden Zustände aufgenommen und bewertet. Eckpunkte der Begehung waren

- Inaugenscheinnahme der Sielhautbildung auf der Edelstahloberfläche im Sohlbereich des Kanalquerschnitts,
- Vergleich der Rutschgefahr auf Betonoberflächen, gemauerten Abschnitten in angrenzenden Kanalhaltungen und WT-Elementen,
- Inaugenscheinnahme der unterschiedlichen Sielhautbildung zwischen Gasraum und abwasserüberströmter Oberfläche (abh. von der aktuellen Abwasserhöhe zum Begehungszeitpunkt) sowie
- Ermittlung von Strömungshindernissen im Kanalabschnitt (Ablagerungen etc.).

Die nachfolgenden Abbildungen geben einen Eindruck von der örtlichen Situation.

Einstiegschacht im Straßenraum	**Belüftung des Kanalabschnitts**
IKT – eigene Darstellungen	

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

Die ca. 10 m unter der Geländeoberkante befindliche Schachtsohle besteht aus einem gemauerten Gerinne mit einem seitlichen Zulauf. Die WT-Elemente sind in der Trockenwetterrinne einer 122 m langen Haltung eingebaut. Die Geometrie der gemauerten Gerinne in den Schächten am Anfang und Ende der Wärmetauscherhaltung entspricht der Geometrie der Trockenwetterrinne in den angrenzenden Rohren. Die Trockenwetterrinnen der Haltungen vor bzw. hinter der Wärmetauscherhaltung sind aus Beton. Signifikante Unterschiede der Rutschgefahr auf der Edelstahloberfläche der Wärmetauscherhaltung im Vergleich zu den Haltungen mit Betongerinne konnten im Rahmen der Begehung nicht festgestellt werden. Die Sielhautbildung auf den jeweiligen Oberflächen wies keine signifikanten Unterschiede auf. Einzig die Oberfläche der mit Kanalklinkern ausgekleideten Trockenwetterrinne in den Schächten fiel durch eine, im Vergleich zu den beiden Oberflächen aus Beton und Edelstahl, höhere Rutschgefahr auf.

Ferner war festzustellen, dass sich auch die Sielhautbildung im Schachtgerinne im Vergleich zu den angrenzenden Haltungen mit Beton- bzw. Edelstahloberfläche verändert darstellte: Im Gegensatz zu den Kanalabschnitten, in denen sich auch im Sohlbereich eine Sielhaut gebildet hatte, konnte im Schachtbereich keine durchgehende Sielhaut auf der überströmten Klinkeroberfläche festgestellt werden. Dies ist möglicherweise auf das größere Gefälle und die daraus resultierende höhere Fließgeschwindigkeit im Schacht zurückzuführen.

In den nachfolgenden Abbildungen sind Details des am Tag der Begehung vorgefundenen Zustands der Kanalabschnitte dargestellt. Darstellt ist der Übergang des Schachtsohlenbereichs zu dem mit einem Wärmetauscher ausgestatteten Kanalabschnitt im Detail. Die mit Kanalklinkern ausgekleidete Schachtsohlenoberfläche weist keine durchgehende Sielhaut auf. Im Bereich der Trockenwetterrinne im Kanal ist dagegen bereits am Haltungsanfang eine durchgehende Sielhaut auf der von Abwasser überströmten Edelstahloberfläche zu erkennen: Deutlich sichtbar durch die schwarze Farbgebung auf der Kanalsohle. Zudem ist erkennbar, dass es optisch kaum einen Unterschied zwischen der mit Wärmetauscherelementen ausgestatteten und der in Beton ausführten Trockenwetterrinne gibt. Der Bereich der Kanalsohle, der sich oberhalb des mittleren Abwasserspiegels befindet, ist weitestgehend von Ablagerungen befreit. Nur vereinzelt haften an der Kanalwand sedimentierte Schwebstoffe des Abwasser. Vergleichbare Ablagerungen finden sich auch im Bereich der in Beton ausgeführten Trockenwetterrinne wieder. Sie befinden sich aber nicht im Gehbereich und haben somit keinen Einfluss auf die Arbeitssicherheit.

Auf dem Wärmetauscher hat sich vorrangig im Flussbereich des Abwassers eine Sielhaut gebildet. In den nachfolgenden Abbildungen ist zu erkennen, dass sich im Gasraum weder auf der Edelstahloberfläche noch auf der Betonoberfläche durchgehende Sielhäute oder Ablagerungen gebildet haben. Die seitlichen Flächen des Wärmetauschers sind beinahe blank, und man kann den Übergangsbereich vom Edelstahl des Wärmetauchers zum Beton erkennen. Am Tag der Begehung (02.12.2004) wurden bei trockenem Wetter ca. 6 cm Wasserstand gemessen. Nur bis zu dieser Höhe konnte eine durchgehende Sielhaut auf dem Wärmetauscher festgestellt werden. Am Rand des Abwasserflusses war die Sielhaut etwas verdickt aber leicht zu lösen. Auf der Sohle gab es keine feststellbaren mineralischen bzw. organischen Ablagerungen. Durch die Begehung blieben Fußabdrücke auf der Sohle zurück, und die Edelstahloberfläche wurde wieder sichtbar. Eine erhöhte Gefahr des Ausrutschens auf der Sielhaut konnte im Rahmen der Begehung nicht festgestellt werden.

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

Haltungsanfang Wärmetauscherkanal

Übergang Schachtsohle Wärmetauscherkanal

Haltungsende Betonkanal

Sielhaut Wärmetauscherkanal

IKT – eigene Darstellungen

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

Fußabdrücke auf der leicht lösbaren Sielhaut

IKT – eigene Darstellung

Da die WT-Fertigteile im Werk passgenau für den Kanalverlauf produziert wurden und das Gefälle durch das gewählte Bauverfahren präzise eingestellt werden konnte, wurden optisch keine Wasserstandsunterschiede, die auf sich ändernde Strömungsverhältnisse hinweisen, festgestellt. Auch stichprobenartige Höhenstandsmessungen in der Wärmetauscherhaltung ergaben jedes Mal einen Wasserstand von 6 cm und bestätigten den optischen Eindruck.

Ein Rückstau des Abwassers war insbesondere auch an den Übergängen der WT-Elemente nicht zu beobachten. Im Rahmen der Begehung stellte sich überdies heraus, dass im gesamten Haltungsverlauf keinerlei mineralische Ablagerungen vorgefunden wurden.

Der passgenaue Zusammenbau der Fertigteile und der gleichmäßige Abwasserfluss sind in den nachfolgenden Abbildungen dokumentiert.

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

Passgenauer Zusammenbau der WT-Elemente	Abwasserabfluss im WT-Kanal
IKT – eigene Darstellung	

4.2.1.2.6 Zusammenfassung der Ergebnisse

Im Rahmen der im IKT durchgeführten Versuche wurden bislang ungeklärte Fragestellungen untersucht, die sich den NB durch den Einbau von Wärmetauscherelementen in Abwasserleitungen und -kanäle stellen. Um den Einfluss des Einbaus und Betriebs von WT-Elementen auf die Kanalisation der NB zu untersuchen, wurde im IKT die Dauerhaftigkeit der WT-Elemente anhand von Prüfungen untersucht. Im Einzelnen wurden Versuche zur Bestimmung der Abriebfestigkeit sowie Versuche zur Ermittlung der Widerstandsfähigkeit gegenüber Korrosion durchgeführt. Weiterhin wurde die Auswirkung der Kanalreinigung, insbesondere der Hochdruckreinigung, auf die Wärmetauscherelemente untersucht. Darüber hinaus lag ein weiterer Untersuchungsschwerpunkt im Bereich der Arbeitssicherheit, bei dem die Gefahr des Rutschens bzw. des Ausrutschen auf den Wärmetauscherelementen untersucht wurde. Alle Untersuchungen orientierten sich an den in Leverkusen eingebauten Wärmetauscherelementen, System Rabtherm®. Die Wärmetauscherelemente bestehen aus rostfreiem Edelstahl mit der Werkstoffnummer 1.4571, sind in eine Trockenwetterrinne eingebaut und haben direkten Kontakt zum Abwasser.

Über die Dauerhaftigkeit der verwendeten Edelstahlwärmetauscherelemente können auf Grundlage der durchgeführten Untersuchungen folgende Aussagen getroffen werden:

- Die maximale Abriebtiefe der Edelstahlhalbschale betrug 0,28 mm nach 200.000 Lastwechseln im Darmstädter Kipprinnenversuch. Durch diese Extrembelastung wurde die Gesamtschichtdicke des WT-Elementes von 3 mm um 8% verringert. Negative Auswirkungen auf die Dichtheit bzw. die Standfestigkeit des WT-Elementes sind aufgrund des singulär auftretenden Maximalwertes nicht zu erwarten.

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

- Im Rahmen der Korrosionsuntersuchungen an Metallplatten konnten keine signifikanten Veränderungen festgestellt werden. Der verwendete rostfreie Edelstahl mit der Werkstoffnummer 1.4571 zeigte nur kaum wahrnehmbare, punktuelle farbliche Veränderungen. Die Abtragsrate des Metalls lag unterhalb des Grenzwertes von 0,1 g/h m². Auch bei den Korrosionsuntersuchungen nach mechanischer Belastung (modifizierte Einlagerungsversuche) konnten keine signifikanten Veränderungen an den Probekörpern festgestellt werden.
  Bei einer Abwasserzusammensetzung im Rahmen der geforderten Randbedingungen und auf Grundlage der hier durchgeführten Untersuchungen ist mit keinen Einschränkungen der Dauerhaftigkeit durch Korrosionsvorgänge zu rechnen.

- Um die Auswirkungen der Kanalreinigung auf die Wärmetauscherelemente zu untersuchen, wurde ein Hamburger Spülversuch sowie Schleif- und Schlagversuche mit einer HD-Düse durchgeführt. Durch den während des Hamburger Spülversuchs zugegebenen Splitt wurde die Oberfläche des Probekörpers angerauht bzw. die auftreffenden Körner verursachten kleine Krater auf der Oberfläche. Auch die über die Edelstahloberfläche schleifende Düse veränderte die tangierten Bereiche oberflächig. Die auftreffenden Düsenstrahlen und auch die fallende Düse führten zu keinen feststellbaren Veränderungen.
  Durch die Kanalreinigung sind aufgrund der durchgeführten Versuche keine Veränderungen zu erwarten, die einen negativen Einfluss auf die Dauerhaftigkeit der WT-Elemente haben.

Die im Rahmen des IKT-Versuchsprogramms durchgeführten Untersuchungen zur Arbeitssicherheit führten zu folgenden Ergebnissen:

Mit zwei unterschiedlichen Messeinrichtungen wurden die Haft- bzw. Gleitreibungskoeffizienten zwischen Elastomer und Edelstahl ermittelt. Dabei wurden jeweils unterschiedliche Gleitmittel zwischen beiden Werkstoffen eingesetzt. Beide Versuchsreihen führten zu unterschiedlichen und schwer interpretierbaren Ergebnissen. Aus diesem Grunde wurde ergänzend die Gefahr des Rutschens auf den WT-Elementen während einer Begehung des Leverkusener Wärmetauschers durch vergleichende subjektive Bewertung beurteilt. Zum Vergleich standen neben der WT-Oberfläche noch Beton- bzw. Kanalklinkeroberflächen zur Verfügung. Die Gefahr des Rutschens auf der WT-Oberfläche war mit der Rutschgefahr auf der Betonoberfläche vergleichbar. Eine subjektiv höhere Rutschgefahr bestand auf der Oberfläche aus Kanalklinker.

Auf der Grundlage der im IKT durchgeführten Untersuchungen zur Arbeitssicherheit lassen sich folgende Feststellungen treffen: Die Haft- und Gleitreibungskoeffizienten für eine nasse Edelstahloberfläche weisen im Vergleich zu den herangezogenen Koeffizienten für mit Biofilm benetzte Betonoberflächen geringfügig geringere bis gleiche Werte auf. Folglich ist mit einer prinzipiell erhöhten Gefahr des Ausrutschens auf Edelstahloberflächen im Vergleich zu Betonoberflächen zu rechnen. Um die Bedeutung der Messwerte in der Praxis zu überprüfen, wurde eine Begehung der in Leverkusen eingebauten WT-Elemente durchgeführt. Dabei entstand subjektiv der Eindruck, dass eine erkennbar erhöhte Rutschgefahr, wie sie die Messwerte implizieren, für Edelstahloberflächen nicht festgestellt werden konnte. Auf ebenfalls begangenen Kanalklinkeroberflächen erschien die Gefahr des Ausrutschens höher als auf Edelstahl. Insgesamt scheint somit, zur sicheren Seite, die z.B. beim Begehen von Mauerwerkskanälen übliche Vorsicht auch für das Begehen der WT angemessen und ausreichend zu sein.

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

4.2.1.3 Aus dem Betrieb von Kläranlagen resultierende Anforderungen – Beitrag von Beat Kobel (Ryser Ingenieure AG)

4.2.1.3.1 Einleitende Vorbemerkungen

Inhaber und Betreiber von Kläranlagen und Kanalisationsnetzen können aufgrund der möglichen Auswirkungen der Abwasserwärmenutzung auf den Betrieb der Kläranlage Vorbehalte gegenüber der Realisierung von Abwasserwärmenutzungsprojekten haben. Um diesen Vorbehalten entgegenwirken zu können, gibt der vorliegende Abschnitt Auskunft darüber, welche Auswirkungen wie Verminderung der Reinigungsleistung oder Steigerung des Energieverbrauchs durch den Betrieb eines Wärmetauschers in der Kanalisation auf einer nachgeschalteten Kläranlage infolge Abkühlung des Abwassers auftreten können. Weiter werden daraus abgeleitete Grenzkriterien für die Abwasserwärmenutzung im Bezug auf den Kläranlagen-Betrieb festgelegt und es wird aufgezeigt, wie die Einhaltung der Grenzkriterien überprüft werden kann.

Die Entwicklung der Temperatur des Abwassers infolge einer Absenkung durch Wärmeentnahme mittels Wärmetauscher in der Kanalisation auf dem Weg bis zur Kläranlage und der Einfluss einer Temperaturabsenkung im Zulauf zur Kläranlage auf den Kläranlagen-Betrieb wurden von der Schweizerischen Eidgenössischen Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz (EAWAG) im Rahmen eines Forschungsprojektes im Auftrag des Schweizerischen Bundesamtes für Energie (BFE) von März 2002 bis September 2004 detailliert untersucht. Sämtliche verwendete Untersuchungsmethoden, Modelle und Resultate wurden in einem ausführlichen Forschungsbericht festgehalten[102]. Im vorliegenden Abschnitt werden die wichtigsten Resultate und Schlussfolgerungen dieser aktuellen Untersuchungen zusammengefasst. Die Grenzkriterien für die Abwasserwärmenutzung im Bezug auf den Kläranlagen-Betrieb werden aufgrund dieser Forschungsergebnisse dargestellt.

4.2.1.3.2 Zusammenhang zwischen Wärmeentnahme aus der Kanalisation und Temperatur im Zulauf zur Kläranlage

4.2.1.3.2.1 Vorgehensweise

In den Kapiteln 4.2.1.5.2.2 bis 4 werden vorab grundlegende Gegebenheiten betreffend Temperatur- und Wärmehaushalt in Kanalisationen und auf Kläranlagen unabhängig von einer Wärmeentnahme von außen erläutert. In den folgenden Kapiteln 4.2.1.5.2.5 und 6 werden dann der Einfluss einer Wärmeentnahme und die entsprechende Temperaturentwicklung in einem Kanalisationsrohr beurteilt. Ein entsprechendes Zahlenbeispiel (Kapitel 4.2.1.5.2.7) und zusammenfassende Folgerungen (Kapitel 4.2.1.5.2.8) schließen das Kapitel 4.2.1.5.2 ab.

4.2.1.3.2.2 Wärmehaushalt im Kanalisationsrohr

Beim Abfluss in einem Kanalisationsrohr findet über verschiedene Wege ein Wärmeaustausch zwischen Abwasser und Umgebung statt. Gemäss Bischofsberger und Seyfried[103] wird die Abwassertemperatur in der Kanalisation im wesentlichen durch die drei Prozesse Wärmeübergang vom Abwasser in die Kanalluft, Abwasserverdunstung und Wärmedurchgang durch die Rohrwand beeinflusst.

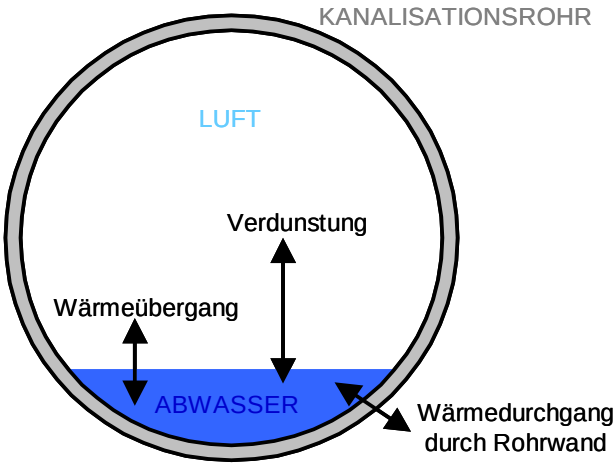
---

[102] Vgl. Wanner, O. (2004b).

[103] Vgl. Bischofsberger, W./C.F. Seyfried (1984).

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

Relevante Wärme-Austauschprozesse im Kanalisationsrohr



Darstellung: Ryser Ingenieure AG

Die natürlichen Wärmeverluste im Kanalisationsrohr werden also durch diese drei Prozesse bestimmt. Andere Prozesse wie Wärmelängsleitung oder Abwassererwärmung durch Reibung sind vernachlässigbar.[104] Entsprechend werden auch in den Modellrechnungen der EAWAG[105] nur die drei wichtigsten Prozesse berücksichtigt (s. Kapitel 4.2.1.5.2.6).

4.2.1.3.2.3 Resultierende Abwassertemperatur beim Zusammenfluss von Teilströmen

Die resultierende Abwassertemperatur T_{res} nach dem Zusammenfluss verschiedener Teilkanalnetze ist nur abhängig von den jeweiligen Durchflussmengen Q_i und Temperaturen T_i und nach der folgenden Formel zu berechnen:

$$T_{res} = \frac{Summe(Q_i \cdot T_i)}{Summe(Q_i)}$$

Beispiel: Ein Kanalisationsstrang mit einer Abflussmenge Q = 50 l/s und einer Temperatur T = 9 °C mündet kurz vor dem Kläranlagen-Zulauf in den Hauptsammelkanal mit Q = 200 l/s und T = 12 °C. Nach Formel 1 ergibt sich eine resultierende Abwassertemperatur im Kläranlagen-Zulauf von (50*9 + 200*12) / 250 = 11,4 °C.

Das Beispiel zeigt, dass durch den Zusammenfluss verschiedener Teilströme vor einer Kläranlage kalte Temperaturen in einzelnen Kanalisationsabschnitten teilweise kompensiert werden. Je größer die wärmeren zufliessenden Teilströme sind, desto mehr werden kühle Teilstränge kompensiert.

[104] Vgl. Wanner, O. et al. (2004b) und Bischofsberger / Seyfried (1984).

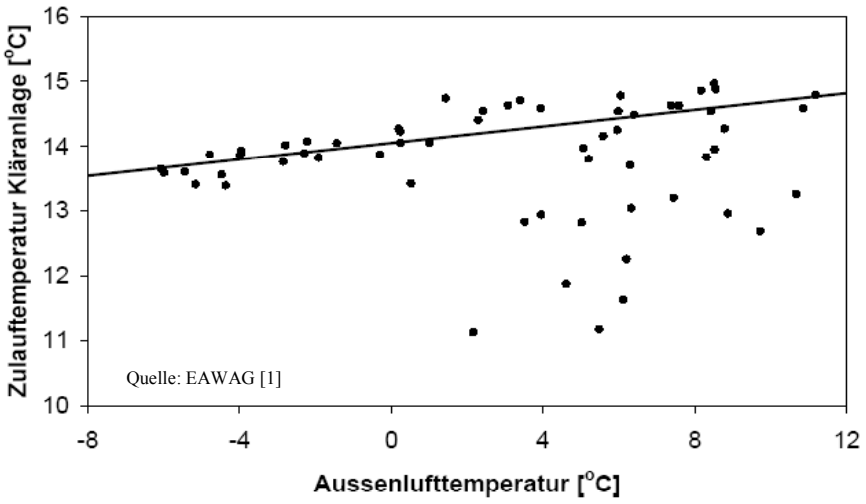
[105] Vgl. Wanner, O. et al. (2004b).

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

4.2.1.3.2.4 Temperaturverlauf in der Kläranlage

Die wetter- und jahreszeitbedingten Schwankungen der Abwassertemperatur im Zulauf einer Kläranlage können stark variieren. Als Beispiel dafür zeigt die nachfolgende die Tagesmittelwerte der Zulauftemperatur der großen Kläranlage Werdhölzli in Zürich (ca. 500.000 Einwohnerwerte) im Winter, die um bis zu 4 K schwanken.[106] Bei kleineren Kläranlagen ist dieser Schwankungsbereich eher noch größer.

Tagesmittelwerte der Zulauftemperatur der KA Werdhölzli in Zürich für Januar und Februar 2002



Darstellung: Ryser Ingenieure AG

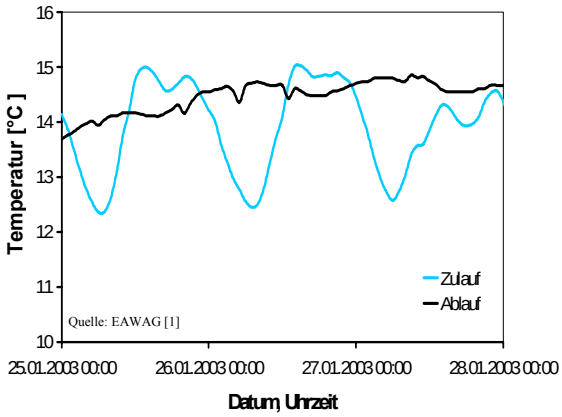
Kurzfristige Tagesschwankungen der Zulauftemperaturen bei Trockenwetter von 2 K bis 3 K werden in einer Kläranlage auf eine Schwankung von nur noch ca. 0,5 K gedämpft. Zudem wird dem Abwasser in der Kläranlage durch die ablaufenden biologischen Prozesse (siehe Kapitel 4.2.1.5.3) Wärme zugeführt, was zu durchschnittlich 0,5 K wärmeren Ablauftemperaturen im Vergleich zu den Zulauftemperaturen führt. Auch bei einem der stärksten Temperatureinbrüche bei Regenwetter im Winter 2002/2003 ist diese Dämpfung klar ersichtlich.[107]

[106] Vgl. Wanner, O. et al. (2004b).

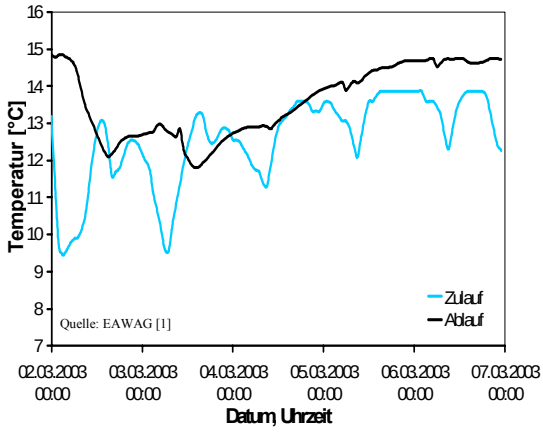
[107] Vgl. Wanner, O. et al. (2004b).

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

Zu- und Ablauftemperatur bei Trockenwetter im Winter (KA Werdhölzli, Zürich)



Zu- und Ablauftemperatur bei Regenwetter im Winter (KA Werdhölzli, Zürich)



Darstellung: Ryser Ingenieure AG

4.2.1.3.2.5 Wärmeentnahme mittels Wärmetauscher in der Kanalisation

Die Temperaturabnahme ΔT des Abwasserstroms[108] ist abhängig von der mittels Wärmetauscher entnommenen Abwasser-Wärmemenge WA in kW (Wärmeübertragungsleistung des Wärmetauschers), der Durchflussmenge Q des Abwassers in l/s (Volumenstrom), der Dichte ρ des Abwassers (kann bei Temperaturen von 0-20° C als konstant 1 kg/l angenommen werden) und der spezifischen Wärmekapazität c des Abwassers (kann bei Temperaturen von 0-20° C als konstant 4.19 kJ/(kgK) angenommen werden). Je größer Q bei gleich bleibendem WA ist, desto geringer ist ΔT und je größer WA bei gleichbleibendem Q ist , desto grösser ist ΔT. Der mathematische Zusammenhang ist gegeben durch die nachfolgende Formel:

$$\Delta T = \frac{W_A}{c \cdot \rho \cdot Q}$$

Beispiele:	Abkühlung des Abwassers bei W_A = 200 kW und Q = 50 l/s: 1.0 K Abkühlung des Abwassers bei W_A = 200 kW und Q = 150 l/s: 0.3 K Abkühlung des Abwassers bei W_A = 400 kW und Q = 150 l/s: 0.6 K

Die Beispiele zeigen, dass bei größeren Durchflussmengen dem Abwasser durchaus große Wärmemengen entzogen werden können, ohne dass die Abwassertemperatur um mehr als 1 K sinkt.

[108] Einheit: K (Kelvin) ; relative Skala entspricht °C, d.h. ΔT = 1 K = 1 °C; absolute Skala: 0 °C = 273.15 K.

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

4.2.1.3.2.6 Modellrechnung

Basierend auf einem Modellansatz von Bischofsberger und Seyfried[109] wurde von der EAWAG mittels Wärmebilanz mit Berücksichtigung der maßgebenden Prozesse Wärmeübergang vom Abwasser in die Kanalluft, Abwasserverdunstung und Wärmedurchgang durch die Rohrwand (siehe Kapitel 4.2.1.5.2.2) ein mathematisches Modell zur Berechnung der zeitlichen und örtlichen Änderung der Abwassertemperatur im Kanalisationsrohr unter Berücksichtigung einer Wärmeentnahme mittels Wärmetauscher entwickelt.[110] Aus den detaillierten EAWAG-Modellrechnungen zum Abwassertemperaturverlauf entlang eines Kanalisationsrohrs mit mittleren Modellparameterwerten für eine typische Trockenwettersituation im Winter (Grenzfall für die Abwasserwärmenutzung, da im Winter die tiefsten Abwassertemperaturen auftreten), kann zusammengefasst folgendes ausgesagt werden:

1. Die relevanten Einflussgrößen auf die Abwassertemperatur sind die Temperatur nach dem Wärmetauscher (Ausgangstemperatur nach Wärmeentnahme), die Abwasserdurchflussmenge und die Zustandsvariablen Temperatur und relative Feuchtigkeit der Kanalisationsluft. Diese vier Parameter zeigten in der Sensitivitätsanalyse bei einer 1%-Änderung viel größeren Einfluss auf die Änderung der Abwassertemperatur als andere Parameter wie Bodentemperatur, Rohrdurchmesser, Relativgeschwindigkeit Abwasser-Luft, etc.[111]

3. Die Berechnungen für eine Wintersituation bei Trockenwetter mit den gewählten typischen Parameterwerten[112] haben ergeben, dass die maximale Abkühlung des Abwassers durch die natürlichen Wärmeverluste in der Kanalisation in der Größenordnung von 1 K liegen. Falls die Abwassertemperatur durch die Wärmeentnahme um oder unter 8 °C liegt, sinkt die Abwassertemperatur im folgenden Kanalisationsrohr kaum mehr oder kann sogar wieder ansteigen.[113]

4.2.1.3.2.7 Zahlenbeispiel

Einem Abwasserstrom von Q = 100 l/s mit T = 11°C wird eine Wärmemenge von WA = 400 kW entnommen. Dadurch reduziert sich die Abwassertemperatur nach dem Wärmetauscher gemäss der Formel $\Delta T = \frac{W_A}{c \cdot \rho \cdot Q}$ um 1.0 K. Gemäss EAWAG-Berechnungsmodell ist auf der dem Wärmetauscher folgendenden Fließstrecke von 1 km bis zur Kläranlage bei diesem Beispiel mit einer weiteren Abkühlung von höchstens 0.1 K zu rechnen.[114]

Kurz vor der Kläranlage vereinigt sich das betrachtete Kanalisationsrohr mit zwei anderen Kanalisationssträngen, in denen Abwasserströme von Q = 200 l/s mit T = 11 °C bzw. Q = 50 l/s mit T = 10 °C fließen. Gemäß der Formel $T_{res} = \frac{Summe(Q_i \cdot T_i)}{Summe(Q_i)}$ erhält man ohne Wärmeentnahme eine resultierende Zulauftemperatur auf der Kläranlage von 10,9 °C.

---

109 Vgl. Bischofsberger / Seyfried (1984).

110 Für detaillierte Informationen zum Aufbau des EAWAG-Berechnungsmodells mit allen verwendeten Modellparametern und entsprechenden Senitivitätsanalysen (Einfluss der Werte der Modellparameter) wird auf den ausführlichen Forschungsbericht oder den KA-Beitrag der EAWAG verwiesen. Vgl. Wanner, O. et al. (2004a) und Wanner, O. et al. (2004b).

111 Vgl. Wanner, O. et al. (2004a) und Wanner, O. et al. (2004b).

112 Vgl. Wanner, O. et al. (2004b), S. 9.

113 Vgl. Wanner, O. et al. (2004a) und Wanner, O. et al. (2004b).

114 Vgl. Wanner, O. et al. (2004a).

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

Bei der Wärmeentnahme im Teilstrang ergibt sich eine Zulauftemperatur auf der Kläranlage von 10,5 °C. Die Abkühlung im Zulauf zur Kläranlage beträgt also nur 0,4 K. Für den Betrieb einer Kläranlage mit einer Bemessungstemperatur (Dimensionierungstemperatur) von 10 °C entsteht wegen der Temperaturänderung durch die beschriebene Wärmeentnahme demnach kein Problem.

4.2.1.3.2.8 Folgerungen

Die relevanten und zu berücksichtigenden Einflussgrößen auf die Temperatur im Abwasser der Kanalisation und deren Entwicklung bis zum Zulauf der Kläranlage sind die durch den Wärmetauscher entnommene Wärmemenge W_A, die Abwasserdurchflussmenge Q und die Temperaturveränderung beim Zusammenfluss verschiedener Teilströme, sprich das Verhältnis zwischen Durchflussmenge im abgekühlten Teilstrang zur Gesamtzulaufmenge auf der Kläranlage: je kleiner dieses Verhältnis ist, desto geringer ist die Auswirkung einer Abkühlung im Teilstrang auf die Abkühlung im Zulauf zur Kläranlage. Die natürlichen Wärmeverluste im Kanalisationsrohr können also vernachlässigt werden.

Beispiel zum Einfluss des Verhältnisses Abwasserdurchflussmenge im Teilstrang mit Wärmeentnahme zu Gesamtzulaufmenge auf der Kläranlage auf die Abkühlung im Zulauf zur Kläranlage

		Teilstrang mit Wärmeentnahme				
		Durchfluss-menge Q_{Teil} [l/s]	Wärmeent-nahme W_A [kW]	Temperatur T, ohne Wärmeentnahme [°C]	**Abkühlung ΔT [K]**	Temperatur T, mit Wärmeentnahme [°C]
		100	300	11.00	**0.72**	10.28
andere Stränge		**Zulauf Kläranlage** (Summe Teilstrang und andere Stränge)				
Durchfluss-menge Q_{Teil} [l/s]	Temperatur T [°C]	Durchfluss-menge Q_{KA} [l/s]	**Verhätnis Q_{Teil}/Q_{KA}** [-]	Temperatur T, ohne Wärmeentnahme [°C]	Temperatur T, mit Wärmeentnahme [°C]	**Abkühlung ΔT [K]**
0.00	12.00	100.00	**1.00**	11.00	10.28	**0.72**
50.00	12.00	150.00	**0.67**	11.33	10.86	**0.48**
100.00	12.00	200.00	**0.50**	11.50	11.14	**0.36**
150.00	12.00	250.00	**0.40**	11.60	11.31	**0.29**
200.00	12.00	300.00	**0.33**	11.67	11.43	**0.24**
250.00	12.00	350.00	**0.29**	11.71	11.51	**0.20**
300.00	12.00	400.00	**0.25**	11.75	11.57	**0.18**
350.00	12.00	450.00	**0.22**	11.78	11.62	**0.16**
400.00	12.00	500.00	**0.20**	11.80	11.66	**0.14**

Darstellung: Ryser Ingenieure AG

Die zusätzliche Abkühlung der Abwassertemperatur durch die Wärmeentnahme mittels Wärmetauscher ist relativ klein. Sie ist z.B. viel kleiner als die wetterbedingten Schwankungen der Abwassertemperatur auf einer Kläranlage (siehe Kapitel 4.2.1.5.2.4). Die Temperaturabnahme im Zulauf zur Kläranlage durch Wärmeentnahme in einem vorangehenden Teilstrang ist real kaum eindeutig messbar und von natürlichen Einflüssen unterscheidbar, weil die witterungsbedingten Schwankungen in der Regel größer sind.

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

4.2.1.3.3 Auswirkung der Wärmeentnahme auf den Kläranlagen-Betrieb

4.2.1.3.3.1 Grundlegende Erläuterungen zur Dimensionierung von Belebtschlammanlagen (Schlammalter und Sicherheitsfaktor)

Die für die Reinigungsleistung relevanten und von Temperatureinflüssen am stärksten betroffenen Prozesse in einer Kläranlage sind die Nitrifikation (mikrobiologische aerobe Oxidation von Ammonium NH_4 in Nitrat NO_3) und die Denitrifikation (mikrobiologische Reduktion von Nitrat NO_3 zum Zwischenprodukt Nitrit NO_2 und schließlich zu Luftstickstoff N_2). Grundsätzlich nimmt der Wirkungsgrad der Stickstoffelimination bei einer Abkühlung des Abwassers aufgrund der Verminderung der Wachstumsgeschwindigkeit der Mikroorganismen (Nitrifikanten/ Denitrifikanten) ab[115]. Auf den Abbau von Kohlenstoff C hat die Temperatur keinen Einfluss.

Das Schlammalter SA ist die wichtigste Dimensionierungsgröße für die Dimensionierung von Belebtschlammbecken[116] [1,8]. Es entspricht der Masse der Feststoffe im Belebungsbecken dividiert durch den täglichen Schlammverlust im Überschussschlamm und Nachklärbeckenablauf.

Allgemein gilt, dass der Kehrwert des mittleren Schlammalters SA der mittleren Wachstumsgeschwindigkeit der Mikroorgansimen entspricht:

$$\mu_{mit} = 1/SA_{mit}.$$

Mikroorganismen mit einer maximalen Wachstumsgeschwindigkeit $\mu_{max} > 1/SA$, können sich im Belebtschlamm ansiedeln.[117]

Der Sicherheitsfaktor SF der Nitrifikation entspricht der maximalen dividiert durch die mittlere Wachstumsgeschwindigkeit der Nitrifikanten:[118]

$$SF = \mu_{max}/\mu_{mit}$$

Da die Nitrifikanten aerob[119] wachsen, ist

$$\mu_{mit} = 1/SA_{aer}$$

und damit

$$SF = \mu_{max} * SA_{aer}.$$

Die maximale Wachstumsgeschwindigkeit μ_{max} der Nitrifikanten ist temperaturabhängig und definiert durch die folgende Beziehung:[120]

---

115 Vgl. Wanner, O. et al. (2004b).

116 Vgl. Wanner, O. et al. (2004b) und ATV-DVWK (2000).

117 Vgl. Wanner, O. et al. (2004b).

118 Vgl. Wanner, O. et al. (2004b).

119 Das Wachstum findet unter Eintragung von Sauerstoff statt.

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

$$\mu_{max}(T)\ [d^{-1}] = \mu_{max}(10°C) * e^{(0.11*(T[°C]-10°C))}$$

mit $\mu_{max}\ (10°C) = 0.2\ d^{-1}$

Die Nitrifikation wird so ausgelegt, dass in 80 % der Lastfälle die gesetzlich vorgegebene Ablaufkonzentration von Ammonium NH_4 nicht überschritten wird.[121] Somit muss der Sicherheitsfaktor SF größer sein als der Quotient aus maximaler NH_4-Fracht während der Tagesspitze eines 80%-Lasttages und der mittleren NH_4-Tagesfracht.[122]

Der Sicherheitsfaktor vermindert die Gefahr des Auswaschens der Nitrifikanten bei unvorhergesehenen Betriebssituationen wie z.B. Hemmung der Nitrifikanten (zu wenig Sauerstoff, pH < 7 od. > 8, Giftstoffe), kurzfristig erhöhte Spitzenbelastungen oder schlechte Absetzbarkeit des Schlammes.

Bei der Dimensionierung von Belebtschlammanlagen wird die minimale Temperatur berücksichtigt, bei der die vorgeschriebene Leistung erbracht werden muss. Gemäss ATV ist diese Dimensionierungstemperatur $T_{Dimensinierung} = 10$ °C.[123]

Für das aerobe Schlammalter SA_{aer} ergibt sich also:

$$SA_{aer} \geq SF / \mu_{max}(T_{Dimensionierung}).$$

4.2.1.3.3.2 Stationäre Modellrechnung: Nomogramm

Mit einem Modell von Koch et al.,[124] das auf dem Belebtschlammmodell ASM3 von Gujer et al. basiert,[125] wurde untersucht, wie sich eine Temperaturabnahme im Zulauf zur Kläranlage auf die Prozesse Nitrifikation und Denitrifikation auswirkt.[126] Das verwendete Modell wurde für die Simulation von nitrifizierenden und denitrifizierenden Belebungsanlagen entwickelt und berücksichtigt Prozesse wie Hydrolyse, Wachstum, endogene Atmung, Nitrifikation und Denitrifikation (in NRW sind 89 % aller Kläranlagen mit mehr als 5.000 EW mit Verfahren zur Nitrifikation und Denitrifikation ausgerüstet,[127] weitere 4 % mit Verfahren zur Nitrifikation, die häufigste Verfahrensart sind dabei Belebungsanlagen, nur 7 % der Anlagen verfügen über keine Stickstoffbehandlung[128]). Mit dem Modell kann die Gesamtstickstoffeliminationsleistung, zusammengesetzt aus Schlammproduktion (Einbindung von Stickstoff in die Biomasse) und Denitrifikationsleistung, berechnet werden. Für die Kalibrierung wurden die wichtigsten Parameter auf der Kläranlage Werdhölzli in Zürich gemessen.

---

120 Vgl. Head, M.A. / J.A.Oleszkiewicz (2004) und Wanner, O. et al. (2004b).

121 In Deutschland gemäss Abwasserverordnung (AbwV): 10 mgNH_4-N/l für KA mit mehr als 5.000 EW, in der Schweiz gemäss Gewässerschutzverordnung (GschV): 2 mgNH_4-N/l (oder kommunal tiefere Werte).

122 Vgl. Wanner, O. et al. (2004b).

123 Vgl. ATV-DVWK (2000).

124 Vgl. Koch, G. et al. (2000) und Koch, G. et al. (2001).

125 Vgl. Gujer, W./Larsen A.T. (1995).

126 Vgl. Wanner, O. et al. (2004b).

127 Die Wärmenutzung aus Abwasser ist in der Regel bei Einzugsgebieten ab einer Grösse von 5.000 EW sinnvoll (vgl. Bericht Ryser Ingenieure AG: Wärmegewinnung aus Abwasserkanälen – Anforderungen aus Sicht der Kanalbetreiber, Kapitel 4.1, S. 69 ff.)

128 Vgl. Falke, H. et al. (2003).

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

In einer großen Zahl von Simulationen wurden die wichtigen Parameterwerte (Temperatur, Schlammalter, BSB-, CSB- und Stickstoff-Zulaufkonzentrationen) variiert. Für die übrigen Modellparameter wurden Durchschnittswerte von kommunalen Kläranlagen verwendet. Die Resultate dieser Simulationen stationärer Zustände wurden im für alle nitrifizierenden und denitrifizierenden Kläranlagen gültigen Nomogramm dargestellt.[129]

Mit dem Nomogramm können die Auswirkungen einer Wärmeentnahme vor dem Zulauf auf die biologische Stufe der Kläranlage auf der Basis von Tagesmittelwerten abgeschätzt werden. Insbesondere können folgende Effekte der Abwasserabkühlung beurteilt werden:

1. Verminderung der Nitrifikationssicherheit (SF) bei gleich bleibendem aerobem Schlammalter (gleiche Beckenvolumen)

   → Erhöhung der NH4-Konzentration im Ablauf während einer Spitzenfracht (Diagramm 1)

2. Vergrößerung des Belebtschlammbeckens bzw. des totalen Schlammalters bei gleich bleibender Nitrifikationssicherheit und Denitrifikationsleistung

   → keine Leistungsverminderung der Kläranlage (Diagramm 2)

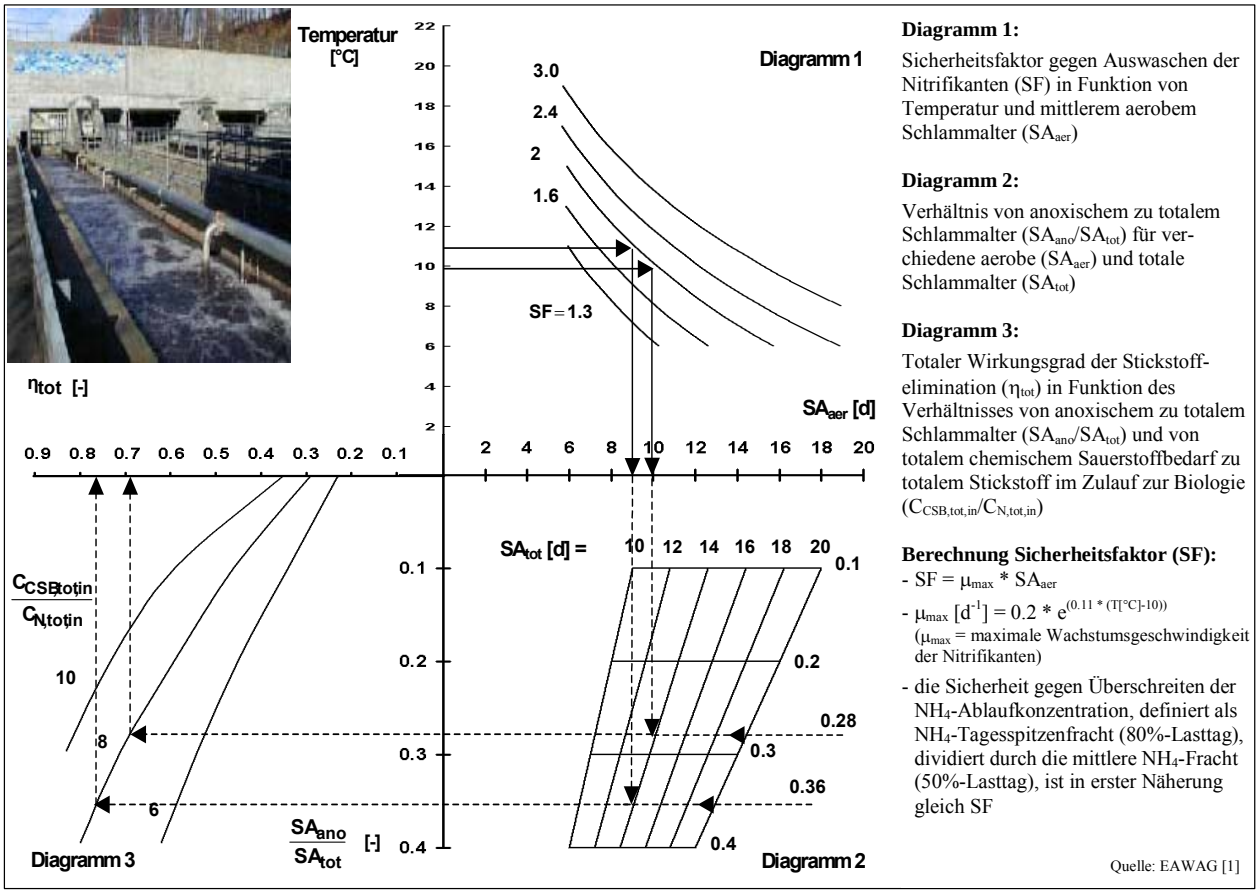
3. Vergrößerung des Nitrifikationsvolumens auf Kosten des Denitrifikationsvolumens

   → gleiche Nitrifikationssicherheit = gleiche NH_4-Ablaufwerte, aber verminderte Denitrifikationsleistung, d.h. geringere totale Stickstoffelimination (Diagramm 3)

[129] Vgl. Wanner, O. et al. (2004b).

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

Nomogramm zur Abschätzung des Einflusses einer Temperaturabsenkung des Abwassers im KA-Zulauf auf die Nitrifikationssicherheit bzw. die Verminderung der Stickstoffelimination



Darstellung: Ryser Ingenieure AG

Anwendungsbeispiel Nomogramm:

Einfluss der Temperaturabsenkung um 1 K in der Biologie einer Kläranlage (Belebungsbecken mit aerober Nitrifikations- und anoxischer Denitrifikationszone, SA_{tot} = 14 Tage, Verhältnis $C_{CSB,tot,in}/C_{N,tot,in}$ = 8, 30.000 Einwohnerwerte EW) mit einer Temperatur von 11 °C und einem aeroben Schlammalter SA_{aer} von 9 Tagen (Sicherheitsfaktor SF = 2):

Bei gleich bleibendem SA_{aer} vermindert sich SF auf 1,8, was für die betrachtete Anlage noch nicht problematisch ist (Quotient NH_4-Spitzentagesfracht/mittlere NH_4-Fracht bei Anlagen dieser Grösse meist kleiner, muss anhand von Betriebsdaten der Kläranlage geprüft werden). Bei Erhöhung von SA_{aer} auf 10 Tage bleibt SF gleich (Diagramm 1). Die Erhöhung von SA_{aer} kann erreicht werden durch eine Vergrößerung des aeroben Volumens des Belebungsbeckens. Für das Beispiel bedeutet dies eine Reduktion des Denitrifikationsvolumens und damit von SA_{ano}/SA_{tot} von 0,36 auf 0,28 (Diagramm 2). Dadurch wird die Denitrifikationsleistung vermindert, was den totalen Wirkungsgrad der Stickstoffelimination η_{tot} von 0,77 auf 0,69 reduziert. Trotz der Temperaturabsenkung um 1 K bleibt aber die Sicherheit für die Einhaltung des NH_4-Ablaufgrenzwertes gleich.

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

4.2.1.3.4 Grenzkriterien für die Sicherstellung des Kläranlagenbetriebs

Um den Betrieb und die Reinigungskapazität der Kläranlage sicherstellen zu können und dem Gewässerschutz Rechnung zu tragen, wurden in der Schweiz in Absprache mit dem Verband Schweizer Abwasserfachleute (VSA), dem Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft des Kantons Zürich (AWEL), dem Schweizerischen Bundesamt für Energie (BFE) und der EAWAG die nachfolgenden Empfehlungen ausgearbeitet.

Die Grenzfälle für die Einhaltung der Ammonium (NH_4) - Ablaufgrenzwerte treten nur in den Wintermonaten auf, wenn sich die Zulauftemperaturen der Kläranlage im Bereich der Dimensionierungstemperatur für die Kläranlage (in Deutschland gem. ATV 10°C)[130] bewegen. Vor allem in diesem Zeitraum wird aber die Wärme zu Heizzwecken benötigt. Im Frühling, Sommer und Herbst sind die Abwassertemperaturen in den meisten Fällen zwischen 12 °C und 20 °C und damit unproblematisch für eine Wärmeentnahme.

Grundsätzlich darf die Wärmeentnahme aus der Kanalisation vor einer Kläranlage die Reinigungsleistung der betreffenden Kläranlage nicht maßgebend verringern oder gar einen Ausbau nötig machen. Bei korrekt dimensionierten und betriebenen Kläranlagen ergeben sich keine Probleme betreffend Reinigungsleistung der Kläranlage, falls die Dimensionierungstemperatur durch die Wärmeentnahme nicht unterschritten wird.

Ferner darf die Temperatur des Gewässers, in welches das Abwasser eingeleitet wird (Vorfluter), durch die Wärmenutzung nicht nachteilig verändert werden, so dass die Lebens- und Fortpflanzungsbedingungen für die Wasserorganismen sowie die natürliche Selbstreinigung gewährleistet bleiben.

Da die Temperaturabsenkung durch Wärmeentnahme in der gleichen Größenordnung liegt, wie die natürlichen Wärmeverluste in der Kanalisation (siehe Kapitel 4.2.1.5.2.6), hat die Temperaturabnahme keine Auswirkungen auf die Kanalisation selbst.

Für die Entnahme von Wärme aus Abwasser besteht gewässerschutzrechtliche Bewilligungspflicht. Die Bewilligung wird von der zuständigen Behörde (Amt für Gewässerschutz oder Umweltschutz) erteilt, falls die in den folgenden Kästen beschriebenen Bedingungen (allgemeingültige Grenzkriterien) erfüllt sind.

Allgemeingültige Grenzkriterien für die Wärmenutzung aus ungereinigtem Abwasser in der Kanalisation vor der Kläranlage (KA):

a) Falls die durch eine Wärmeentnahme aus einem Kanalisations-Teilstrang resultierende Temperatur im KA-Zulauf im Durchschnitt der Wintermonate Dezember, Januar und Februar 10 °C nicht unterschreitet und die resultierende Abkühlung im KA-Zulauf ≤ 0,5 K ist (entspricht dem langjährigen periodenbezogenen Schwankungsbereich), ist die Wärmeentnahme ohne detaillierte Untersuchungen zulässig.

[130] Vgl. ATV-DVWK (2000).

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

b) Falls die durch eine Wärmeentnahme aus einem Kanalisations-Teilstrang resultierende Temperatur im KA-Zulauf im Durchschnitt der Wintermonate Dezember, Januar und Februar 10 °C unterschreitet und/oder die resultierende Abkühlung im KA-Zulauf > 0,5 K ist, muss eine detaillierte Überprüfung des Einflusses auf den KA-Betrieb durch Abwasserfachleute unter Berücksichtigung der Dimensionierungstemperatur erfolgen (Beschreibung des Vorgehens in Kapitel 5 des vorliegenden Berichtes). Anhand der Überprüfung kann entschieden werden, ob die KA-Reinigungsleistung durch die geplante Wärmeentnahme nicht beeinträchtigt wird und entsprechend die Wärmeentnahme zulässig ist.

c) Bei der Überprüfung sind bestehende und allfällig geplante Wärmeentnahmen im gleichen Kanalisationsnetz vor der KA zu berücksichtigen (Kumulierung der Abkühlungen bis zum KA-Zulauf). Dabei gilt für die Wärmenutzer das Prinzip „first come - first serve".

Allgemeingültige Grenzkriterien für die Wärmenutzung aus gereinigtem Abwasser im Ablauf nach der Kläranlage (KA) bzw. vor dem Vorfluter:

a) Die Temperatur in Fliessgewässern darf sich durch Wärmenutzung gemäss Gewässerschutzverordnung nicht um mehr als 1,5 K verändern. Sinngemäss gilt für den Vorfluter: Die Temperatur im Vorfluter der KA darf sich durch eine Wärmeentnahme aus dem KA-Ablauf nicht um mehr als 1,5 K ändern.

b) Die KA-Ablauf-Temperatur soll nach der Wärmeentnahme bei der Einleitungsstelle in den Vorfluter 3 °C nicht unterschreiten (dadurch können lokale Beeinträchtigungen der Fauna und Flora ausgeschlossen werden).

c) Schnelle Temperaturveränderungen im Gewässer (angesichts der Systemträgheit bei der Abwasserwärmenutzung nicht zu erwarten) sind zu vermeiden (entsprechende Auswirkungen auf den Vorfluter der KA ≤ 1,5 K).

a) Bei offenen Systemen (Einleitung in ein anderes Gewässer) müssen allfällige Restwasserbestimmungen für einen Vorfluter durch die entnommene Abwassermenge beachtet werden.

4.2.1.3.5 Hilfsmittel zur Überprüfung der Einhaltung der Grenzkriterien

4.2.1.3.5.1 Berechnung der Abwassertemperatur im Zulauf zur Kläranlage

Mit einer einfachen Berechnung unter Verwendung in Kapitel 4.2.1.5.2.3 und 4.2.1.5.2.5. dargestellten Formeln kann abgeschätzt werden, wie sich die Wärmeentnahme mittels Wärmetauscher in einem Kanalisationsabschnitt und der nachträgliche Zufluss von weiteren Teilströmen (gemäss Folgerungen in Kapitel 4.2.1.5.2.8 die relevanten Einflussgrössen) auf die Temperatur im Zulauf zur Kläranlage auswirken.

Bei den folgenden zwei Beispielen für eine mittelgroße Kläranlage wird die resultierende Temperatur im Zulauf zur Kläranlage für zwei unterschiedliche Wärmeentnahmen aus dem gleichen Teilstrom im Kanalisationsnetz vor der Kläranlage berechnet.

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

Geringe Wärmeentnahme bei KA mit ca. 50.000 EW

Abnahme der Abwassertemperatur (T_A) in Teilstrom durch Wärmeentnahme mittels Wärmetauscher (mit WT-Leistung W_A)	T vor WT [°C]	Q [l/s]	W_A [kW]	ΔT [K]	T nach WT [°C]
Teilstrom	12.00	50	100	**-0.48**	**11.52**

Abnahme der Abwassertemperatur (T_A) im KA-Zulauf durch Wärmeentnahme aus Teilstrom	T [°C]	Q [l/s]		
Gesamter KA-Zulauf ohne Wärmeentnahme	11.00	200	Eingabe	**Resultate**
Teilstrom ohne Wärmeentnahme	12.00	50		
KA-Zulauf ohne Teilstrom	10.67	150		
Teilstrom mit Wärmeentnahme	**11.52**	50	**Δ T im KA-Zulauf**	
Gesamter KA-Zulauf mit Wärmeentnahme aus Teilstrom	**10.88**	200	**-0.12 K**	

Große Wärmeentnahme bei KA mit ca. 50.000 EW

Abnahme der Abwassertemperatur (T_A) in Teilstrom durch Wärmeentnahme mittels Wärmetauscher (mit WT-Leistung W_A)	T vor WT [°C]	Q [l/s]	W_A [kW]	ΔT [K]	T nach WT [°C]
Teilstrom	12.00	50	300	**-1.43**	**10.57**

Abnahme der Abwassertemperatur (T_A) im KA-Zulauf durch Wärmeentnahme aus Teilstrom	T [°C]	Q [l/s]		
Gesamter KA-Zulauf ohne Wärmeentnahme	11.00	200	Eingabe	**Resultate**
Teilstrom ohne Wärmeentnahme	12.00	50		
KA-Zulauf ohne Teilstrom	10.67	150		
Teilstrom mit Wärmeentnahme	**10.57**	50	**Δ T im KA-Zulauf**	
Gesamter KA-Zulauf mit Wärmeentnahme aus Teilstrom	**10.64**	200	**-0.36 K**	

Darstellung: Ryser Ingenieure AG

Das folgende Beispiel für eine große Kläranlage mit mehreren Wärmeentnahmen aus verschiedenen Teilströmen des Kanalisationsnetzes, deren Auswirkungen sich bis zum Kläranlagen-Zulauf kumulieren, zeigt, dass sich auch mehrere z.T. große Wärmeentnahmen auf die Temperatur im Kläranlagen-Zulauf nicht unbedingt maßgeblich auswirken.

Mehrere Wärmeentnahmen bei KA mit ca. 150.000 EW

	Temperatur ohne Wärmeentnahme T [°C]	Abfluss-menge Q [l/s]	Leistung Wärmetauscher W_A [kW]	**Temperatur-abnahme ΔT [K]**	Temperatur mit Wärmeentnahme T [°C]
Teilstrom mit Wärmeentnahme 1	12.00	50	300	**1.43**	10.57
Teilstrom mit Wärmeentnahme 2	13.00	25	150	**1.43**	11.57
Teilstrom mit Wärmeentnahme 3	11.00	40	100	**0.60**	10.40
Teilstrom mit Wärmeentnahme 4	10.00	80	150	**0.45**	9.55
Teilströme ohne Wärmeentnahme (Differenz zu Zulauf KA gesamt)	12.43	405			
Zulauf KA gesamt	12.00	600	700	**0.28**	11.72
	Eingabe				Resultate

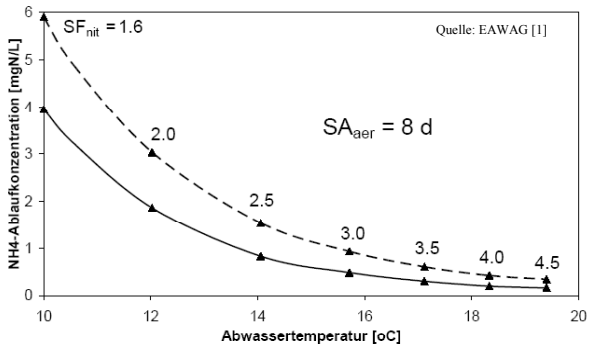
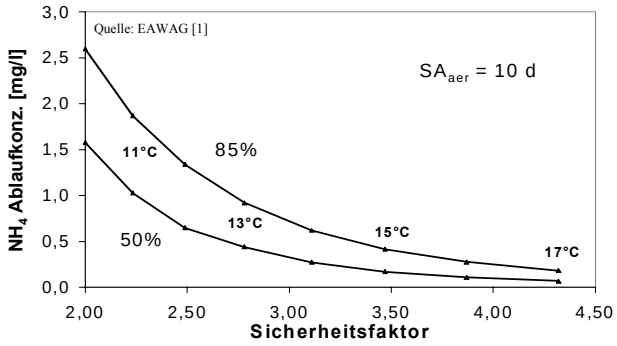
Darstellung: Ryser Ingenieure AG

4.2.1.3.5.2 Dynamische Modellrechnungen: Einhaltung des Ammonium-Ablaufgrenzwertes

In einem zweiten Schritt muss im Bedarfsfall (Grenzkriterium a in Kapitel 4.2.1.5.4 nicht erfüllt → Kriterium b kommt zum Tragen) durch Abwasserfachleute geprüft werden, ob die im Kläranlagen-Zulauf resultierende tiefere Temperatur die Reinigungsleistung der Kläranlage relevant vermindert, d.h. ob der NH_4-Ablaufgrenzwert eingehalten werden kann.

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

Als Ergänzung zum statischen Nomogramm wurden mittels dynamischer Simulation aufgrund von Messwerten (NH_4-Tagesgänge, einfügen der Temperatur als Variable) mit den bereits erwähnten Modellen[131] und dem Simulationsprogramm ASIM durch die EAWAG der Zusammenhang zwischen Sicherheitsfaktor SF und NH_4-Konzentration im Kläranlagen-Ablauf (24h-Sammelproben) für den 50%-Lasttag (NH_4-Fracht, die in 50% der Tage eines Jahres unterschritten wird, aus Summenhäufigkeitskurve der NH_4-Tagesfrachten) und den 85%-Lasttag (NH_4-Fracht, die in 85% der Tage eines Jahres unterschritten wird, aus Summenhäufigkeitskurve der NH_4-Tagesfrachten) auf der Kläranlage Werdhölzli in Zürich ermittelt und die Resultate in grafisch dargestellt.[132]

NH_4-Konzentration im Ablauf der KA Werdhölzli in Abhängigkeit von der Abwassertemperatur und dem zugehörigem Sicherheitsfaktor SF für den 50%-Lasttag (gestrichelte Linie) und den 85%-Lasttag (ausgezogene Linie) bei SA_{aer} = 8 d	**NH_4-Konzentration im Ablauf der KA Werdhölzli in Abhängigkeit vom Sicherheitsfaktor SF und der zugehörigen Abwassertemperatur und dem für den 50%-Lasttag (gestrichelte Linie) und den 85%-Lasttag (ausgezogene Linie) bei SA_{aer} = 10 d**
	
Darstellung: Ryser Ingenieure AG	

Aus dem aeroben Schlammalter SA_{aer} im Winter und den tiefsten Ablauftemperaturen im Betrieb kann der aktuelle Sicherheitsfaktor SF der Nitrifikation berechnet werden (siehe oben, Kapitel 4.2.1.5.3.1). Der Einfluss einer Temperaturabsenkung auf die NH_4-Ablaufkonzentration kann nun mit Hilfe der oben dargestellten Abbildungen abgeschätzt werden (Berechnung des neuen SF bei geringerer Temperatur). Im Falle einer deutlichen Überschreitung des maßgebenden Grenzwertes (je nach Region und Anforderungen an den Vorfluter verschieden und für jede Kläranlage abzuklären) auch für den 50%-Lasttag, kann umgekehrt eine maximal zulässige Temperaturabsenkung und daraus die maximal mögliche Wärmeentnahmemenge abgeleitet werden.

Bei einem aeroben Schlammalter SA_{aer} von 10 Tagen und einer Temperatur[133] von 10 °C ergibt sich ein Sicherheitsfaktor SF von 2, d.h. eine zweifache Sicherheit gegen das Auswaschen der Mikroorganismen (Nitrifikanten). Damit wird gem. der obi-

131 Vgl. Koch, G. et al. 2000 und 2001, sowie Gujer, W. et al. (1999).

132 Vgl. Wanner, O. (2004b).

133 Dimensionierungstemperatur nach ATV-DVWK (2000).

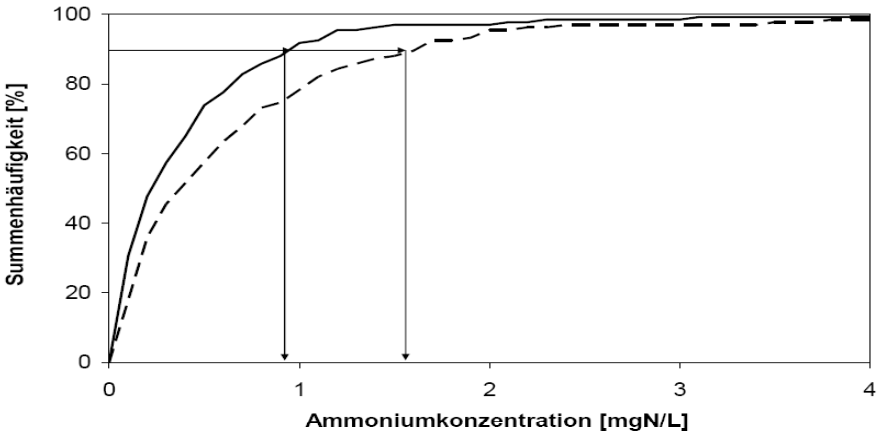
© 2005 All rights reserved by GEK mbH

gen Abbildung der in der Abwasserverordnung (AbwV) vorgeschriebene NH_4-Stickstoff-Ablaufgrenzwert für Kläranlagen mit mehr als 5.000 EW von 10 mg/l bei weitem eingehalten.[134]

Beispiel:	Erhöht man die Wärmetauscherleistung im vorangehenden Beispiel gemäß der Tabelle „Große Wärmeentnahme bei KA mit ca. 50.000 EW“ auf eine sehr große Leistung von W_A = 500 kW, ergibt sich durch die Wärmeentnahme vor der ARA eine Temperaturabsenkung im Kläranlagen-Zulauf von 0,6 K (> 0,5 K), d.h. das Abwasser wird von 11 °C auf 10,4 °C abgekühlt. Die betreffende Kläranlage wird mit einem aeroben Schlammalter von 11 Tagen betrieben. Durch die Abkühlung vermindert sich also SF von $[0{,}2 * e^{(0{,}11 * (11\text{-}10))}] * 11 = 2{,}5$ auf $[0{,}2 * e^{(0{,}11 * (10{,}4\text{-}10))}] * 11 = 2{,}3$. Auch mit der Abkühlung kann der NH_4-Ablaufgrenzwert sicher in mehr als 95% der Tage eines Jahres eingehalten werden. Damit ist die Wärmeentnahme aus Sicht der Kläranlagen-Betriebssicherheit zulässig.

Basierend auf einer Summenhäufigkeitskurve von NH_4-Ablaufmesswerten kann die Summenhäufigkeitskurve abgeschätzt werden, die nach einer Temperaturabsenkung zu erwarten ist (siehe nachfolgende Abbildung sowie das nachfolgende Kapitel).

Ausgezogene Linie: Summenhäufigkeit der NH_4-Konzentration im Ablauf der KA Werdhölzli (berechnet mit 134 24h-Sammelproben 2002/2003). Gestrichelte Linie: Verschiebung der Verteilung gemäss Modellvorhersage nach permanenter Abkühlung von 1.5 K im KA-Zulauf



Darstellung: Ryser Ingenieure AG

4.2.1.3.5.3 Detailliertes Vorgehen für die Überprüfung der Einhaltung des Ammonium-Ablaufgrenzwertes

Das Vorgehen, das im Forschungsprojekt der EAWAG auf die Kläranlage Werdhölzli in Zürich angewendet worden ist, kann wie folgt als allgemeines Vorgehen formuliert werden.[135] Mit diesem Vorgehen können Abwasserfachleute die Nitrifikationsreserve einer in Betrieb stehenden Kläranlage und die Auswirkung einer Absenkung der Abwassertemperatur im Kläranlagenzulauf auf die NH_4-Ablauf-Konzentration bestimmen:

---

134 In der Schweiz sieht die Situation mit einem allgemeingültigen Grenzwert von 2 mg/l etwas problematischer aus, weshalb hier dem Effekt der Abkühlung des KA-Zulaufes rechtlich gesehen stärker Rechnung getragen werden muss als in Deutschland. Gemäß Schweizer Gesetzgebung darf der Grenzwert an höchstens 10 – 20 % der Tage eines Jahres überschritten werden. Es kann davon ausgegangen werden, dass der 85%-Lastfall und eine tiefe Temperatur von 10° C nur sehr selten zusammenfallen und dass eine Grenzwertüberschreitung demnach sicher in weniger als 5 % der Tage eines Jahres vorkommen kann.

135 Vgl. Wanner, O. et al. (2004b).

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

1) Basierend auf gemessenen Tagesgängen von Zufluss, Temperatur, Zulauf- und Ablaufkonzentration für Ammonium wird mit einem Simulationsprogramm, wie z.B. ASIM[136], ein Belebtschlammmodell, wie z.B. ASM3[137] für die betrachtete Kläranlage kalibriert.

2) Mit im Kläranlagenzulauf gemessenen NH_4-Tagesfrachten wird eine Summenhäufigkeitskurve berechnet, aus der die 50 %- und 85 %-Werte der Ammoniumfracht bestimmt werden können.

3) Diese 50 %-und 85 %-Frachtwerte und ein typischer Tagesgang der NH_4-Zulaufkonzentration werden als Input für das kalibrierte Modell verwendet um für verschiedene Abwassertemperaturen mittlere Ablaufkonzentrationen von Ammonium $C_{NH4}(T)$ zu berechnen.

4) Mit dem Ansatz $C_{NH4}(T) = C_{NH4}(T=10°C)* e^{k(10-T)}$ werden die so berechneten Ablaufkonzentrationen von Ammonium gefittet (Nachbildung der 50%- u. 85%-Kurven gem. der Abb. in Kapitel 4.2.1.5.2.3 dadurch Bestimmung von k).

5) Mit gemessenen 24-Stunden-Sammelproben der NH_4-Konzentration im Ablauf der Kläranlage wird eine Summenhäufigkeitsverteilung berechnet.

6) Es wird geprüft, ob die betrachtete Kläranlage eine Nitrifikationsreserve aufweist, d.h. ob gegebene Grenzwerte für die NH_4-Ablaufkonzentration eingehalten werden.

7) Wenn dies so ist, wird die Absenkung ΔT der Kläranlagen-Zulauftemperatur berechnet, die aufgrund der geplanten Wärmeentnahme aus dem Abwasser in der Kanalisation zu erwarten ist.

8) Mit den vorhandenen 24-Stunden-Sammelproben der NH_4-Konzentration im Ablauf der Kläranlage wird eine neue Summenhäufigkeitskurve für die um ΔT reduzierte Abwassertemperatur berechnet: $C_{NH4,neu}(T) = e^{k\Delta T}*C_{NH4,alt}$.

9) Wenn die NH4-Ablaufkonzentration für die neue Summenhäufigkeitskurve gegebene Grenzwerte verletzt, muss ΔT verkleinert werden und die Schritte (7) bis (9) wiederholt werden.

10) Wenn durch die NH_4-Ablaufkonzentration für die neue Summenhäufigkeitskurve die gegebenen Grenzwerte eingehalten werden, lässt sich durch Umformung der Formel in Kapitel 4.2.1.5.2.5 die Wärmemenge pro Zeiteinheit berechnen, die dem Abwasser in der Kanalisation theoretisch entnommen werden darf.

4.2.1.3.6 Energieverbrauch

Die Entwicklung des Energieverbrauchs bei einer Abkühlung im Zulauf zur Kläranlage ist im Vergleich zur Sicherstellung der Reinigungsleistung einer Kläranlage im Zusammenhang mit der Abwasserwärmenutzung nur von untergeordneter Bedeutung. Deshalb wird der Einfluss einer Abkühlung im Kläranlagenzulauf auf den Energieverbrauch der Kläranlage im vorliegenden Abschnitt nur qualitativ abgeschätzt.

---

[136] Vgl. Gujer, W./A.T.Larsen (1995).

[137] Vgl. Gujer, W. et al. (1999).

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

Bei einer Erhöhung der Kläranlagen-Zulauftemperaturen im Sommer steigt grundsätzlich die Nitrifikationsleistung, was durch den damit steigenden Sauerstoffbedarf den Energieverbrauch erhöht (Erhöhung der Belüftungsleistung). Die Erhöhung der Kläranlagen-Zulauftemperatur kann auch beim Betrieb einer Abwasserwärmenutzungsanlage zu Kühlzwecken erfolgen. Höhere Zulauftemperaturen sind positiv für die Reinigungsleistung, erfordern aber einen erhöhten Energieverbrauch. Kann die benötigte Belüftungsleistung bei höheren Zulauftemperaturen nicht erbracht werden (zu geringer Sauerstoffeintrag), könnten in seltenen Fällen Geruchsprobleme auftreten. Dies ist im Einzelfall abzuklären.

Dagegen wird der Energieverbrauch auf einer Kläranlage bei einer Abkühlung des Abwassers insgesamt sinken. In der Biologischen Stufe sinkt der Energieverbrauch, bei der Schlammbehandlung wird er leicht steigen (großer Wärmebedarf für die Erreichung der nötigen Temperaturen für die Schlammfaulung). Gemäss dem Handbuch Energie in Kläranlagen[138] beträgt der mittlere Anteil des Energieverbrauchs der Biologie 67 % und derjenige der Schlammbehandlung nur 11 % des gesamten Energieverbrauchs auf der Kläranlage. Deshalb ergibt sich in der Summe ein geringerer Energieverbrauch.

4.2.1.3.7 Zusammenfassung

Die relevanten Einflussgrößen auf die Temperatur im Abwasser der Kanalisation und deren Entwicklung bis zum Zulauf der Kläranlage sind die durch den Wärmetauscher entnommene Wärmemenge W_A und die dadurch erfolgende Abkühlung im Teilstrang, die Abwasserdurchflussmenge Q im Teilstrang mit Wärmeentnahme sowie die Gesamt-Zulaufmenge und Temperatur im Kläranlagen-Zulauf (Verhältnis von Teilstrang mit Wärmeentnahme zu Kläranlagen-Zulauf).

Kläranlagen-Zulauftemperaturen, die nur für ein paar Stunden abgesenkt werden (kurzzeitige Temperatureinbrüche sowie Tag-Nacht-Schwankungen), beeinträchtigen die Nitrifikationsleistung kaum, da sie durch die großen hydraulischen Aufenthaltszeiten von Belebungsanlagen ausgeglichen werden. Ständig tiefere Abwassertemperaturen im Zulauf einer Kläranlage, die während länger dauernden Regenperioden oder als Folge einer Wärmeentnahme in der vorangehenden Kanalisation auftreten, führen jedoch theoretisch zu einer kleineren Nitrifikationsleistung und zu höheren Ablaufkonzentrationen von Ammonium. Die zusätzliche Abkühlung der Abwassertemperatur durch die Wärmeentnahme mittels Wärmetauscher ist aber klein. Sie ist kleiner als die wetterbedingten Schwankungen der Abwassertemperatur auf einer Kläranlage. Die Temperaturabnahme im Zulauf zur Kläranlage durch Wärmeentnahme in einem vorangehenden Teilstrang ist daher real kaum eindeutig messbar und von natürlichen Einflüssen unterscheidbar, weil die witterungsbedingten Schwankungen in der Regel größer sind.

Die Analyse der Auswirkungen tieferer Abwassertemperaturen für stationäre Bedingungen hat ergeben, dass eine permanente Absenkung der Temperatur um 1° C eine Reduktion der Sicherheit gegen den Verlust der Nitrifikation (Auswaschen) und der maximalen Wachstumsgeschwindigkeit um 10 % zur Folge hat. Wenn der Sicherheitsfaktor auf dem ursprünglichen Wert gehalten werden soll, muss das aerobe Schlammalter um 10 % erhöht werden. Dies kann mit einem um 10 % größeren Belebungsbecken erreicht werden oder, wenn die Kläranlage sowohl nitrifiziert als auch denitrifiziert, durch eine Vergrößerung des aeroben Volumenanteils auf Kosten des anoxischen. In letzterem Fall wird jedoch der totale Wirkungsgrad der Stickstoffelimination herabgesetzt.

---

[138] Vgl. MUNLV (1999).

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

Aufgrund der Forschungsergebnisse wurden Grenzkriterien für die Wärmenutzung betreffend die Sicherstellung von Betrieb und Reinigungskapazität einer nachgeschalteten Kläranlage festgelegt: Ist die Temperatur im Kläranlagen-Zulauf inkl. Wärmeentnahme ≥ 10°C (Dimensionierungstemperatur nach ATV) und die Abkühlung ≤ 0.5 K, ist die Wärmeentnahme ohne weitere Untersuchungen zulässig.

Eine einfache Methode zur Berechnung der Abkühlung im Kläranlagen-Zulauf wird aufgezeigt. Die nachfolgende Tabelle zeigt als Übersicht nötige Durchflussmengen bei verschiedenen Wärmeentnahmen, damit die Abkühlung schon im Teilstrang mit Wärmeentnahme < 0,5 K ist. Damit ist die Abkühlung im Kläranlagen-Zulauf mit Sicherheit auch < 0,5 K.

Mindestdurchflussmengen bei verschiedenen Wärmeentnahmen, damit ΔT ≤ 0,5 K

Wärmeentnahme [kW]		Durchflussmenge [l/s]
100	≥	48
200	≥	95
400	≥	191
600	≥	286
800	≥	382

Darstellung: Ryser Ingenieure AG

Falls die Bedingung T ≥ 10 °C und ΔT ≤ 0,5 K im Kläranlagen-Zulauf nicht erfüllt ist, muss durch Abwasserfachleute eine Überprüfung der Auslegung der Kläranlage und evtl. eine entsprechende Limitierung der Wärmeentnahme erfolgen. Durch die Simulation mit einem kalibrierten dynamischen Modell und gemessenen Tagesgängen kann eine quantitative Beziehung zwischen der Abwassertemperatur in der Kläranlage und der NH_4-Ablaufkonzentration hergestellt werden. In Kombination mit gemessenen Ablaufkonzentrationen können die Auswirkungen einer Wärmeentnahme auf die Nitrifikation in einer bestehenden Kläranlage mit einem mehrstufigen Vorgehen durch Abwasserfachleute abgeschätzt werden.

Die Auswirkungen einer Temperaturabsenkung im Kläranlagen-Zulauf (z.B. durch Wärmeentnahme) sind umso unbedenklicher, je größer die Dimensionierungsreserve der Kläranlage ist. Bei einer großzügig dimensionierten mittleren Kläranlage ist eine Temperaturabnahme von bis zu 1 K im Kläranlagen-Zulauf kein Problem. Da die Rahmenbedingungen aber auf jeder Kläranlage sehr unterschiedlich sind (Abwasserzusammensetzung, Betriebsweise, Beckengrößen, mögliche Schlammalter, Einleitbedingungen/Grenzwerte etc.) muss jede Anlage im Bedarfsfall (s.o.: Grenzkriterium a gem. Kapitel 4.2.1.5.4 nicht erfüllt → Kriterium b kommt zum Tragen) separat betrachtet werden.

Durch die bivalente Auslegung von Abwasserwärmenutzungsanlagen mit einem Heizkessel zur Abdeckung von Spitzenlasten (häufigster Anwendungsfall in der Praxis) kann die Wärmepumpe bzw. die Wärmeentnahme im Kanal bei Bedarf - beispielsweise wenn die Temperatur im Kläranlagenzulauf einen vorgegebenen Grenzwert für die Sicherstellung der genügenden Reinigungsleistung der Kläranlage unterschreitet - abgeschaltet werden (dies bedingt eine dauernde Überprüfung der Kläranlagenzulauftemperatur im Winter). Der Energieverbrauch auf einer Kläranlage sinkt bei einer Abkühlung der Abwassertemperatur und er steigt bei einer Erwärmung.

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

4.2.2 Ökonomische Anforderungen

4.2.2.1 Obligatorisch: Kostenneutralität

Die Mindestanforderung der NB lautet aus ökonomischer Sicht Kostenneutralität, d. h. die im Zuge des Einbaus und Betriebs von Wärmetauschern bei NB auftretenden zusätzlichen Kosten und Risiken müssen aus dem sich insgesamt ergebenden Kooperationsgewinn kompensiert werden. Wie bereits im Rahmen der spieltheoretischen Ausführung dargestellt, wird das Zustandekommen der kooperativen Lösung scheitern, wenn nicht mindestens eine Kompensation in Höhe der Aufwendungen der NB erfolgt. Erst wenn die im Zusammenhang mit Einbau, Betrieb und Entsorgung von Wärmetauschern anfallenden Kosten vollständig kompensiert werden, ist ein NB aus ökonomischer Sicht indifferent zwischen der kooperativen und nichtkooperativen Strategie.

Die ökonomische Forderung der NB hinsichtlich der Kostenneutralität des Einbaus und Betriebs von Wärmetauschern in die Kanalisation steht in Einklang mit dem Verursacherprinzip. Treten infolge der Wärmerückgewinnung zusätzliche Aufwendungen auf, die bei ausschließlicher Nutzung der Kanalisation zum Zweck der Siedlungsentwässerung nicht anfallen würden, dürfen diese nach dem Verursacherprinzip nicht durch die Abwassergebühren finanziert werden. Im Fall externer Kosten[139] würde die Nutzung der Abwasserwärme durch die Abwassergebühren subventioniert, wodurch Fehlanreize in Richtung auf die Verwendung der Wärmerückgewinnung in Abwasserkanalisationen erzeugt würden. Die Abwassergebührenzahler würden aufgrund der nicht verursachungsgerechten Zuordnung der Kosten negative externe Effekte empfangen und gegebenenfalls Widerstand formieren. Des Weiteren dürfen weder im Kläranlagenbetrieb externe Kosten auftreten, wenn bspw. infolge der Wärmeentnahme die Reinigungsleistung nur mit erhöhtem Aufwand erbracht werden kann, noch dürfen die Anwohner am Ort des Wärmetauschs in irgendeiner Form in Mitleidenschaft gezogen werden, bspw. durch Geruchsbelästigung infolge erhöhter Sauerstoffzehrung bei inversem AWN-Betrieb im Sommer.

Vor dem Hintergrund der Mindestanforderung „Kostenneutralität“ beschäftigt sich die Studie mit der Frage, welche Aufwendungen bzw. Risiken auf die Netzbetreiber im Zusammenhang mit dem Einbau und dem Betrieb von Wärmetauschern in die Kanalisation zukommen können und wie diese bei der Ermittlung des Kompensationsbetrags zur Herstellung der geforderten Kostenneutralität zu berücksichtigen sind.

Zur Umsetzung dieser ökonomischen Mindestforderung stellt sich an die Netzbetreiber die anspruchsvolle Aufgabe, die wirtschaftlichen Auswirkungen einer Kooperation zur Nutzung der Abwasserwärme vollständig zu erfassen und zu bewerten. Dieser Aufgabe ist deshalb besonders anspruchsvoll,

---

[139] Externe Kosten sind Kosten, die infolge von Produktions- und Konsumaktivitäten bei unbeteiligten Dritten auftreten, ohne dass eine Kompensation durch den Verursacher stattfindet. Daraus resultieren Fehlallokationen: Da die externen Kosten in den Kostenrechnungen der Verursacher keine Berücksichtigung finden, liegen die schädigenden Handlungen auf zu hohem Niveau. Eine Internalisierung (Rückführung der externen Kosten in die Kostenrechnung des Verursachers) der externen Kosten wirkt sich dämpfend auf das verursachende Aktivitätsniveau aus und befreit die unbeteiligten Dritten von fremdverursachten Kosten. Zum Begriff der externen Kosten siehe Woll, A. (1991), S. 189 ff. und S. 420.

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

- weil entsprechend der langfristigen Nutzungsdauer der Wärmetauscher lange Zeithorizonte betrachtet werden,
- weil unterschiedliche Kostenarten zu berücksichtigen sind,[140]
- weil zudem Risiken zu berücksichtigen sind.

Die wirtschaftlichen Konsequenzen der Nutzung von Abwasserkanälen zur Wärmerückgewinnung differieren in Abhängigkeit von den in einer konkreten Situation vorfindbaren Bedingungen. Somit kann eine allgemeinverbindliche Aussage zu der konkreten Höhe der Kosten nicht getroffen werden. Vielmehr geht es in der vorliegenden Untersuchung um die Darstellung relevanter Kostenarten und Risiken. Diese mögen zwar als Ausgangspunkt für eine erste allgemeine Orientierung tauglich sein, für die konkrete Ermittlung des zur Herstellung von Kostenneutralität zu kompensierenden Aufwandes sind diese indes nicht heranzuziehen.

In der hier zugrunde gelegten Konstellation, in der die EVU die Vermarktung der in der Kanalisation gewonnenen Wärmeenergie übernehmen,[141] ist es nicht die Aufgabe der NB, die Wirtschaftlichkeit der Wärmeversorgung mittels AWN-Anlagen zu ermitteln. Vielmehr müssen die NB ermitteln, welche zusätzlichen Kosten wann und in welcher Höhe anfallen.[142] Die Problematik der Kostenabschätzung besteht nun darin, dass Art und Höhe der auftretenden Kosten von Fall zu Fall in Abhängigkeit von den Randbedingungen differieren. Auch hinsichtlich Art, Umfang und Versicherbarkeit etwaiger Risiken sind der Plan- und Kalkulierbarkeit Grenzen gesetzt. Erst zu einem späteren Zeitpunkt können infolge der Einbindung des sich im Zeitablauf kumulierenden Erfahrungswissens genauere Aussagen zu den Kosten getroffen werden.

Da es dennoch bedeutsam ist, den Netzbetreibern Anhaltspunkte für die Ermittlung und Beurteilung der anfallenden Kosten zu geben, erfolgt im Rahmen dieser Untersuchung eine Skizzierung der relevanten Kosten und Risiken. Da die Höhe der Kosten in Abhängigkeit von den Randbedingungen recht unterschiedlich ausfallen kann, besteht der Beitrag dieser Studie in der Erstellung und Strukturierung einer Übersicht derjenigen Kostenarten, die im Zuge der Kooperationslösung anfallen können und somit zur Gewährleistung der Kostenneutralität zu kompensieren sind. Um diese Darstellung nicht ausschließlich auf ein theoretisches Gedankengerüst zu stellen, ist ein Erfahrungsbericht der Technischen Betriebe Leverkusen eingearbeitet worden.[143] Berücksichtigung fanden die bislang aufgetretenen, AWN-bedingten Kosten, die im Zuge der Planung, des Einbaus und des bisherigen Betriebs angefallen sind.[144] Die auf dieser Basis entwickelte Übersicht kann als grundlegendes Gerüst für die Kalkulation der AWN-bedingten Kosten dienen.

---

140 Bspw. sind nach der betrieblichen Funktion Beschaffungs-, Fertigungs- und Verwaltungskosten betroffen, es sind Personalkosten in Abhängigkeit von der Höhe der Lohnkosten und der Kapazitäten zu berücksichtigen, es sind Abschreibungen in Abhängigkeit von der Nutzungsdauer und Abschreibungsmethode zu ermitteln, es sind Gemeinkostenzuschläge vorzunehmen usw.

141 Zu den Anforderungen der EVU siehe Kapitel 4.3, S 165 ff.

142 Zu Hinweisen über die Aufgaben der Kommunen vgl. Energieagentur NRW (2001), S. 10.

143 Der Erfahrungsbericht basiert auf Gesprächen, die das IKT – Institut für Unterirdisch Infrastruktur mit Herrn Dipl.-Ing. Wolfgang Herwig, leitender Ingenieur der Technischen Betriebe Leverkusen, geführt hat.

144 Dabei ist zu berücksichtigen, dass infolge von Lerneffekten in Zukunft eine rationellere Umsetzung der Arbeitsschritte zu erwarten ist.

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

Im Zusammenhang mit der Nutzung der Abwasserwärme kommen auf die Netzbetreiber unterschiedliche Kosten zu. Diese Kosten können in unterschiedlichen Phasen der Projektrealisierung auftreten. Im Einzelnen sind nachfolgende Phasen anzuführen:

(a) Vorbereitung

(b) Risikomanagement

(c) Baudurchführung

(d) Betriebsphase

(e) Entsorgung

(a) Vorbereitung

Ein beachtlicher Teil der Kosten, der auf die NB zukommt, entsteht bereits in der Phase der Vorbereitung. Hier sind zunächst Informationskosten aufzuwenden, um Wissen über die zusätzlichen Nutzungsmöglichkeiten der Kanalisation zu gewinnen, bspw. durch Teilnahme an Veranstaltungen, aber auch durch Literaturstudium und Erfahrungsaustausche. Sofern der Einbau von Wärmetauschern in Betracht gezogen wird, sind die Einsatzmöglichkeiten im vorhandenen Kanalnetz zu ermitteln und zu bewerten, d.h. es ist im Rahmen einer Vorkalkulation eine überschlägige Ermittlung der Wirtschaftlichkeit vorzunehmen. Lassen sich geeignete Einsatzmöglichkeiten eruieren, setzt ein intensiver Planungs- und Verhandlungsprozess ein. Damit treten Planungs- und Verhandlungskosten auf, die einen beachtlichen Einsatz erfordern, da zahlreiche anspruchsvolle Teilaufgaben zu bewältigen sind. Diese Teilaufgaben umfassen bspw.

- im Planungsbereich
  - interne Kommunikation
  - Strukturierung der Teilaufgaben / Arbeitsschritte
  - Zuordnung der Kompetenzen und Pflichten
  - Terminplanung
  - Kapazitätsplanung
  - Technische Vorplanung bzw. Planungsbegleitung
  - Planung der Qualitätssicherung und Kriterien für die Abnahme der Baumaßnahme
  - Abschätzung der Risiken
  - mitlaufende Kalkulation der Wirtschaftlichkeit

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

- im Verhandlungsbereich
  - Suche nach einem Vertragspartner (Energievermarkter/Contractor)
  - Vertragsanbahnung (Kommunikation, Datenbeschaffung, juristische Begleitung)
  - Vertragsverhandlungen
  - Vertragsabschluss

Die im Rahmen der Bewältigung dieser Teilaufgaben auftretenden Kosten spielen für NB durchaus eine relevante Rolle, wobei die o.a. Teilaufgaben größtenteils nur iterativ zu bewältigen sind.

Beispielhaft wird auf den Aufwand im Rahmen der internen Kommunikation verwiesen: Es sind sowohl Mitarbeiter zu motivieren, für die das Vorhaben zunächst ein Mehr an Arbeit bringt, es ist die Akzeptanz übergeordneter Hierarchieebenen zu gewinnen, für die die Risiken im Vordergrund stehen, und es ist die Zustimmung der durch heterogene Interessenlagen gekennzeichneten politischen Ausschüsse zu erzielen. Leicht können unerwartete K.O.-Kriterien auftreten, wie z.B. die Frage, ob die Satzung des NB die Nutzung des Kanals zur Wärmerückgewinnung überhaupt zulässt sowie ob und ggfs. welche Satzungsänderungen erforderlich und durchsetzbar sind. Die besondere Relevanz des in der Vorbereitungsphase anfallenden Aufwandes dokumentiert sich auch daran, dass in Leverkusen die Vorbereitung mehr Zeit in Anspruch genommen hat als der eigentliche Bau.

Somit kann zusammenfassend das Fazit gezogen werden, dass auf Seiten der NB bereits in der Vorbereitungsphase der Wärmerückgewinnung durch Wärmetauscher in Abwasserkanalisationen beachtliche Kapazitäten qualifizierten Personals erforderlich sind[145] und beachtliche Kosten anfallen. Diese sind zudem mit dem Risiko behaftet, im Fall der mangelnden Realisierung der Maßnahme nicht kompensiert zu werden.

(b) Risikomanagement

Im Umgang mit Risiken ist ein weiterer kostenintensiver Bereich zu sehen, der einer sorgfältigen Behandlung bedarf. Risiken können zwar aufgrund der Langfristigkeit und Komplexität der Maßnahme nicht vollständig vermieden, jedoch reduziert werden. Dazu ist es erforderlich, dass in einem ersten Schritt eine sorgfältige Abschätzung möglicher Risiken vorgenommen wird. Wie die nachfolgende und nicht abschließende Übersicht zeigt, können diese recht vielfältiger Natur sein:

- Es treten möglicherweise erhöhte Reinigungsbedarfe auf.
- Unter Umständen mögen sich veränderte Ablagerungsmuster infolge der Einbauten herausbilden.
- Der Betrieb von Wärmetauschern ist mit Nutzungseinschränkungen verbunden, wenn keine Verträglichkeit mit weiteren alternativen Nutzungen der Kanalisation gegeben ist.

[145] Zudem werden u.U. Ingenieurbüros zur Bewältigung spezieller Aufgaben hinzugezogen.

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

- Es bestehen verschiedene Vertragsrisiken, bspw. können Umstände eintreten, die mit einem intensiven Nachverhandlungsbedarf einhergehen, oder Vertragsverletzungen lösen kosten- und zeitintensive Verfahren aus.
- Darüber hinaus können Sanierungsrisiken auftreten.
- Im Fall der Insolvenz des Vertragspartners treten Risiken für den NB ein.
- Auf den NB können ferner Regressansprüche zukommen, wenn der Betrieb der Wärmetauscher im Kanal mit negativen externen Effekten infolge der Veränderung der Abwassertemperatur verbunden ist, bspw. in Form von Geruchsbelästigung bei Wärmeabgabe in den Kanal oder bei Problemen im Kläranlagenbetrieb.
- Weitere Regressansprüche können den NB treffen, wenn der Kanal nicht eine ausreichende Menge Abwasser führt.
- Bei nachträglichem Einbau von WT in bestehende Kanalisationen ist zudem das Überlastungsproblem zu berücksichtigen. Wenn bspw. die Aufnahmekapazität eines Mischwasserkanals nach Einbau eines Wärmetauschers aufgrund der damit verbundenen Querschnittsverengung des Kanals gerade nicht mehr ausreicht, um ein später errichtetes Baugebiet anzuschließen, müssen Regenrückhaltebecken errichtet werden.
- Risiken bei Vertragsende bestehen hinsichtlich der weiteren Nutzung der Anlage bzw. der Demontage und Entsorgung sowie der anschließenden Instandsetzung des Kanals.

Wie soll nun ein NB mit derartigen Risiken aus ökonomischer Perspektive umgehen? Gemäß der Mindestforderung der Kostenneutralität dürfen sich Risiken nicht zu Lasten des Entwässerungsbetriebs auswirken. Folglich sind Wege der Risikoabwehr zu beschreiten, d.h. die Risiken sind zu minimieren und abzuwälzen. Da eine Versicherbarkeit der o.g. Risiken in den wesentlichen Punkte nicht gegeben ist, erfordert die Minimierung der Risiken eine sorgfältige Planung der Qualitätssicherung und Baudurchführung. Ferner sind Risiken, die im Zuge des Einbaus und Betriebs auftreten, im Rahmen der Verträge derart zu regeln, dass diese auf die EVU abgewälzt sowie Kompensationen und Handlungsermächtigungen vereinbart werden. Wie derartige Vereinbarungen im Einzelfall aussehen können, ist im Rahmen eines Praxisbeispiels dargestellt.[146]

Insgesamt ist festzustellen, dass nicht sämtliche Risiken vollständig bewältigt werden können. Zur Minimierung der Risiken sind Eventualitäten möglichst umfassend vertraglich zu regeln. Dennoch verbleibt ein Residualrisiko beim NB, wenn bspw. Kausalitäten nicht zweifelsfrei nachzuweisen sind. Auch Pfadabhängigkeiten, etwa infolge des Ausschlusses alternativer Nutzungen des Kanals infolge des Einbaus von WT, lassen sich nicht ausschließen. Ein wesentliches und nicht auszuschließendes Risiko besteht für den NB überdies darin, dass keine Kompensation des in der Vorbereitungsphase anfallenden erheblichen Aufwandes erfolgt, falls das Projekt nicht realisiert wird.

(c) Bauphase

Lassen sich die o.g. Aspekte einvernehmlich mit einem EVU im Rahmen eines Vertrages fixieren, ist der Einbau der Wärmetauscher in Angriff zu nehmen. Auch in dieser Phase sind weitere Aufwendungen zu bewältigen. Für den Einbau von Wärme-

[146] Siehe unten, Kapitel 4.2.3.3, S. 163.

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

tauschern existiert keine Lösung „von der Stange“. Vielmehr ist bei der Baudurchführung die konkrete Ausführung der AWN-Systeme durch den NB zu definieren. Um die risikominimierenden Qualitätsanforderungen umsetzen zu können, ist im Rahmen der Materialbeschaffung ein intensiver Abstimmungsbedarf mit verschiedenen Lieferanten notwendig. Im Fall des Einbaus in bestehende Kanalisationen sind zudem entsprechend große Schächte zu errichten, die das Einführen der WT-Elemente erlauben.

Ferner erfordert die Baudurchführung eine engmaschige Überwachung der Bauausführung sowie Qualitäts- und Termineinhaltung vor Ort.

Erfolgt der Einbau des Wärmetauschers in einen bestehenden Kanal, sind weitere Kosten und Risiken im Zusammenhang mit der Aufrechterhaltung der Abwasserableitung[147] während der Bauphase zu beachten. Kann die Wärmenutzungsanlage dagegen in ein Neubauprojekt integriert werden, fallen diese Kosten nicht an. Hingegen sind in jedem Fall die infolge der Baustellenverlängerung anfallenden zusätzlichen Baustellen- und Verkehrssicherungskosten dem AWN-Projekt als Kostenträger anzulasten. Sofern also die Baudurchführung einen Nachbesserungsbedarf nach sich zieht, ist zu berücksichtigen, dass sich Verzögerungen kostenerhöhend auswirken. Ebenso ist in Betracht zu ziehen, dass infolge der verzögerten oder eingeschränkten Nutzungsmöglichkeit der mit Wärme zu beliefernden Liegenschaft regresspflichtige Einnahmeausfälle auftreten können.

(d) Betriebsphase

Im Anschluss an die Inspektion und Abnahme der Baumaßnahme können die Kanalisation und die AWN-Anlage in Betrieb genommen werden. Während der Betriebsphase fallen v.a. Kapitalkosten an (Zinsen und Abschreibungen). Diesen stehen allerdings Erträge aus der Verpachtung der Anlage gegenüber. Sofern der Mietzins für die Dauer der Verpachtung bei Vertragsabschluss entrichtet wurde, besteht für den NB diesbezüglich kein Risiko während der Betriebsphase. Hinsichtlich der Inspektions- und Reinigungsbedarfe ist festzustellen, dass diese vom NB z.B. nach den Vorgaben der SüwV Kan zu erfüllen sind. Weitergehende Bedarfe sind vom EVU anzumelden, und die Aufwendungen sind dem NB zu erstatten. Selbiges trifft für eventuell auftretende weitere Sonderkosten zu. Des Weiteren können beim NB Aufwendungen für die Erfolgskontrolle im Rahmen des laufenden Betriebs auftreten. In Leverkusen wird eine derartige Auswertung erfolgen, um die Informationsbasis für etwaige neue Projekte zu verbessern und Informationen über den Kanal zu erhalten.[148] Seitens des NB werden Daten der Abwassermengenmessungen, der Temperatur des Abwassers vor und nach dem Wärmetauscher, der Vor- und Rücklauftemperatur des Zwischenmediums, des Betriebes der Wärmepumpe und der an den Verbraucher abgegebenen Wärmemenge ausgewertet.

Die über die Kapitalkosten hinausgehenden Aufwendungen im Rahmen des laufenden Betriebes werden seitens der TBL (Technische Betriebe Leverkusen) als weniger gravierend eingestuft.

---

147 Die Abwasserableitung während der Bauphase kann bspw. durch Überpumpen durch über Tage verlaufende Rohrleitungen bewerkstelligt werden.

148 Seitens der TBL werden Daten der Abwassermengenmessungen, der Temperatur des Abwassers vor und nach dem Wärmetauscher, der Vor- und Rücklauftemperatur des Zwischenmediums, des Betriebes der Wärmepumpe und der an den Verbraucher abgegebenen Wärmemenge ausgewertet.

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

(e) Entsorgung

Im Anschluss an die Nutzungsperiode können möglicherweise Aufwendungen für den Ausbau und die Entsorgung der WT auftreten. Sofern der WT im Kanal verbleibt, kann infolge der langjährigen Beanspruchung ein Sanierungsbedarf auftreten, falls Korrosionsschäden entstanden sind. Der damit verbundene Aufwand sollte bereits in der Planungs- und Verhandlungsphase berücksichtigt werden, so dass eine Regelung des Umgangs mit derartigen Kosten in den Vertrag mit einem EVU aufgenommen wird.

In der nachfolgenden Übersicht sind nochmals die in den verschiedenen Phasen beim NB anfallenden internen Kosten,[149] die im Wesentlichen Personalkosten sind, zusammengestellt und hinsichtlich ihrer Relevanz als hoch oder gering eingeschätzt. Wie die Übersicht verdeutlicht, treten wesentliche Kostenbestandteile bereits in der Phase der Vorbereitung und des Risikomanagements sowie der Baudurchführung auf. Da bereits zu einem frühen Zeitpunkt wesentliche Kostenanteile anfallen und diese im Falle der Nicht-Realisierung der AWN-Anlage nicht kompensiert werden, besteht ein erhebliches Risiko für die NB im Scheitern der Vertragsverhandlungen.

Interne Kosten des Netzbetreibers		
Phase	**Kosten**	**Relevanz**
Vorbereitung und Risikomanagement	Informationskosten Planungskosten Verhandlungskosten	hoch hoch hoch
Baudurchführung	Materialabstimmung Einbauorganisation Qualitätssicherung	mittel mittel hoch
Betriebsphase	Kapitalkosten Inspektion, Reinigung, Sonstiges Erfolgskontrolle	sehr hoch gering gering
Entsorgung	Ausbau und Entsorgung Sanierung	gering gering
IKT – eigene Darstellung.		

Die Technischen Betriebe Leverkusen haben bei dieser Pilotanlage hinsichtlich der internen Vollkosten, die im Zuge der Planung, Umsetzung und Inbetriebnahme der AWN-Anlage intern entstanden sind, überschlägig einen Betrag in Höhe von 60.000 bis 80.000 € ermittelt. Bei Nachfolgemaßnahmen würden jedoch bei einer vergleichbaren Maßnahme deutlich geringere Kosten anfallen. Infolge von Lerneffekten und der bereits geleisteten Entwicklungsarbeiten würden sich die bei einer Folgemaßnahme intern beim NB anfallenden Kosten um etwa ein Drittel reduzieren lassen.[150] Mindestens in Höhe dieser Auf-

[149] Es handelt sich hier um interne Vollkosten, d.h. die beim NB auftretenden Einzelkosten zzgl. der anteiligen Gemeinkosten. Gewinnanteile sind nicht einbezogen.

[150] Infolge des sukzessiv kumulierenden Erfahrungswissens ist im Zeitablauf mit einer weiteren Kostenerosion zu rechnen.

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

wendungen muss seitens des EVU eine Kompensation an einen NB geleistet werden, um die spieltheoretisch abgeleitete Mindestbedingung der Kostenneutralität als Kooperationsvoraussetzung zu erfüllen. Darüber hinaus bedarf es einer vertraglichen Regelung, die im nachfolgenden Kapitel einer näheren Betrachtung unterzogen wird.

4.2.2.2 Optional: Monetärer und nicht-monetärer Nutzen

Wie zuvor gezeigt werden konnte, ist die Entscheidung für ein Engagement im Bereich der Wärmerückgewinnung in der Abwasserkanalisation für einen NB mit einem Aufwand an Zeit und Geld sowie mit Risiken verbunden, die durch das EVU zu kompensieren sind. Kann der Netzbetreiber über diese Mindestforderung hinaus monetäre Vorteile realisieren, so wirkt sich das Engagement für den NB als wirtschaftlich vorteilhaft aus. Außerdem besteht im Einzelfall zumindest theoretisch die Möglichkeit, dass infolge des Engagements eine bessere Auslastung der beim NB vorhandenen Kapazitäten zu verzeichnen sein kann. Folglich könnte ein Teil der beim NB anfallenden Fixkosten dem AWN-Bereich angelastet werden, was eine Entlastung des Abwasserbereichs und der Gebührenzahler nach sich ziehen würde.

Des Weiteren kann aus dem AWN-Engagement für den NB auch ein nicht-monetärer Nutzen resultieren, wenn das Engagement des NB in der Öffentlichkeit etwa als innovativ und/oder umweltfreundlich wahrgenommen wird. Mit einem derartigen positiven Image-Effekt wird nicht nur ein Selbstzweck verfolgt, das positive Image kann vielmehr als Marketing-Instrument, bspw. auf Beschaffungsmärkten eingesetzt werden, was insbesondere bei der Beschaffung von Arbeitskräften ein wichtiges Plus darstellt.[151] Zudem ist ein positives Image hilfreich, wenn für Akzeptanz oder sogar Toleranz für weniger populäre Maßnahmen zu werben ist. Somit können sich letztlich auch die nicht-monetären Vorteile in positiven monetären Effekten niederschlagen.

4.2.3 Vertragsrechtliche Anforderungen

4.2.3.1 Vertragsform

Bei der Darstellung der vertragsrechtlichen Anforderungen stehen im Folgenden die privatrechtlichen Beziehungen zwischen den Akteuren NB und EVU im Vordergrund. Wie bereits zuvor dargestellt, können sich Akteure in Verhandlungsspielen opportunistisch verhalten und durch den Wechsel zu nicht-kooperativen Strategien negative wirtschaftliche Implikationen für andere Akteure auslösen. Somit besteht zur Aufrechterhaltung der freiwilligen Kooperation der Anspruch, dass sich die Akteure verbindlich auf die kooperative Strategie festlegen. Die erforderliche Verbindlichkeit der freiwilligen Kooperation kann durch einen Vertrag, in dem sowohl die Leistungsbeziehungen und –verpflichtungen zwischen den Akteuren geregelt als auch die Sanktionen im Fall defektiven Verhaltens festgeschrieben sind, hergestellt werden. Insgesamt ist deutlich herauszustellen, dass die Kooperation von NB und EVU erst durch einen bindenden Vertrag gegen opportunistisches Verhalten robust wird.[152]

Im Folgenden geht es nun um die Frage, welche Vertragsform gewählt werden sollte, um die Leistungsbeziehungen zwischen NB und EVU zu regeln. Zu diesem Zweck erfolgt ein kurzer Ausflug in die auf Ronald H. Coase zurückgehende und von

---

[151] Zum Zusammenhang zwischen Unternehmens-Image und Beschaffungsmarketing siehe bspw. Teufer, S. (1999).

[152] Zur Verbindlichkeit siehe oben, Spieltheoretische Grundlagen, Kapitel 3.2.3.1, S. 62 ff.

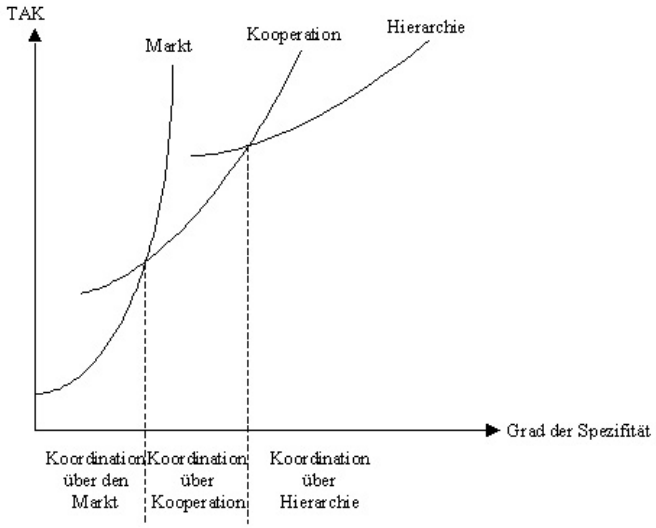
© 2005 All rights reserved by GEK mbH

Williamson weiterentwickelte Transaktionskostentheorie[153], die sich als Bestandteil der Neuen Institutionenökonomie mit der Fragestellung der Herausbildung und Existenz von Kooperationen auseinandersetzt.

In der Ökonomie wird als Transaktion der dem Leistungstausch vorausgehende Prozess der Klärung und Vereinbarung des Leistungstausches sowie der Leistungsaustausch selbst verstanden. Ergebnis der Transaktion ist u.a. ein Austausch von Verfügungs- und Eigentumsrechten (Property Rights) zwischen den Wirtschaftssubjekten. Im Fall der Wärmerückgewinnung in Abwasserkanalisationen geht es um das Recht, WT in Abwasserkanalisationen einzubringen und die Abwasserwärme zu nutzen.[154]

Die Transaktionstheorie betont, dass der Abschluss von Verträgen mit Aufwand verbunden ist: Es fallen Anbahnungskosten (Informationskosten), Vereinbarungs- und Abwicklungskosten (Kommunikationskosten), Kontrollkosten sowie Anpassungskosten an. Bei unterschiedlichen Transaktionen kommen in Abhängigkeit von den Transaktionseigenschaften diese Aufwendungen in unterschiedlichem Maße zur Ausprägung. Zentrale Eigenschaften sind Spezifität und Häufigkeit einer Transaktion. Eine spezifische Transaktion liegt vor, wenn die Wertdifferenz zwischen der geplanten und der zweitbesten Verwendung einer Ressource hoch ausfällt.[155] Folglich nehmen bei steigender Spezifität der Transaktion die damit verbundenen Transaktionskosten zu. Bei zunehmender Häufigkeit einer Transaktion sind hingegen sinkende Transaktionskosten festzustellen.[156] Wie die nachfolgende Abbildung verdeutlicht, weisen alternative Koordinationsformen in Abhängigkeit von der Spezifität einer Transaktion unterschiedliche Transaktionskosten auf:

Transaktionskosten in Abhängigkeit von Spezifität und Koordinationsform



Eigene Darstellung in Anlehnung an: Williamson, O. (1991): S. 285.

153 Coase, R.H. (1937), S. 386 ff. und Williamson, O. (1991), S. 269 ff

154 Vgl. Fontanari, M. (1996), S. 97.

155 Mit anderen Worten ist eine Transaktion vollständig spezifisch, wenn sich die an sie gekoppelten Investitionen nicht in alternativen Transaktionen verwenden lassen. Ferner lassen sie sich auch nicht mehr rückgängig machen (sunk costs). Vgl. Jost (2001), S. 11.

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

Die Darstellung zeigt, dass

- bei geringer Spezifität die Koordinationsform „Markt“,
- bei mittlerer Spezifität ist die Koordinationsform „Kooperation“
- und bei hoher Spezifität die Kooperationsform „Hierarchie“

die geringsten Transaktionskosten aufweist.

Die Verläufe der spezifitätsabhängigen Transaktionskosten lassen somit insgesamt den Schluss zu, dass bei zunehmender Spezifität Koordinationsformen mit höherer vertikaler Integration vorteilhaft werden. Dieses lässt sich wie folgt begründen: Sofern die Koordination von komplexen Transaktionen mit hoher Spezifität innerhalb hierarchischer Strukturen erfolgt, lassen sich gegenüber alternativen Koordinationsformen Transaktionskosten einsparen, weil Anpassungen innerhalb einer Hierarchie ohne kosten- und zeitaufwendige Verhandlungen vorgenommen werden können. Andererseits fallen in Hierarchien Organisationskosten an, die bei geringerer Spezifität der Transaktion nicht durch Transaktionskosteneinsparungen kompensiert werden können.[157]

Bei zusätzlicher Betrachtung der Häufigkeit des Auftretens einer Transaktion lassen sich o.g. Koordinationsformen durch Aussagen zu geeigneten Vertragsformen ergänzen. Als grundlegende Vertragsvarianten sind klassische, neoklassische und relationale Verträge zu unterscheiden.

Klassische oder vollständige Verträge werden von autonomen Vertragsparteien auf Märkten abgeschlossen. Diese Koordinationsform ist dadurch gekennzeichnet, dass sämtliche Transaktionsparameter – und damit Vertragsinhalte – überschaubar sind. Klassische Verträge kommen somit zum Einsatz, wenn die Transaktionseigenschaften unspezifisch sind, und zwar unabhängig von der Häufigkeit der Transaktionsausübung. Zudem werden klassische Verträge oftmals zeitpunktbezogen abgeschlossen. Im Falle von Unstimmigkeiten sind letztendlich externe Gerichte zu bemühen.[158] Als Beispiel für klassische Verträge lassen sich der Kauf einer Zeitung (geringe Spezifität, hohe Häufigkeit) ebenso anführen wie der Kauf eines Pkw (geringe Spezifität, geringe Häufigkeit).

Neoklassische oder unvollständige Verträge werden über Zeiträume abgeschlossen und kommen zur Anwendung, wenn nicht alle Ereignisse im Vorfeld absehbar sind und somit nicht vollständig geregelt werden können.[159] Die Vertragsparteien sind autonom, gehen jedoch Kooperationen ein und sind somit in gewisser Weise voneinander abhängig. Im Falle unvorhergesehener Störungen oder des Eintritts vertraglich definierter Ereignisse treten die Vertragsparteien in Nachverhandlungen, um eine für beide Seiten akzeptable Lösung herauszuarbeiten und den Vertrag anzupassen. Dieses kann unter Hinzunahme eines sach-

---

156 Vgl. Picot, A.; Dietl, H.; Franck, E. (1999), S. 69 f.

157 Vgl. Erlei, M., Jost, P.-J. (2001), S. 49.

158 Vgl. Williamson, O. (1991), S. 271.

159 Die Vertragspartner erkennen, dass infolge der Unsicherheit des Eintritts künftiger Ereignisse eine vollständige Regelung nicht möglich oder nicht wirtschaftlich ist. Vgl. Uhde, A. (2004), S. 24.

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

kundigen Schlichters geschehen.[160] Liegen als Transaktionseigenschaften mittlere bis hohe Spezifität in Verbindung mit geringer Transaktionshäufigkeit vor, empfiehlt sich, Kooperationen auf der Grundlage unvollständiger Verträge durchzuführen. Solange eine geringe Transaktionshäufigkeit zu konstatieren ist, sind stärker vertikal integrierende Vertragsformen nicht indiziert. Als Beispiel für einen unvollständigen Vertrag kann auf einen langfristigen Darlehensvertrag verwiesen werden, bei dem im Zeitablauf eine Anpassung der Kreditbedingungen (Zinshöhe, Tilgung, Sicherheiten) vorgenommen wird.

Relationale Verträge finden bei komplexen Transaktionen mit mittlerer bis hoher Spezifität in Verbindung mit hoher Transaktionshäufigkeit Anwendung. Bei derartigen Transaktionseigenschaften sind hierarchische Koordinationsformen zu erwarten. Relationale Verträge sind korrespondierend zur Transaktionshäufigkeit langfristig angelegt. Sie beinhalten allerdings nur ein grobes Gerüst von Handlungsverpflichtungen, die über die Laufzeit des relationalen Vertrags durch hierarchisch Vorgaben zu konkretisieren sind.[161] Arbeitsverträge lassen sich als Beispiel für relationale Verträge anführen. Der Anreiz zur Subordination in eine Unternehmenshierarchie besteht in der Vermeidung von Einkommensunsicherheiten. Unternehmen profitieren hingegen von der Flexibilität, die sich transaktionskostenmindernd auswirkt.

Die Transaktionseigenschaften bei Nutzung der Abwasserwärme lassen sich dahingehend beschreiben, dass es sich um ein langfristiges sowie komplexes und mit hohen spezifischen Investitionen verknüpftes Engagement handelt. Zudem ist die Transaktionshäufigkeit zumindest zum gegenwärtigen Zeitpunkt als sehr gering einzustufen. Da die Vertragspartner nicht in der Lage sind, jeden erdenklichen Zustand der Zukunft zu prognostizieren, muss die ökonomische Empfehlung zur Minimierung der Transaktionskosten darin bestehen, einen neoklassischen, d.h. unvollständigen Vertrag abzuschließen, der in Abhängigkeit vom Eintritt oder Nichteintritt bestimmter Ereignisse Nachverhandlungen erforderlich macht.

Im Fall des hier betrachteten Koordinationsmilieus spielt jedoch für die Vertragsgestaltung weiterhin eine Rolle, dass die Transaktion nicht zuletzt aufgrund der Langfristigkeit durch Unsicherheit und hinsichtlich des Verhaltens der NB als öffentliche Unternehmen durch Risikoaversion gekennzeichnet ist. Somit erklärt sich der Anspruch der NB, Regelungstatbestände möglichst weitreichend zu definieren, um den Aufwand und etwaige Risiken, die sich infolge von Nachverhandlungen ergeben können, zu minimieren. Die eigentumsrechtliche und wirtschaftliche Ausgangslage erlaubt den NB, die gewünschten Regelungstatbestände durchzusetzen, während die EVU als Optionsempfänger auftreten. Beispielsweise sind die von einem EVU gewünschten Reinigungsleistungen diesem in Rechnung zu stellen. Die Höhe der Kosten darf jedoch nicht im Zeitablauf zum Gegenstand von Nachverhandlungen werden. Folglich weisen die hier betrachteten neoklassischen Verträge zahlreiche Spezifikationen auf, die sich erhöhend auf die Vertragsanbahnungskosten auswirken. Diese sind jedoch erforderlich, um die Risiken der Kooperation auf den unternehmerisch handelnden Kooperationspartner abzuwälzen. Diese Vorgehensweise findet letztendlich auch darin ihre Berechtigung, dass mit den Risiken auch die wirtschaftlichen Chancen aus der Vermarktung der Abwasserwärme an das einen wirtschaftlichen Geschäftsbetrieb betreibende EVU übergeht.

---

160 Vgl. Williamson, O. (1991), S. 271.

161 Vgl. Williamson, O. (1991), S. 274 f.

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

4.2.3.2 Vertragsstabilität

Sofern die ökonomischen Kooperationsanreize für NB und EVU hinreichend stark sind und die Leistungsbeziehungen im Rahmen eines zuvor beschriebenen Vertrages geregelt werden können, ist schließlich die Stabilität der Beziehung zu betrachten. Ein Vertrag ist stabil bzw. verbindlich, wenn die Akteure davon ausgehen können, dass die im Rahmen des Vertrages getroffenen Vereinbarungen eingehalten werden.[162] Da die Vertragspartner in einem Vertrag übereinstimmende Willenserklärungen abgeben und die Vertragsinhalte mit Hilfe von Gerichten formal durchsetzbar sind, kommt bereits der vertraglichen Regelung der Leistungsbeziehungen eine verhaltensstabilisierende Wirkung zu.[163] Dennoch kann nicht ausgeschlossen werden, dass bei Eintritt bestimmter Umweltzustände der Bruch des Vertrags bzw. der Kooperation für einen Akteur zu einer rationalen Handlungsoption wird. Wenn nämlich die zu erwartende Rechtsfolge aus dem Vertragsbruch für einen Defekteur vorteilhafter ist als die Fortführung der Kooperation, wird sich dieser für den Vertragsbruch entscheiden. Da sich derartige Entwicklungen wirtschaftlich nachteilig für den Kooperationspartner auswirken können, besteht die Notwendigkeit, abweichendes Verhalten ebenfalls zum Gegenstand der Vertragsverhandlungen zu machen.

Um den Regelungsbedarf auszuleuchten, ist zunächst zu betrachten, in welcher Form defektives Verhalten seitens des EVU überhaupt auftreten kann und welche wirtschaftlichen Implikationen daraus für den NB resultieren. Unterstellt sei, dass EVU und NB eine vertragliche Regelung zur Nutzung der Kanalisation zum Zweck der Wärmerückgewinnung mittels Wärmetauscher geschlossen haben, d.h. das EVU kann gegen Zahlung eines Mietzinses die Wärmetauscher nutzen und die gewonnene Wärmeenergie vermarkten. Der aus der Sicht eines NB bedeutendste Tatbestand eines Vertragsbruchs ist darin zu sehen, dass der Vertragspartner die Mietentgelte nicht zahlt und folglich keine Kompensation der Investitionsaufwendungen erfolgt. Zur Herstellung einer stabilen Kooperationsbeziehung bedarf es daher Mechanismen, welche die Akteure an die kooperative Strategie binden, bzw. im Fall der Defektion die wirtschaftlichen Nachteile des auf die Kooperation vertrauenden Akteurs kompensieren. Erst wenn keine Anreize mehr für Freifahrer- und Ausbeuter-Strategien bestehen, kommt es zu einem stabilen Vertrag und zu einer stabilen Kooperationsbeziehung.[164]

Wenn also eine Aufgabe der Akteure darin besteht, defektives Verhalten auszuschließen und den Vollzug des Vertrags zu gewährleisten, dann stellt sich die Frage, welche Mittel zu ergreifen sind, um Vertragsstabilität herzustellen. Grundsätzlich kann Verbindlichkeit durch vorbeugende Maßnahmen oder durch Androhung von Sanktionen erzielt werden.

Als vorbeugende Maßnahmen lassen sich Sicherheiten vereinbaren, die im Fall der Defektion durch den getäuschten Akteur verwertet werden. Beispiele für derartige Sicherheiten sind Pfandregelungen, Sicherheitsübereignungen oder Vorabzahlungen. Sicherheiten führen zu einer Herabsetzung der Anreize zur Defektion, und dem getäuschten Akteur fließen aus der Verwertung der Sicherheiten Mittel in Höhe des geplanten Kooperationsgewinns zu. In gleicher Weise wirken Sanktionen, wobei über die Rückerstattung des erlangten Vorteils (Defektionsgewinn) hinaus eine Strafe zu entrichten ist, um eine wirksame Ab-

---

162 Vgl. Rometsch, L. (2002), S. 197 f.

163 Vgl. Uhde, A. (2004), S. 20.

164 Von der Vertragsstabilität gehen zudem über den Kooperationsgewinn hinaus positive Beitrittsanreize zum Vertrag aus. Sofern die Akteure Defektionen antizipieren, führt dieses zu einer Entwertung des Kooperationsgewinns und damit der Beitrittsanreize. Zugleich ist das Verhältnis zwischen Beitrittsanreizen und Stabilität allerdings insofern durch eine Ambivalenz gekennzeichnet, als Vertragselemente, die auf der einen Seite stabilisierend wirken, auf der anderen Seite mit negativen Beitrittsanreizen einhergehen können, wenn erhebliche Vollzugskosten den Kooperationsgewinn reduzieren oder wenn das Sanktionssystem (Abschreckungswirkung) den Präferenzen einzelner Akteure zuwiderläuft. Vgl. Rometsch, L. (2002), S. 166 ff. und S. 198 f.

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

schreckung zu erzielen. Ferner ist es zur wirksamen Abschreckung erforderlich, dass die angedrohten Sanktionen glaubwürdig und durchsetzbar sind.[165]

4.2.3.3 Ein Praxisbeispiel

Um ein Beispiel aus der Praxis anzuführen und den Umgang mit Risiken zu illustrieren, erfolgt abschließend eine partielle Darstellung der zwischen dem NB Technische Betriebe Leverkusen (TBL) und dem EVU Harpener Energie Contracting, Dortmund, getroffenen, sehr pragmatischen Regelungen:[166]

- Das Risiko des Ausfalls der Mietzinszahlungen haben die TBL eliminiert, indem die Mietzahlungen für den gesamten Vertragszeitraum bereits bei Vertragsabschluss zu entrichten waren. Diesbezüglich erübrigen sich weitergehende Maßnahmen zur Stabilisierung des Vertrages.

- Zusätzliche, d.h. über die Anforderungen der SüwV Kan hinausgehende Reinigungsbedarfe sind von der HEC zu beauftragen und werden dieser in Rechnung gestellt.

- Das Risiko der Insolvenz des EVU ist aufgrund des vorab entrichteten Mietzinses auf Entsorgungsaufgaben reduziert.

- Zum Umgang mit dem Haftungsrisiko beim Auftreten negativer externer Effekte infolge der Entnahme bzw. Zuführung von Wärmeenergie haben TBL und HEC vereinbart, dass die TBL ggfs. für die Temperaturveränderung im Kanal Grenzen vorgeben können. In diesem Zusammenhang ist ferner vereinbart worden, dass HEC der TBL Daten über die energetische Nutzung des Abwassers zur Verfügung stellt.

Die TBL treffen keine Verantwortung für den Betrieb bzw. die Betreibbarkeit der AWN-Anlage. Insbesondere besteht keine Verpflichtung seitens der TBL, eine bestimmte Menge Abwasser durch den mit WT-Elementen versehenen Kanal zu leiten.

Hinsichtlich des Problems der Überlastung der Kanalisation infolge des Einbaus von WT-Elementen ist in Leverkusen kein Regelungsbedarf gegeben, weil der Einbau der WT in einer Trockenwetterrinne erfolgt. Dabei war keine zusätzlicher Verjüngung des Kanalquerschnitts zu verzeichnen.

Wie die obigen Beispiele zeigen, haben die TBL mögliche Risiken weitgehend eliminiert. Beachtlich ist insbesondere, dass das wirtschaftlich gravierende Risiko des Ausfalls der Mietzinszahlungen durch eine geeignete vorbeugende Maßnahme ausgeschaltet werden konnte.

---

165 Zum Vollzug von Normen siehe Rometsch, L. (2002), S. 185 ff.

166 Die nachfolgenden Ausführungen sind nicht umfassend. Basierend auf den Gesprächen, die das IKT – Institut für Unterirdisch Infrastruktur mit Herrn Dipl.-Ing. Wolfgang Herwig, Leitender Ingenieur der TBL, sowie Herrn Dipl.-Ing.Werner Gerwert, Prokurist, von der HEC in Dortmund geführt hat, wird ein Ausschnitt skizziert, um zu zeigen, welche grundsätzlichen Möglichkeiten zur Beherrschung der Risiken für NB bestehen.

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

4.2.3.4 Ergänzende vertragsrechtliche Anmerkungen zum Cross-Border-Leasing

Bei Geschäften des sog. Cross-Border-Leasing (CBL) erfolgt eine grenzüberschreitende Finanzierung von Anlagen, wie z.B. Kläranlagen, Leitungsnetzen, Hallenbädern, Rathäusern usw., die langfristig an einen rechtlich selbständigen US-Investor vermietet werden. Mit dieser Form der Finanzierung haben sich zahlreiche Kommunen in Deutschland am US-amerikanischen Kapitalmarkt refinanziert. Ein CBL von Kanalisationen ohne Kläranlagen wurde erst zum Sommer 2001 möglich. Nordrhein-westfälische NB, die oftmals nur ein Kanalisationsnetz betreiben, während die Reinigung des Abwassers in den von Wasser-wirtschaftsverbänden betriebenen Kläranlagen vorgenommen wird, haben das CBL genutzt. Bspw. hat die Stadt Gelsenkirchen im Jahr 2002 einen CBL-Vertrag zum Abschuss gebracht. Dabei wurde u.a. das Ziel verfolgt und durchgesetzt, dass durch den Vertrag kein Eingriff in die Eigentümerstellung erfolgt: Die Stadt Gelsenkirchen hat die volle operative Handlungsfreiheit hinsichtlich Betrieb und Innovation des Kanalnetzes.[167] Anhand dieser exemplarischen Darstellung der seitens der Stadt Gelsenkirchen getroffenen Vereinbarung im Rahmen des CBL ist zu erkennen, dass sich CBL und Nutzung der Kanäle für die Wärmerückgewinnung durchaus vereinbaren lassen.

[167] Vgl. Fritz, J. (2002), S. 1555 ff.

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

4.3 Anforderungen der Energieversorger

4.3.1 Vorbemerkungen

EVU nehmen die Sachaufgabe der Produktion und Vermarktung von Wärmeenergie wahr. Als am Energiemarkt tätige Unternehmen verfolgen EVU ökonomische Zielsetzungen, d.h. im Fokus der Entscheidung stehen grundlegende Anforderungen hinsichtlich der Rentabilität der entfalteten unternehmerischen Aktivitäten.

Die Rentabilität stellt als Maß für die Verzinsung des eingesetzten Kapitals ein zentrales Entscheidungskriterium für Investitionsentscheidungen eines Unternehmens dar. Bei der Ermittlung der Rentabilität einer Investition wird der Periodengewinn auf das durchschnittlich gebundene Investitionsvolumen bezogen. Dabei ist der Periodengewinn als Differenz zwischen Erlösen und Kosten zu ermitteln.

$$Rentabilität = \frac{Periodengewinn}{durchschnittl.\ geb.\ Kapital}$$

Die Rentabilität des in einem Unternehmen gebundenen Kapitals ergibt sich aus der Aggregation der unterschiedlichen Rentabilitäten der einzelnen Engagements. Sofern eine Investition die von einem EVU geforderte Mindestrentabilität nicht erwarten lässt, findet eine Realisierung nicht statt. Sofern mehrere alternative Investition das Kriterium der Mindestrentabilität erfüllen, werden c.p. die Alternativen mit der höchsten Rentabilität umgesetzt. Auf diese Weise wird dem Ziel der Maximierung der Gesamtrentabilität eines Unternehmens Vorschub geleistet.

Darüber hinaus können aber auch der Eintritt in bestimmte Marktsegmente oder der Ausbau von Marktanteilen als Entscheidungskriterien für ein Engagement in der Wärmerückgewinnung in Abwasserkanalisationen eine Rolle spielen, wenn bspw. der Markteintritt oder das Wachstum auf dem regenerativen Wärmemarkt angestrebt wird. Das Angebot regenerativer Wärmeenergie kann einerseits dazu beitragen, Ertragsschwankungen durch Diversifizierung des Produktportfolios zu nivellieren, andererseits können sich spezialisierte EVU in Marktnischen auf dem regenerativen Wärmemarkt etablieren. Da jedoch die infolge von Expansionsbestrebungen gewonnenen Marktanteile langfristig nicht von der Rentabilitätsbeurteilung abgekoppelt werden können und zugleich die Diversifikationswirkungen vor dem Hintergrund eines unternehmensspezifischen Produktportfolios abzuschätzen sind, rechtfertigt sich im Rahmen dieser Studie die Fokussierung auf die Rentabilität als Zielgröße.

Hinsichtlich der hier betrachteten Anforderungen der EVU ist ferner zu berücksichtigen, dass

- aus den Eigenschaften der zu vermarktenden Wärmeenergie,
- aus den spezifischen Besonderheiten von Produktion und Absatz
- sowie aus der Konstellation des Akteursgeflechts bei der Gewinnung und Vermarktung der Wärmeenergie aus Abwasser

Anforderungen resultieren, die sich in ökonomischen Größen niederschlagen und die Rentabilität beeinflussen. Da die Bewertung dieser Einflüsse letztendlich dafür maßgebend ist, ob sich ein EVU für oder gegen eine Vermarktung von mittels Wärme-

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

tauschern in Kanalisationen gewonnener Wärmeenergie entscheidet, erfolgt nunmehr die Darstellung der grundlegenden rentabilitätswirksamen Aspekte aus der Perspektive der EVU.

4.3.2 Investitionen

Grundlegendes Kennzeichen einer Investition ist die Umwandlung von Geldkapital in ertragbringendes Realkapital, wobei

- die Anschaffung des Investitionsobjektes zunächst mit einer Auszahlung verbunden ist,
- im Laufe der Nutzung weitere Ein- und Auszahlungen erfolgen und
- im Anschluss an die Nutzungsperiode ggfs. ein Resterlös mit dem Verkauf des Investitionsobjektes erzielt werden kann oder Kosten für Demontage und Entsorgung anfallen.

Die Investitionen zur Aufnahme der Produktion von Abwasserwärme mittels Wärmetauschern weisen eine beträchtliche Höhe auf. Bspw. hat die in Leverkusen errichtete und inzwischen in Betrieb genommene Anlage, die 40 hintereinandergeschaltete Wärmetauscher (à 3 m Länge) umfasst und das 12.500 m² große Gesundheitszentrum mit vier Fünftel der benötigten Wärmeenergie versorgen soll, rd. 550.000 € gekostet.[168] Sofern während der Nutzungsperiode der WT regelmäßig wiederkehrende, gleichhohe Einzahlungen erfolgen, lassen sich für alternative Mindestverzinsungen die erforderlichen Annuitäten gemäß der nachfolgenden Formel ermitteln:

$$Annuität = Investitionsvolumen \times \frac{i \times (1+i)^n}{(1+i)^n - 1}$$

Bei einer angenommenen geforderten Mindestrentabilität[169] von i = 6 % (alt. 4 % bzw. 8 %) und einer Nutzungsdauer von 25 Jahren wären jährliche Nettoüberschüsse in Höhe von 43.000 Euro (alt. 35.200 Euro bzw. 51.500 Euro) erforderlich, um über die Nutzungsperiode lediglich die nominalen Investitionskosten zu erwirtschaften. Da sich die Nettoüberschüsse nach Abzug von Fremdkapitalzinsen und Steuern ergeben, sind diese bei der Ermittlung der Bruttoüberschüsse noch zusätzlich zu berücksichtigen. Ferner ist zu berücksichtigen, dass die o.g. Annuitäten lediglich einen nominalen Substanzerhalt, nicht jedoch den erforderlichen, einen inflationären Ausgleich beinhaltenden realen Substanzerhalt gewährleisten.[170]

Der Zusammenhang zwischen Investitionsaufwand und Rentabilität lässt sich anhand der oben dargestellten Formel erkennen. Da sich ein steigender Investitionsaufwand c.p. in einer verminderten Rentabilität niederschlägt, sind Unternehmen prinzipiell bemüht, eine Lösung zu finden, die die Hervorbringung einer bestimmten Leistung bei minimalem Einsatz ermöglicht.

---

168 Vgl. Jarke, P. (2004), S. 117.

169 Im Zeitraum von 1997 bis 2001 konnten mittelständische Energieversorgungsunternehmen die nachfolgend dargestellten Rentabilitäten erzielen: Die Eigenkapitalrentabilität stieg im vorgenannten Zeitraum von 11 auf 15 %, die Gesamtkapitalrentabilität von 6,0 auf 7,3 %, die Umsatzrentabilität von 4,7 auf 7,4 %. Große Unternehmen konnten 2001 mit 13 % nur eine etwas geringere Eigenkapitalrentabilität erzielen. Vgl. Brinkmann, F. (2003), S. 20 f. Bei der oben dargestellten Betrachtung der Annuität, bei der keine Unterscheidung nach der Herkunft des investierten Kapitals getroffen wird (insofern ist für die Abschätzung der Mindestrentabilität die Kenngröße der Gesamtkapitalrentabilität zu verwenden), ist für die geforderte Mindestrentabilität ein Wert in Höhe von 6 % durchaus als plausibel anzusehen.

170 Diese Betrachtung stellt lediglich auf die Investitionen ab. Zur vollständigen Ermittlung der Annuität wären auch die Betriebs- und Entsorgungskosten in die Berechnung einzubeziehen.

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

Vor diesem Hintergrund ist zu untersuchen, welche Faktoren auf die Höhe der Investition zur Errichtung eines Wärmerückgewinnungsanlage in Abwasserkanalisationen eine Rolle spielen. Zunächst ist das Investitionsvolumen zur Errichtung einer derartigen Anlagen durch die Dimensionierung determiniert. Die Dimensionierung ist in Abhängigkeit von dem nachfrageseitigen Wärmebedarf, der während der gesamten Nutzungsdauer zu erwarten ist, vorzunehmen. In diesem Zusammenhang ist zu beachten, dass die Versorgung mit Wärmeenergie mitunter von existenzieller Bedeutung für die Nachfrager sein kann, insofern besteht für die EVU eine besondere Leistungsverantwortung: Das Wärmeangebot muss stets in ausreichender Menge zur Verfügung stehen, und die diskontinuierlich auftretenden Lastspitzen müssen jederzeit bewältigt werden.[171] Damit stellt sich die Aufgabe an die EVU, die Grund- und Spitzenlastbedarfe zur ermitteln, deren langfristige Entwicklungen abzuschätzen und darauf basierend eine hinreichend dimensionierte Anlage zu planen, zu realisieren und zu betreiben. Auf der Grundlage der nachfrageseitigen Wärmebedarfe können die Dimensionierung der Anlage geplant sowie die ökonomischen Implikation in die Rentabilitätsrechung einbezogen werden.[172]

Ferner ist das Investitionsvolumen durch eine weitere nachfrageseitige Größe determiniert – durch den Umfang der kurzfristigen Schwankungen des Wärmebedarfs. Wie bereits zuvor angeklungen ist, weist der Bedarf nach Wärmeenergie weder im täglichen noch im saisonalen Zyklus einen kontinuierlichen Verlauf auf. Vielmehr kann eine Unterscheidung in Grundlast- und Spitzenlastbedarf getroffen werden. Wärmeenergie aus Wärmetauschern kann nicht wirtschaftlich zur Deckung von Lastspitzen eingesetzt werden, da für die Deckung von Lastspitzen zu viele Ressourcen vorzuhalten wären.[173] Die ökonomischen Vorteile sind hingegen bei der Deckung von Grundlastbedarfen zu finden. Aus diesem Grund erfolgt die Wärmeversorgung mittels eines bivalenten Systems, d.h. die Versorgung der Grundlast mittels Wärmerückgewinnung erfolgt auf der Basis der Nutzung der Abwasserwärme, die Versorgung der Spitzenlast erfolgt durch Hinzunahmen eines ergänzenden Heizungssystems. Damit stellt sich die Anforderung an EVU, ein auf die jeweilige Versorgungssituation zugeschnittenes bivalentes System zu entwickeln, das die Grundversorgung mittels Wärmepumpen in technisch und ökonomisch sinnvoller Weise ergänzt und das zudem die Akzeptanz der Nachfrager findet. Je nach Präferenz der Nachfrager kann das ergänzende System derart ausgelegt sein, dass lediglich die Differenz zwischen Spitzen- und Grundlast bedient wird. Es besteht jedoch auch die Möglichkeit, unter Hinnahme der entsprechenden Kosten weitere Kapazitäten zur partiellen oder vollständigen Bedienung der Grundlast vorzuhalten, um ggfs. unabhängig vom Abwasserheizwerk zu sein.

Die oben dargestellten Zusammenhänge zwischen Nachfrageschwankungen, Konfiguration des bivalenten Wärmeversorgungssystems und der Investitionshöhe sind im Rahmen der Rentabilitätsrechung zu berücksichtigen. Sofern signifikante Unterschiede zwischen Grund- und Spitzenlast anzutreffen sind, ist eine entsprechend leistungsfähige ergänzende Anlage mit einem höheren Investitionsvolumen erforderlich. Damit wird deutlich, dass die EVU auch bezüglich der Konfiguration der bivalenten Anlage zur Wärmeversorgung Informations- und Analyseanforderungen zu bewältigen haben, um letztendlich die Investitionsalternative mit der höchsten Rentabilität zu ermitteln.[174]

---

171 Es besteht ein für Dienstleistungen typischer enger zeitlicher Zusammenhang zwischen Produktion und Nutzung der Wärmeenergie.

172 Diesbezüglich ist zu beachten, dass durch die Investitionsentscheidung Einfluss auf die Höhe der Betriebskosten genommen wird. Daher ist eine simultane Planung unerlässlich. Eine vertiefende Darstellung der Kostenseite erfolgt im nachfolgenden Kapitel.

173 Nach Mitteilung des Büro EAM und Ryser-Ingenieure AG ist die Versorgung der Spitzenlast aus Abwasserwärme unwirtschaftlich im Vergleich zur bivalenten Wärmeversorgung.

174 Auch die bivalente Wärmeversorgung ist mit Implikationen für die Betriebskosten verbunden. Diese werden ebenfalls im nachfolgenden Kapitel dargestellt.

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

Unternehmen können ihre Investitionsentscheidungen nur selten unter der Bedingung sicherer Erwartungen treffen. Zumeist besteht Ungewissheit über zu erwartende Umweltzustände, und die Renditen streuen um einen Erwartungswert. Daher stellt sich die Aufgabe an die EVU, erkennbare Risiken zu erfassen und zu bewerten. Investitionen in Wärmetauscher für Abwasserkanalisationen stellen für ein EVU bereits aufgrund der Spezifität der Investition[175] und der langen Amortisationszeiträume ein Risiko dar.[176]

Risikoerhöhend wirkt sich überdies aus, dass die investierten Mittel vielfach als sunk costs anzusehen sind. D.h. sind die Anlagen installiert, lassen sich die investierten Mittel nicht durch Desinvestition in Liquidität zurückführen. Da also die Rückumwandlung von Realkapital in Geldkapital nicht möglich ist, gelten die investierten Mittel als „versunken". Vor diesem Hintergrund müssen die EVU eine sorgfältige Abschätzung der Risiken und Chancen für jede in Frage kommende Investition vornehmen. Auch in diesem Zusammenhang besteht die Anforderung, allgemeinwirtschaftliche und investitionsspezifische Daten zu erheben sowie deren Entwicklung abzuschätzen und zu bewerten.

Schließlich besteht eine weitere Determinante der Höhe des Investitionsvolumens in der räumlichen Distanz zwischen dem Ort der Produktion und dem Ort der Nutzung der Wärmeenergie. Gerade in innerstädtischen Gebieten ist das Verlegen der Versorgungsleitungen mit einem hohen Aufwand verbunden. Daher ist bei zunehmender räumlicher Distanz zwischen Produktion und Nutzung der Wärmeenergie eine Minderung der Rentabilität zu verzeichnen. Bereits bei Distanzen von 100 – 200 m kann die Wirtschaftlichkeitsgrenze erreicht sein.[177]

4.3.3 Kosten

EVU sind bestrebt, die bei der Nutzung der Wärmetauscheranlagen auftretenden Kosten, die sich zu Lasten von Periodengewinn und Rentabilität auswirken, zu minimieren. Wie im vorangegangenen Kapitel angesprochen, determinieren bereits die hinsichtlich der Konfiguration und Dimensionierung einer bivalenten Anlage getroffenen Entscheidungen die Höhe der Kosten, und zwar in mehrfacher Hinsicht. Zum einen fallen in Abhängigkeit von der Höhe der Investition und der Nutzungsdauer Abschreibungen an und für den Einsatz von Fremdkapital sind Zinsen aufzubringen. Diese Kosten hängen von der Konfiguration der Anlagen ab und sind somit unabhängig von dem im Betrieb erzeugten Wärmevolumen aufzubringen. Es handelt sich bei den Abschreibungen und Zinsen um Fixkosten, d.h. bereits vor Inbetriebnahme werden die wesentlichen Weichen für die Rentabilitätsentwicklung von Wärmetausch-Anlagen gestellt.

Über die fixen Kapitalkosten hinaus fallen während der Nutzungsperiode Betriebskosten für die Produktion der Wärmeenergie an. Um eine Minimierung der Betriebskosten zu erreichen, ist es erforderlich, die Anlagen in ihrem jeweiligen Betriebsoptimum zu betreiben. Im Betriebsoptimum wird diejenige Ausbringungsmenge hervorgebracht, bei der sich die Produktionskosten je Leistungseinheit in einem Minimum befinden.

---

175 Eine Investition mit hoher Spezifität liegt vor, wenn alternative Nutzungsmöglichkeiten für das Investitionsobjekt nicht oder nur in sehr eingeschränktem Umfang vorliegen.

176 Da dieses Risiko branchentypisch ist, kann unterstellt werden, dass die EVU über hinreichende Erfahrung zu Bewältigung derartiger Risiken verfügen.

177 Vgl. bea (2004), S. 16. Siehe auch Beitrag von Ryser-Ingenieure AG zu den Voraussetzungen für den Einbau von WT in Abwasserkanalisationen, Kapitel 4.1., S. 69 ff.

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

Mit der Entscheidung für eine bestimmte Dimensionierung der sich ergänzenden Wärmeversorgungssysteme werden die Betriebsoptima für Grund- und Spitzenbedarfe langfristig determiniert. Wärmebedarfe können sich jedoch im Zeitablauf ändern. Eine Veränderung der Auslastung von Heizungssystemen ist dann stets mit dem Verlassen des Betriebsoptimums verbunden und wirkt sich zu Lasten der Rentabilität aus. Bspw. ist ein steigender Wärmebedarf überwiegend durch den Einsatz der kostenintensiveren Wärmeanlage zur Spitzenbedarfsdeckung zu bedienen. Im Fall eines abnehmenden Wärmebedarfs werden die Anlagen nur in vermindertem Umfang genutzt, d.h. sowohl die verbrauchsabhängigen Betriebskosten als auch die verbrauchsunabhängigen Kosten erhöhen sich je Leistungseinheit.

Insgesamt ist festzustellen, dass wie bei den investiven Aufwendungen auch die Höhe der Betriebskosten durch die Dimensionierung der Anlagen bereits in der Planungsphase determiniert wird. Hinzu kommt, dass die während der langfristigen Nutzungsperiode eintretenden Änderungen der Wärmebedarfe die Produktionskosten erhöhen. Der Abschätzung der Grund- und Spitzenlastbedarfe kommt somit eine hohe Bedeutung für die Rentabilität der Wärmerückgewinnung in Abwasserkanalisationen zu. Eine Über- bzw. Unterdimensionierung der Anlagen würde die Produktionskosten erhöhen und sich entweder zu Lasten des Gewinns auswirken oder die Energieabnehmer mit höheren Preisen belasten.

4.3.4 Erlöse

4.3.4.1 Produkte, Mengen, Preise

Mit dem Verkauf ihrer Produkte am Markt erzielen Unternehmen einen Erlös, der sich als Produkt aus abgesetzter Gütermenge (Mengenkomponente) und Verkaufspreis (Preiskomponente) errechnet. EVU können mittels WT in Abwasserkanalisationen zwei Produkte herstellen:

- Wärme (durch Entnahme von Wärmeenergie aus dem Abwasser)
- Kälte (durch Abgabe von Wärmeenergie an das Abwasser, sog. inverser Betrieb)

Die Erlöse eines EVU lassen sich folglich angeben als Summe der Produkte aus abgesetzter Wärmemenge und Wärmepreis sowie abgesetzter Kältemenge und Kältepreis.

Hinsichtlich der Erlöse aus dem Verkauf von Wärmeenergie lässt sich feststellen, dass die absetzbare Wärmemenge durch das Nachfragevolumen, das von der Art und Anzahl der Verbraucher abhängt, determiniert ist. Aufgrund der begrenzten Substituierbarkeit von Wärmeenergie ist die Annahme plausibel, dass die volkswirtschaftliche Nachfrage nach Wärmeenergie zumindest kurzfristig konstant und preisunelastisch ist. Folglich müssen EVU zur Steigerung ihrer Erlöse auf den Aktionsparameter „Preis“ zurückgreifen. Aber auch der Verkaufspreis für Wärmeenergie steht nur innerhalb gewisser Grenzen für eine preispolitische Gestaltung zur Verfügung.

Eine Grenze für die Gestaltung der Preise ist durch die Kostenseite vorgegeben: Langfristig markieren die herstellungsbedingten Stückkosten die Preisuntergrenze.[178] Als Pendant besteht die Preisobergrenze in den Preisen, die von der Konkurrenz für Wärmeenergie verlangt werden. Dabei spielen insbesondere die Preise der Wärmeversorgung auf Öl- und Gasbasis eine Rolle.

[178] Kurzfristig ist ein Unterschreiten dieser Preisgrenze möglich, bspw. um neues Marktpotenzial zu erschließen. Dabei findet allerdings kurzfristig ein Substanzverzehr statt, der mittel- bis langfristig zu kompensieren ist.

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

Gelingt eine Segmentierung des Marktes in einen regenerativen und einen konventionellen Teilmarkt, nehmen die Freiheitsgrade der Preispolitik für die Wärmeenergie zu.

Der Verkauf von Kälte, d.h. von Klimatisierungsleistungen, ist gegenwärtig für die EVU interessant, weil zum einen das Wachstumspotenzial größer ist als im Wärmemarkt und die Freiheitsgrade der Preispolitik größer sind. Letzteres ist zum einen auf komparative Kostenvorteile zurückzuführen, da die Anlagen bei Wärmeableitung in Abwasser effektiver arbeiten als alternative Klimatisierungssysteme, bei denen die Wärme an die Luft abgeben wird. Zudem ist der Markt weniger transparent und erlaubt größere Gewinnmargen als der Wärmemarkt. Die Möglichkeit des Einsatzes von Abwasser-Wärmetauschern im inversen Betrieb ist für EVU von hoher Bedeutung.[179] Zum einen steigt die Auslastung der Anlage, so dass sich die Fixkostenanteile je Leistungseinheit reduzieren lassen, zum anderen besteht im Verkauf des Produktes „Klimakälte“ ein wichtiger, weil im Vergleich zur Wärmevermarktung höher bepreister Erlösträger.

Der Blick auf die ökonomischen Eckdaten der in Leverkusen betriebenen Anlage zeigt Zweierlei:

- Ohne politische Förderung – das MUNLV NRW hat die Hälfte der Baukosten getragen – wäre die Maßnahme trotz günstiger Ausgangsbedingungen (Neubau von Kanal und Liegenschaft, räumliche Nähe) nicht realisiert worden.[180]

- Darüber hinaus stellt der Verkauf von Klimakälte einen obligatorischen Bestandteil für die Rentabilität der Anlage dar. Da die Produktionskosten für in Abwasserkanalisationen gewonnene Wärme derzeit nur rd. 10 % unter dem Verkaufspreis liegen, ist der Verkauf von Klimakälte nicht wegzudenken.[181]

4.3.4.2 Contracting

Bei vorgegebenem Investitionsvolumen und Kostenumfang ist seitens der EVU zu untersuchen, ob sich die Rentabilitätsansprüche der EVU mit den Preisen für Wärmeenergie und Klimatisierungsleistungen innerhalb der o.g. Grenzen realisieren lassen. Sofern dieses der Fall ist, besteht die Möglichkeit, durch den flankierenden Einsatz weiterer absatzpolitische Instrumente, etwa durch das Angebot von Service-, Vertrags- und Finanzdienstleistungen, Maßnahmen zur Förderung des Erlöses zu ergreifen.[182] Die auf diese Weise u.U. entstehenden umfassenden vertraglichen Beziehungen zwischen EVU und Energieabnehmern werden als Contracting bezeichnet. Contractor ist das ausführende bzw. energieliefernde Unternehmen, das sich vom EVU zum Energie-Dienstleister entwickelt hat. Contracting-Nehmer ist der Eigentümer der zu beliefernden Liegenschaft.[183]

Mit Blick auf das Leistungsangebot lassen sich verschiedene Formen des Contracting unterscheiden.[184] Die gängigste Form ist das Energieliefer-Contracting, auch Anlagen-Contracting genannt. Dieses beinhaltet die vollständige Installation und den

---

179 Die Ausführungen basierend auf einem Gespräch, das der Verfasser mit Herrn Dipl.-Ing.Werner Gerwert, Prokurist der HEC in Dortmund, geführt hat.

180 Ebenda.

181 Vgl. Jarke, P. (2004), S. 117.

182 Die Absatzpolitik umfasst neben der Preispolitik bspw. die Instrumente der Produkt- und Sortimentspolitik, Informationspolitik, Vertriebspolitik und Absatzfinanzierung.

183 Contractoren sind oftmals EVU oder spezialisierte Energiedienstleister, die wiederum häufig als Tochterunternehmen von EVU firmieren. Ferner treten auch innovative Handwerksbetriebe, Anlagenbauer oder Immobilienunternehmen als Contractoren auf und bieten Energieversorgungslösungen aus einer Hand an. Vgl. Energieagentur NRW (2002), S. 1 und S. 14.

184 Zu den nachfolgenden Ausführungen siehe Energieagentur NRW (2002), S. 6 ff.

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

Betrieb der Energieerzeugungsanlage (inkl. Planung, Bau, Betrieb, Instandhaltung und Energievermarktung). Derartige Contracting-Verträge sind bspw. zwischen Wohnungsbaugesellschaften und Contracting-Unternehmen anzutreffen. Dabei installiert und betreibt der Contractor die Energieanlage auf eigenes Risiko auf der Basis langfristiger Verträge mit seinen Kunden.

Betriebsführungs-Contracting stellt lediglich die Betriebsführung (Service und Wartung) in die Pflicht des Contractors. Während die Energieanlagen im Eigentum des Contracting-Nehmers stehen, hat der Contractor für den störungsfreien Betrieb zu sorgen.

Einspar-Contracting bzw. Performance-Contracting stellt eine weitere Form des Contracting dar. Dabei entsteht der Vergütungsanspruch des Contractors in Abhängigkeit von den durch das Contracting erzielten wirtschaftlichen Vorteilen. Die Energieanlagen können dabei im Eigentum des Contracting-Nehmers stehen.

Schließlich ist das Finanzierungs-Contracting anzuführen, das eine Affinität zum Leasing aufweist, d.h. der Contractor bietet Finanzdienstleistungen an, die üblicherweise von Kreditinstituten oder Leasinggesellschaften angeboten werden. Finanzierungs-Contracting wird häufig mit Energieliefer-Contracting oder Betriebsführungs-Contracting verbunden.

Als Fazit ist festzuhalten, dass die EVU im Rahmen des Contracting private oder öffentliche Contracting-Nehmer mit ihren Sach- und/oder Finanzdienstleistungen versorgen können. Indem Contracting-Nehmer die Kompetenz eines spezialisierten Contractors nutzen, können für diese wirtschaftliche Vorteile entstehen. Sofern überdies hohe Anfangsinvestitionen und Liquiditätsbedarfe der Entscheidung zur Verwendung innovativer Technologien im Wege stehen, helfen Contractoren mit dem Angebot des Finanzierungs-Contracting, diese Hürde zu überwinden und der Verbreitung kostspieliger Technologien Vorschub zu leisten.[185]

Die hohen Anfangsinvestitionen und der hohe Anteil versunkener Kosten[186] schlagen sich in langen Amortisations- und Vertragslaufzeiten nieder: Contracting-Abkommen werden über zehn, fünfzehn oder mehr Jahre geschlossen. Derart langfristige Verträge haben auf der einen Seite den Charme, dass dauerhafte Liefer- und Absatzbeziehungen[187] sowie ein hohes Maß an Planungssicherheit bestehen. Auf der anderen Seite wird für die Dauer der vertraglichen Bindung der Druck des Wettbewerbs ausgeschaltet. Um daraus resultierende Nachteile für den Contracting-Nehmer zu vermeiden, kommt es bei der Gestaltung der Vergütung darauf an, den Contractor an dem wirtschaftlichen Erfolg des Engagements aus der Sicht des Contracting-Nehmers zu beteiligen. Als besondere vertrauensfördernde Maßnahme können dem Contracting-Nehmer, dem Vorbild des Einspar-Contracting entsprechend, Kostenentlastungen in Form von Einspargarantien je verbrauchter Energieeinheit angeboten werden.[188]

---

185 Vgl. Energieagentur NRW (2002), S. 4.

186 Die alternative Verwertung in Kanalisationen eingebauter Wärmetauscher ist unwirtschaftlich.

187 Für EVU spielt Contracting als Instrument zur langfristigen Kundenbindung insbesondere bei mittleren und großen Projekten eine Rolle. Vgl. Energieagentur NRW (2002), S. 15.

188 Vgl. Energieagentur NRW (2002), S. 9, S. 24 und S. 33.

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

Nach Angabe der Energieagentur NRW, die kostenlose Beratungsleistungen zum Thema Contracting anbietet, werden in Deutschland über 400.000 Anlagen über Contracting betrieben (Tendenz steigend), wobei sich das Wärmeliefer-Contracting als Hauptgeschäftsfeld herauskristallisiert hat.[189]

4.3.5 Zusammenfassung: Anforderungen der EVU an die Wärmerückgewinnung in Abwasserkanälen

Aus den zuvor dargestellten Besonderheiten des Produktes sowie von Produktion und Vertrieb von Wärmeenergie lassen sich aus der Sicht der EVU die nachfolgenden Anforderungen über den Einsatz von Wärmetauschern in Abwasserkanalisationen zusammenfassen:

- **Der Wärmebedarf sollte langfristig einen möglichst konstanten Verlauf aufweisen.** Sofern während der Nutzungsdauer der Anlagen größere Bedarfsänderungen auftreten, können Anpassungen in den Auslastungsgraden erforderlich werden, was sich in steigenden Produktionskosten je Wärmeeinheit sowie in Rentabilitätseinbußen oder höheren Preisen niederschlagen kann. Daher ist der Einsatz der Wärmerückgewinnung in Abwasserkanalisationen eher dort sinnvoll, wo auf lange Sicht gleichbleibende Wärmebedarfe vorzufinden sind.

- **Der Wärmebedarf sollte einen hohen Grundlastanteil aufweisen.** Die Versorgung von Spitzenbedarfen ist in bivalenten Heizungssystemen mit vergleichsweise hohen variablen Kosten verbunden. Außerdem hängt die Dimensionierung des zusätzlichen Wärmesystems von der Höhe der Spitzenlasten ab. Je weniger intensiv Grundlastüberschreitungen auftreten, desto wirtschaftlicher arbeitet das bivalente System der Wärmeversorgung.

- **Der Wärmebedarf sollte in räumlicher Nähe zum Produktionsort auftreten**, da sich bei zunehmender Distanz der Investitionsaufwand zu Lasten der Rentabilität auswirkt.

- **Eine langfristige Bindung der Nachfrager an die Wärmeversorgung mittels Wärmetauscher ist erforderlich.** Die beachtlichen Investitionen sind mit Risiken verbunden, bspw. aufgrund der sunk-cost-Eigenschaften des Engagements. Daher ist eine langfristige Bindung der Nachfrager erforderlich, damit durch die Absicherung des Wärmeabsatzes für die gesamte Nutzungsperiode über den für die Amortisation erforderlichen Zeitraum hinaus ein positives Ergebnis erzielt werden kann.

- **Mit den am Markt erzielbaren Preisen für Wärmeenergie und Klimakälte muss ein rentabler Erlös erzielt werden.** Dabei muss der Preis über dem vollkostendeckenden Preis liegen. Als obere Grenze ist der für substitutive Güter am Markt herrschende Preis zu berücksichtigen. Der Verkauf von Klimakälte ist erforderlich.

Über diese Anforderungen der EVU hinaus resultieren weitere Restriktionen für die Vermarktung von Wärmeenergie aus Kanalisationen aus den durch Netzbetreiber und Kläranlagenbetreibern gestellten Anforderungen. Zudem knüpft die Produktion der Wärmeenergie an die Voraussetzung an, für den Einbau von Wärmetauschern geeignete Kanalisationsabschnitte vorzufinden. Insofern sind die Möglichkeiten der Produktion auf die entsprechenden Standorte beschränkt.

---

[189] Vgl. Energieagentur NRW (2002), S. 2 und S. 12.

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

Vor dem Hintergrund der zuvor dargestellten Anforderungen lassen sich Nachfrager mit tendenziell mehr oder weniger geeigneten Bedarfsstrukturen identifizieren. Als Beispiel für einen idealen Wärmenachfrager mit einer geeigneten Bedarfsstruktur sind bspw. Hallen- und Freibäder anzuführen, weil diese einen ganzjährigen sowie langfristig relativ konstanten Wärme-Input v.a. zur Beheizung des Beckenwassers benötigen. Auch klimatisierte Gebäude zählen zu den geeigneten Nutzern von Wärmetauschanlagen. Die Eignung von größeren Wohneinheiten zur Versorgung aus Abwasserwärme ist von Fall zu Fall zu beurteilen. Über die langfristige Entwicklung der Nachfrage, die von den Pro-Kopf-Bedarfen und der Fluktuation abhängt, sind jeweils Annahmen zu treffen. Die kurzfristigen Bedarfsschwankungen harmonieren eher weniger mit den Wärmerückgewinnungspotenzialen in Kanalisationen: Während der morgentliche Wärmebedarf für Heizung und z.B. Duschen eher hoch ist, bestehen aufgrund des relativ geringen Abwasseraufkommens zu dieser Zeit nur begrenzte Möglichkeiten zur Wärmerückgewinnung. Dennoch ist eine generelle Ablehnung dieses Nachfragetypus nicht auszusprechen. Vielmehr – und dieses betrifft auch weitere Bedarfsformen – sind die erforderlichen Daten im Einzelfall zu erheben und in die Rentabilitätsberechnung einfließen zu lassen.

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

5 Potenzial der Abwasserwärmenutzung in NRW

5.1 Definitionen und Vorgehensweisen bei der Ermittlung des theoretischen Potenzials

Abwasser hat ein Wärmepotenzial, das entweder im Kanal oder in bzw. nach Kläranlagen genutzt werden kann. In diesem Abschnitt wird zunächst die Vorgehensweise bei der Ermittlung des theoretischen Potenzials anhand der Wärmeentnahmen im Kanal dargestellt.

Wie die Ausführungen des vorangegangenen Kapitels verdeutlicht haben, sind bei der Nutzung der Abwasserwärme zahlreiche Restriktionen zu beachten. Zur Nutzung der Abwasserwärme sind zunächst WT-Elemente einzubringen. Sofern die Gewinnung der Abwasserwärme im Kanal vorgenommen werden soll, sind die „kanalisationsseitigen" Restriktionen zu berücksichtigen, welche auf Anforderungen zur Erfüllung der Entwässerungsaufgabe basieren. Zudem sind „wärmetauscherbezogene" Restriktionen zu beachten, die auf den Anforderungen hinsichtlich der Eignung von Kanalabschnitten für den Einbau von Wärmetauscher-Elementen beruhen. Diese Restriktionen lassen sich zu Gewinnungsrestriktionen zusammenfassen. Unter Berücksichtigung der Gewinnungsrestriktionen lassen sich die für die Wärmegewinnung geeigneten Kanalisationsabschnitte, und darauf basierend das (Wärme-)Gewinnungspotenzial ermitteln.

Weitere Restriktionen treten beim Absatz der Wärme auf. Derartige Vermarktungsrestriktionen sind sowohl auf Seiten der Anbieter der Wärmeenergie, i.e. EVU, als auch auf Seiten der Nachfrager festzustellen. Da die Gewinnungs- und Vermarktungsrestriktionen, die zugleich erfüllt sein müssen, voneinander unabhängige Ereignisse darstellen, sind nicht alle für die Gewinnung der Abwasserwärme geeigneten Kanalisationsabschnitte zugleich auch für die Vermarktung geeignet.

Schließlich schlagen sich auch divergierende Interessen, Präferenzen und Bereitschaften der involvierten Akteure zur Realisierung eines AWN-Projektes in noch zusätzlich zu berücksichtigenden Realisierungsrestriktionen nieder.

Insgesamt ist deutlich herauszustellen, dass es für die potenzielle Realisierung erforderlich ist, dass zugleich sowohl sämtliche technischen Anforderungen als auch sämtliche ökonomischen Anforderungen aller involvierten Akteure erfüllt sein müssen. Um einen Eindruck von dem Potenzial der Wärmenutzung aus Abwasserkanälen zu gewinnen, erfolgt nunmehr eine differenzierte Betrachtung der unterschiedlichen Potenzialstufen. Erst darauf aufbauend kann eine aussagekräftige und belastbare Abschätzung des Marktpotenzials sowie der energiewirtschaftlichen und umweltpolitischen Effekte der Wärmerückgewinnung in Abwasserkanalisationen vorgenommen werden. Um also ein Bild von dem Potenzial der Abwasserwärmenutzung in NRW zu erhalten, sind auf der Grundlage der Gewinnungs-, Vermarktungs- und Realisierungsrestriktionen die jeweils zugehörigen Gewinnungs-, Vermarktungs- und Realisierungspotenziale zu ermitteln. Sodann kann eine Aussage zum Marktpotenzial getroffen werden.

Bei der differenzierten Ableitung der verschiedenen Potenzialstufen der Abwasserwärme im Kanal finden die nachfolgenden Begriffe und Definitionen Anwendung.

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

➢ Theoretisches Abwasserwärmepotenzial

Trägermedium des Wärmepotenzials ist das Abwasser. Als Abwasserwärmepotenzial ist auf einer ersten Stufe das Produkt aus der innerhalb einer bestimmten Periode anfallenden Abwassermenge und der maximal entnehmbaren Wärmeenergie (Temperaturdifferenz) zu verstehen.

➢ (Wärme-)Gewinnungspotenzial

Die Gewinnung der Wärmeenergie aus Abwasser findet in Kanalisationen statt. Nicht alle Kanalisationsabschnitte sind gleichermaßen für den Einbau und Betrieb von Wärmetauschern geeignet. Unter Berücksichtigung der entwässerungs- und wärmetauscherbezogenen Restriktionen lassen sich für die Wärmerückgewinnung geeignete Kanalisationsabschnitte ermitteln. Das Gewinnungspotenzial, das ebenfalls als theoretischer Wert zu interpretieren ist, lässt sich überschlägig als Produkt aus Länge der geeigneten Kanäle und mittlerer Wärmeentnahme je Kanalmeter ermitteln.

➢ Vermarktungspotenzial

Auf der dritten Stufe bestehen Anforderungen an die Vermarktung der Wärmeenergie, bspw. hinsichtlich des Volumens und der Struktur des Wärmebedarfs und der Distanz zwischen den Orten der Wärmegewinnung und –nutzung. Insgesamt lassen sich derartige Restriktionen in einer Vermarktungswahrscheinlichkeit bündeln. Diese Wahrscheinlichkeit ist ein Maß für die simultane Erfüllung aller hinsichtlich der Vermarktung bestehenden Anforderungen sämtliche Akteure. Mit anderen Worten gibt die Vermarktungswahrscheinlichkeit Auskunft darüber, mit welcher Wahrscheinlichkeit auf der Grundlage des Gewinnungspotenzials das Vermarktungspotenzial zu ermitteln ist: Das Vermarktungspotenzial lässt sich als Produkt aus dem Gewinnungspotenzial und der Vermarktungswahrscheinlichkeit berechnen.

➢ Realisierungspotenzial

Auf der vierten Stufe schließlich kommt das Realisierungspotenzial unter Berücksichtigung weiterer Restriktionen seitens der Netzbetreiber, der EVU und der Nachfrager zustande. Zunächst lassen sich unter Berücksichtigung der Präferenzen, dem Grad der Risikoaversion und der freien Kapazitäten der involvierten Akteure die prinzipiell realisierungsfähigen Kanalabschnitte abschätzen. Dabei trifft die NB insbesondere das Risiko, dass Vorleistungen möglicherweise nicht kompensiert werden. In diesem Zusammenhang spielt die Risikopräferenz der Netzbetreiber insofern eine Rolle als unter risikoscheuen NB eine ablehnende Haltung gegenüber einem AWN-Engagement tendenziell häufiger vorzufinden sein wird. Darüber hinaus ist zu berücksichtigen, dass die prinzipiell realisierungsfähigen Kanalisationsabschnitte nicht vollständig mit WT-Elementen ausgestattet werden können, da die maximale Länge von WT-Anlagen mit 200 m angegeben wird. Somit ist bei der Abschätzung des Realisierungspotenzials noch ein"technischer Verschnitt" zu berücksichtigen. Erst auf dieser Grundlage kann eine Aussage zum theoretisch realisierungsfähigen Potenzial der Wärmerückgewinnung in NRW getroffen werden. Insgesamt münden die o.g. Realisierungsrestriktionen in den Faktor „Realisierungswahrscheinlichkeit“. Da die Gewinnungs-, Vermarktungs- und Realisierungsrestriktionen zugleich einzuhalten sind, ergibt sich das Realisierungspotenzial als Produkt aus der Realisierungswahrscheinlichkeit und dem Vermarktungspotenzial. Das Realisierungspotenzial stellt diejenige theoretische Größe dar, bis zu der sich das Wärmeangebot unter den gegebenen Restriktionen maximal entwickeln kann. Das Realisierungspotenzial eignet sich zudem zur Abschätzung der potenziellen energiewirtschaftlichen und umweltpolitischen Effekte der Wärmerückgewinnung aus Abwasserkanalisationen.

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

➢ Wärmeangebot

Das Wärmeangebot ist losgelöst von dem Begriff des Abwasserwärmepotenzials (1. Stufe) zu verstehen. Von einem Wärmeangebot kann letztlich nur insofern und in dem Umfang gesprochen werden, wie Wärmeproduktion tatsächlich stattfindet und diese Wärmeenergie den Verbrauchern auch angeboten wird. Somit kommt ein Wärmeangebot auf der Grundlage einer fallspezifischen Wirtschaftlichkeitsberechnung erst infolge der Gewinnung und Vermarktung von Wärme mittels Wärmetauscher im Abwasserkanal zustande. Unter dem Wärmeangebot ist somit nichts anderes zu verstehen als derjenige Teil des maximal realisierbaren Potenzials, der tatsächlich mittels WT in Kanälen produziert und vermarktet wird.

Zur Potenzialermittlung können unterschiedliche methodische Wege beschritten werden. Im Rahmen dieser Forschungsarbeit werden zwei alternative Wege vorgestellt, die unterschiedlichen Sichtweisen und Methoden folgen. Im einzelnen sind dieses eine energetisch orientierte Globalabschätzung des Büros eam sowie eine evolutorische Potenzialabschätzung unter Berücksichtigung zeitlicher und akteursbezogener Restriktionen. Letztere bezieht sich allerdings ausschließlich auf den Bereich der Wärmerückgewinnung in Abwasserkanalisationen.

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

5.2 Gesamtheitliche Betrachtung des theoretischen Wärmepotenzials – Beitrag von Ernst A. Müller (Büro eam)

5.2.1 Vorgehen

5.2.1.1 Ausgangslage und Wirtschaftlichkeit der Anlagen

Bereits im Handbuch "Energie in Kläranlagen" des Umweltministeriums von Nordrhein-Westfalen wurde 1999 auf das große Potenzial der Wärme im Abwasser zur Beheizung von Tausenden von (Kläranlagen-externen) Gebäuden hingewiesen.[190] Auch die Kläranlagen- und Kanalbetreiber, die in der Begleitgruppe des Handbuches vertreten waren (wie Ruhrverband, Wupperverband, Köln, Düsseldorf) und die Experten der Hochschulen (RWTH Aachen) haben die Nutzung der Abwasserwärme grundsätzlich unterstützt.

In Waiblingen (Baden-Württemberg) steht seit 18 Jahren eine Wärmepumpenanlage in Betrieb, welche die Wärme aus dem Abwasser der Kläranlage nutzt. Die Stadtwerke, welche diese Abwasser-wärmenutzungsanlage betreiben, und der Bürgermeister äussern sich positiv zum Betrieb und möchten nun auch die Nutzung aus dem Kanal angehen. Insgesamt wurden in Deutschland fünf Abwasserwärmenutzungsanlagen realisiert (in Leverkusen, Linden, Güstrow, Singen und eben Waiblingen). Zudem wurden in jüngster Zeit Dutzende von Studien an konkreten Objekten durchgeführt.[191]

Eine Forschungsarbeit der Deutschen Bundesstiftung Umwelt von eam, Ryser AG und Eco.s zeigt, dass die Abwasserwärmenutzung machbar und wirtschaftlich vertretbar ist und einen Beitrag zur CO_2- und Primärenergie-Reduktion leisten kann.[192] Die Endenergieeinsparungen der Abwasserwärmenutzung liegen gegenüber konventionellen Heizanlagen bei etwa der Hälfte, die Primärenergieeinsparungen bei einem Drittelund die CO_2-Reduktion bei rund einem Viertel, wie nachfolgend noch detailliert erläutert wird. Im Rahmen dieser DBU-Forschungsarbeit werden ein Dutzend Machbarkeitsstudien an konkreten Objekten (4 davon in NRW) über die Abwasserwärmenutzung aus dem Kanal ausgewertet, die Resultate werden Anfangs 2005 publiziert. Die Machbarkeitsstudien wurden von den Kommunen in Auftrag gegeben und in enger Zusammenarbeit mit der Bauherrschaft und auch den Kanalnetzbetreibern erstellt. Bei den Objekten handelt es sich vorwiegend um bestehende Bauten mit öffentlichem Charakter, bei denen die Heizanlagen saniert werden müssen, aber auch um zwei Wohnsiedlungen und zwei Neubauten. In allen Fällen wird die Abwasserwärme aus dem Kanal gewonnen, abgesehen von zwei Ausnahmen aus bestehenden Kanälen. Bei den zwei Neubausiedlungen wird in diesem Gebiet auch ein neuer Kanal gebaut. In den Machbarkeitsstudien wurden sämtliche Kapitalkosten für zusätzlich notwendige Investitionen und alle zusätzlichen Betriebs- und Unterhaltskosten berücksichtigt, wie sie mit den Bauherrschaften sowie mit den Kanalnetzbetreibern abgesprochen wurden. Die Wärmetauscher wurden so groß dimensioniert, dass auch unter Berücksichtigung einer entsprechenden Verschmutzung kein zusätzlicher Reinigungsaufwand notwendig wird.

Die Auswertungen der Machbarkeitsstudien zeigen, dass die Abwasserwärmenutzungsanlagen heute bei diesen Objekten im Vergleich zur Sanierung oder dem Neubau von konventionellen Heizungen (Erdöl oder Erdgas) - bei heutigen Energiepreisen - je nach Ausgangslage die gesamten Gestehungskosten um 0 % bis 30 % teurer sind. Mit Fördergeldern, wie sie z.B. vom MUNLV in Leverkusen oder auch heute von der DBU für Entwicklungs- und Demonstrationszwecke zur Verfügung gestellt

---

190 Vgl. MUNLV (1999), Müller, E.A./B. Kobel (2001).

191 Vgl. Schmid, F./Müller, E.A. (erscheint demnächst), Stodtmeister, W. (erscheint demnächst).

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

wurden, sind diese Anlagen bereits heute für die Betreiber betriebswirtschaftlich. Aufgrund der Erfahrungen mit ähnlichen Technologien (Luft-Wärmepumpen in der Schweiz) und aufgrund z.Z. geprüften Weiterentwicklungen der WT (von der Planung, über Einbau, Herstellung, Unterhalt, etc.), gehen wir davon aus, dass sich die Gestehungskosten der Abwasserwärmenutzung in den nächsten Jahren und mit zunehmender Verbreitung nochmals schätzungsweise um einen Fünftel bis einen Drittel senken lassen. Damit wird der Einsatz der Abwasserwärmenutzung - bei den gestellten Anforderungen aus den vorangehenden Kapiteln - betriebswirtschaftlich konkurrenzfähig, auch bei bestehenden Bauten im Rahmen von Heizungssanierungen und beim Einbau in bestehende Kanäle. Durch eine eventuelle Energiepreisteuerung wird dieser Prozess einerseits beschleunigt und andererseits verstärkt, d.h. Abwasserwärmenutzungsanlagen könnten dann sogar kostengünstiger werden als konventionelle Heizanlagen.

5.2.1.2 Methode und Grundlagen

Auf diesem Hintergrund stellt sich die Frage, wie groß das Potenzial der Abwasserwärmenutzung in NRW ist, einerseits theoretisch aufgrund des verfügbaren Wärmeinhaltes, vor allem aber das zukünftig realisierbare Potenzial und die entsprechenden Auswirkungen auf die Energie- und CO_2-Bilanzen. Gestützt auf die verfügbaren Datengrundlagen in NRW und den Erfahrungen in Deutschland und der Schweiz wird deshalb im Rahmen des gemeinsamen Forschungsvorhabens von eam/IKT/Ryser das Potenzial der Abwasserwärmenutzung in Nordrhein-Westfalen abgeschätzt. Dabei muss berücksichtigt werden, dass die Umsetzung dieser Potenziale zunächst eine Einführungsphase braucht, die eine Förderung der Weiterentwicklung der Technologie und einer Förderung von weiteren Demonstrationsprojekten bedingt und einer aktiven Informationskampagne und Beratung von Kommunen, Kläranlagen- und Kanalbetreibern und nicht zuletzt auch von potenziellen Bauherren. Erst danach erfolgt die verbreitete Umsetzung. Diese erstreckt sich über einen Zeithorizont von 20 Jahren, da der Einsatz der Abwasserwärmenutzung bei bestehenden Objekten meistens im Rahmen der Heizungssanierung erfolgt und diese alle rund 20 Jahre durchgeführt wird.

Die Abwasserwärmenutzung ist einerseits von energietechnischen Fragen abhängig und andererseits von den Fachbereichen Abwasserreinigung und Kanalisationsbetrieb. Aus diesem Grunde ist es entscheidend, dass bei Studien, Strategieüberlegungen, Planungen oder Realisierungen bei der Abwasserwärmenutzung immer Fachleute aus beiden Bereichen vertreten sind. Dieses Thema kann weder von Energiefachleuten alleine noch von Leuten aus dem Abwasserfach alleine behandelt werden, es braucht immer beide. In der nachfolgenden Herleitung der Potenzialabschätzung gehen wir davon aus, dass die grundlegenden fachtechnischen Kenntnisse aus beiden Fachbereichen bekannt sind. Ansonsten können sie der spezifischen Fachliteratur nachgelesen werden.

Das Potenzial wurde primär in Bezug auf die Energienutzung aus den Abwasserkanälen für das gesamte Land Nordrhein-Westfalen berechnet. Im Hinblick auf eine gesamtheitliche Betrachtung wurde zudem das Potenzial aus gereinigtem Abwasser, also bei mit einem Wärmeentzug in oder nach der Kläranlage, abgeschätzt. Nach nicht berücksichtigt werden konnten hingegen die Industriekläranlagen, die angesichts der großen Abwassermengen (2,3 Mrd. m3 pro Jahr, bei kommunalen Kläranlagen vergleichsweise 2,9 Mrd. m3 pro Jahr) und der vermutlich höheren Temperaturen über ein größeres theoretisches Abwasserwärmepotenzial verfügen als die kommunalen Kläranlagen. Die Frage, wieviel davon realisiert werden kann, kann hier nicht genauer abgeschätzt werden, dazu braucht es eine zusätzliche Forschungsarbeit.

---

[192] Vgl. Schmid, F./Müller, E.A. (erscheint demnächst), Stodtmeister, W. (erscheint demnächst).

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

5.2.1.3 Stufenweises Vorgehen

Zunächst basiert die Potenzialabschätzung auf der heutigen Ausgangslage, bezüglich Abwasseranfall und Temperatur, heutiger Gebäudestruktur und heutiger erprobter Technologie. Für die Potenzialabschätzung muss aber auch eine realistische Entwicklung für die nächsten 20 bis 25 Jahre berücksichtigt werden, also für den ganzen Umsetzungszeitraum. In den Schlussfolgerungen in Kapitel 6 werden deshalb weitere Aspekte berücksichtigt und Überlegungen gemacht, wie sich das Potenzial in Zukunft entwickeln könnte. Die Potenzialermittlung erfolgt für folgende vier Stufen:

Tab. 1-1 Vier Stufen der Potenzialermittlung

1. Theoretisches Abwasserwärmepotenzial:

Potenzial das bei einer Abkühlung des gesamten Abwassers in NRW auf 5°C besteht.

2. Gewinnungspotenzial:

Potenzial, das unter Einhaltung der Anforderungen des Kläranlagen- und Kanalbetriebes gewonnen werden kann.

3. Vermarktungspotenzial:

Jener Anteil vom Gewinnungspotenzial, der von potenziell geeigneten Abnehmern, die in vertretbarer Nähe der geeigneten Kanalabschnitten oder Kläranlagen liegen, auch genutzt werden könnte.

4. Realisierbares Wärmepotenzial:

Im Rahmen der Ableitung des realisierbare Potenzial sind weitere, bisher nicht berücksichtigte Restriktionen der Akteure einzubeziehen.

Bei allen 4 Stufen muss beim Wärmepotenzial zwischen der Leistung, die in kW gemessen wird, und dem jährlichen Verbrauch (kWh/a), unterschieden werden. Beim Jahresverbrauch muss zwischen Nutzenergie- und Endenergieverbrauch sowie dem Primärenergieverbrauch differenziert werden. Der Nutzenergieverbrauch lässt sich aus dem Wärmeleistungsbedarf multipliziert mit den Vollbetriebstunden berechnen, der Endenergieverbrauch ergibt sich aus dem Nutzenergieverbrauch zuzüglich der Verluste. Oder anders gesagt, das Verhältnis Nutz- zu Endenergieverbrauch über das ganze Jahr betrachtet ergibt den Jahresnutzungsgrad, die Differenz zu 100 % sind dementsprechend die jährlichen Verluste. Damit Endenergie, z.B. Heizöl oder Strom bereitgestellt werden kann, müssen diese aus Primärenergie aufbereitet werden, also z.B. aus Kohle, Brennstoffen, Wasserkraft, Uran, etc. Zwischen diesen zwei Stufen geht Energie verloren, z.B. bei den thermischen Kraftwerken - je nach dem ob auch Fernwärme genutzt wird - in der Regel bis zu 70 %. Das Verhältnis Primär- zu Endenergie-Verbrauch wird Primärenergiefaktor genannt. Bei der Leistung wird vom Beitrag, der aus dem Abwasser gewonnen wird, auf die gesamte Leistung der bivalenten Anlage, also inklusive Spitzenkessel umgerechnet, damit anschließend auch auf die Nutzenergie und den Endenergieverbrauch der verschiedenen Energieträger umgerechnet werden kann.

5.2.1.4 Hochrechnung auf der Basis von vier Gemeindegrößenklassen

Die Potenziale der Abwasserwärme und insbesondere der realisierbare Anteil sind sehr stark von der Größe der Gemeinden abhängig. Deshalb wurden die Kommunen in NRW in vier Größenklassen (nach Einwohnerzahl) unterteilt und das Potenzial

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

für jede einzelne Größenklasse anhand einer mittleren Gemeinde untersucht. Die Hochrechnung erfolgte für jede Größenklasse proportional zur Zahl der Einwohner. Die Einteilung der insgesamt 396 Kommunen in NRW nach Größenklasse erfolgte gemäß nachfolgender Tabelle.[193] Die beiden oberen Größenklassen nehmen in NRW bereits zwei Drittel der Einwohner ein, die oberen drei Größenklassen beinahe 90%.

Tab. 1-2: Einteilung der Gemeinden für Hochrechnung nach Größenklassen

Gemeindeklassen (nach Einwohnern)	bis 20.000	20-50.000	50-200.000	über 200.000	Total NRW
Anzahl Kommunen	178	141	62	15	396
Anteil	*45%*	*35%*	*16%*	*4%*	*100%*
Einwohnerzahl in Mio.	2,3	4,4	5,1	6,3	18,1
Anteil	*12%*	*24%*	*29%*	*35%*	*100%*

Darstellung: Büro eam

5.2.1.5 Unterschiedliche Wärmepumpen-Strategien

Die Wärmepumpe kann Wärme aus der Umgebung, also z.B. aus dem Abwasser, auf ein höheres Temperaturniveau bringen und damit für Heizzwecke nutzbar machen. Für den Antrieb der Wärmepumpe muss Energie aufgewendet werden, daneben aber kann "kostenlose" Wärme aus der Umgebung genutzt werden.

Bei den Wärmepumpen muss bezüglich Energiebilanz zwischen zwei unterschiedlichen Strategien unterschieden werden:

- EWP: Elektromotor-Wärmepumpen
- WP + BHKW: kombinierte Anlage mit Wärmepumpe und Blockheizkraftwerk

Im Fall der EWP wird die Wärmepumpe mit (hochwertigem) Strom aus dem Netz angetrieben. Bei der kombinierten Anlage WP + BHKW wird die Wärmepumpe durch das Blockheizkraftwerk angetrieben, das BHKW wiederum wird mit Brennstoffen, also vor allem Erdgas angetrieben. Das BHKW ist für die nachfolgenden Überlegungen, was auch häufig der Praxis entspricht, so ausgelegt, dass es - zumindest über mehrere Tage betrachtet - gerade den gesamten Strombedarf der Wärmepumpe decken kann und keinen Überschuss produziert. Gleichzeitig kann auch die Abwärme aus dem BHKW genutzt werden. Energetisch entspricht die Variante WP + BHKW den früheren Gaswärmepumpen, die sich nicht durchgesetzt haben und vom Markt wieder verschwunden sind. Die Strategie WP + BHKW ist technisch einfacher als die früheren Gaswärmepumpen, da beide Elemente vielfach erprobt sind und auch auf Tages- oder Wochenzeiten mit besonders günstige Tarifen und auch auf die Entwicklung von Energiepreisen flexibler reagiert werden kann.

Die kombinierte WP+BHKW-Anlage kann im Vergleich zur Variante Elektromotor-Wärmepumpen - je nach Erdgas- und Strompreisen - durchaus wirtschaftlich konkurrenzfähig sein, wie diverse Machbarkeitsstudien an Fallbeispielen in Deutsch-

[193] Vgl. LDS (2004c).

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

land und NRW zeigen.[194] Die kombinierte WP+BHKW-Anlage kann gemäß Tab. 1-3 mit einer bestimmten Wärmemenge aus dem Abwasser von 100 % einen Wärmeleistungsbedarf von 325 % abdecken, eine EWP lediglich 250 %. Bei einem begrenzten Wärmeangebot aus dem Abwasser kann also mit der WP+BHKW-Anlage ein rund 30 % größerer Wärmeleistungsbedarf abgedeckt werden als mit der EWP. Zudem erübrigt sich bei WP+BHKW-Variante die fachlich und politisch schwierige Frage nach der Bewertung des zusätzlichen Stromverbrauches, da nur Erdgas und kein zusätzlicher Strom verbraucht wird.

Wir gehen bei der Potenzialabschätzung grundsätzlich von bivalent parallelen Anlagen aus, bei beiden Varianten EWP oder kombinierte WP + BHKW. Diese Strategie wird auch meistens in der Praxis gewählt, aus wirtschaftlichen Überlegungen und zur Erhöhung der Sicherheit. Die Abwasser-Wärmepumpe deckt die Grundlast ab, an den kältesten Tagen wird eine konventionelle Erdöl- oder Erdgasheizung zur Spitzendeckung zugeschaltet. Der Spitzenkessel wird i.d.R. auf die gesamte Leistung ausgelegt, damit er in Not- oder Extremsitutionen die gesamte Leistung abdecken kann. Wir gehen davon aus, dass die Wärmepumpe auf einen Drittel des gesamten Wärmeleistungsbedarfes ausgelegt wird. Damit kann die Wärmepumpe bei den klimatischen Verhältnissen in NRW rund 67% des jährlichen Nutzenergieverbrauches abdecken.[195] Die restlichen 33 % des Nutzenergieverbrauches übernimmt der Spitzenkessel und verbraucht dazu fossile Brennstoffe (üblicherweise Erdöl oder Erdgas).

5.2.1.6 Energie-Bilanzen der unterschiedlichen Wärmepumpen-Strategien

Die kombinierte WP + BHKW-Anlage braucht für das BHKW, die WP und die Spitzendeckung also ausschließlich Brennstoffe und verursacht keinen Strombezug, die EWP-Variante verbraucht Strom vom Netz und fossile Brennstoffe für die Spitzendeckung. Die Energie-Bilanz ist bei der WP+BHKW und der EWP-Variante also sehr unterschiedlich, was sich entsprechend auch in der CO_2-Bilanz nieder schlägt. Dies wird am gleichen Objekte im Vergleich zu einer konventionellen Heizung aufgezeigt. Ausgegangen wird vom Endenergieverbrauch der konventionellen Heizung (= 100 %). Als Jahresnutzungsgrad wird 80 % eingesetzt.[196]

Ausgehend von 100 % Endenergieverbrauch liegt der Nutzenergieverbrauch dementsprechend bei 80 %. Der Spitzenkessel deckt von diesem Nutzenergieverbrauch 33 % ab und die Wärmepumpe 67 % ab, also 54 % des Ausgangswertes. Bei einer angenommenen Jahresarbeitszahl der Wärmepumpentechnologie von 4,25 braucht die EWP für den Antrieb 12,6 % Endenergie in Form von Strom, zusammen mit dem Brennstoffverbrauch für die Spitzendeckung 45,6 % Endenergie oder nur etwa halb soviel wie ein konventioneller Kessel. Die Reduktion ergibt sich durch die Nutzung der Wärme, welche die Wärmepumpe aus dem Abwasser gewinnt und zum anderen aus der Verminderung der Verluste, da die Wärmepumpe - im Gegensatz zu einem konventionellen Kessel - keine Verluste aufweist. Je nachdem woher der Strom für die Wärmepumpe stammt, ist der Primärenergieverbrauch bei der EWP-Variante aber wesentlich höher als der Endenergieverbrauch.

Bei der kombinierten WP+BHKW-Anlage wird kein zusätzlicher Strom verbraucht (Annahme: Hilfsenergieverbrauch bleibt gleich), sondern nur fossile Brennstoffe. Bei einem angenommenen Wirkungsgrad des BHKW von 35 % elektrisch und 50 % thermisch verbraucht die kombinierte Anlage 27,0 % fossile Brennstoffe, zusammen mit der Spitzendeckung 60,0 %. Die

194 Vgl. Stodtmeister, W. (2005).

195 Vgl. Stodtmeister, W. (2005) und Wuppertal Institut (o.J.).

196 Vgl. Stodtmeister, W. (2005).

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

Endenergie-Einsparungen liegen bei 40,0 % gegenüber einer konventionellen Heizung, die Primärenergie-Einsparungen ebenfalls, da immer die gleichen fossilen Brennstoffe (mit dem gleichen Primärenergiefaktor) verbraucht werden. Entsprechend groß ist auch die Reduktion an CO_2-Emissionen.

Tab. 1-3: Endenergiebilanzen der Varianten Elektromotor-Wärmepumpen und Wärmepumpe + BHKW im Vergleich zu einer konventionellen Erdöl- oder Erdgasheizung mit 100% Endenergie

	konv. Kessel	EWP	WP+BHKW
Brennstoffverbrauch Kessel	100%	33%	33%
Brennstoffverbrauch WP/BHKW	0%	0%	27,0%
Stromverbrauch WP/BHKW	0%	12,6%	0%
Endenergieverbrauch	100%	45,6%	60,0%
Einsparung Endenergieverbrauch	0%	54,4%	40,0%
Verminderung Verluste		14,4%	9,3% *
Wärme aus Abwasser		40,0%	30,7%

* unter Berücksichtigung Mehrverbrauch durch Verluste BHKW

Darstellung: Büro eam

In den aufgezeigten Energie- und CO_2-Bilanzen wurde der Aufwand für die "graue" Energie noch nicht berücksichtigt, also der Aufwand für die Herstellung der Anlagenteile, Transporte und den Bau der Anlage. Die "graue" Energie fällt aber kaum ins Gewicht, da gemäß einer detaillierten Ökobilanz an konkreten Anlagen zur Abwasserwärmenutzung aus dem Kanal in der Schweiz der Anteil der Belastung aus dem Betrieb 95% ausmacht, der Anteil der Infrastruktur lediglich 5%.[197] Damit verschlechtert sich die Energie- oder CO_2-Bilanz der Abwasserwärmenutzung gegenüber einer konventionellen Heizung bei einer gesamtheitlichen Betrachtung inklusive des Aufwandes für die Infrastrukturen lediglich um rund 2 - 4%.

Nachfolgend werden die Wärmepotenziale an vier typischen Gemeinden für jede Gemeindgrößenklasse auf Basis der kombinierten Variante WP + BHKW aufgezeigt. Hochgerechnet werden die Werte pro Größenklasse über die Anzahl Einwohner. In der Hochrechnung und der Reduktion des Primärenergieverbrauches und der CO_2-Emission werden auch die Ergebnisse der Hochrechnung für die EWP-Variante aufgezeigt und das Potenzial aus Industrieläranlagen berücksichtigt.

5.2.2 Energie-Bilanzen der unterschiedlichen Wärmepumpen-Strategien

5.2.2.1 Wärmeinhalt im Abwasser

5.2.2.1.1 Abwasseranfall

Der Wärmeinhalt im Abwasser kann aus dem Produkt der nutzbaren Abwassermenge und der möglichen Abkühlung des Abwassers berechnet werden. Aus 1 m^3 Wasser kann pro 1 Kelvin Abkühlung eine Wärmeleistung von 1,163 kW gewonnen werden. Damit kann eine kombinierte WP+ BHKW-Anlage – inklusive der Abwärme des BHKW 175% oder 2,03 kW nutzbare Wärmeleistung bereitstellen. Die gesamte Anlage inklusive Spitzenkessel erbringt somit eine Wärmeleistung von 524% oder 6,10 kW pro m^3 Abwasser oder 0,056 kW pro Einwohner. Bei der Variante EWP liegen diese Werte bei 4,56 kW pro m^3 Abwasser und 0,42 kW pro Einwohner.

[197] Vgl. Frischknecht R./M. Faist Emmenegger (2004).

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

Der gesamte Abwasseranfall der kommunalen Kläranlagen in NRW lag 2001 bei 2,959 Mrd. m^3 pro Jahr; 32 % davon ist Regenwasser.[198] Bezogen auf die gesamte Zahl der Einwohner in NRW von 18,1 Mio. Einwohner ergibt dies einen gesamten Abwasseranfall von 163 m^3 pro Einwohner und Jahr. Grundsätzlich spielt es für die Wärmenutzung keine Rolle, ob es sich bei (gleicher) Abwassermengen um Schmutz- oder Mischwasser handelt, hingegen ist bei Trennsystemen im Winter eine höhere Abwassertemperatur vorzufinden. Vom Abwasseranfall kann aber wegen der Tagesschwankungen und kurzfristiger Niederschläge nicht die gesamte Wassermenge für die Wärmerückgewinnung genutzt werden. Da keine Untersuchungen darüber existieren, wird nachfolgend eine Abschätzung gemacht.

Der Abwasseranfall steigt je nach Regenereignis kurzfristig mehr oder weniger stark an. Es ist in der Praxis - aus wirtschaftlichen Überlegungen - nicht üblich, die Wärmetauscher auf solche extremen Spitzen auszulegen. Ein Teil der Regenwassermenge kann durchaus von Wärmetauschern in jenen Zeiten genutzt werden, wenn sie noch nicht voll ausgelastet sind. Ein größerer Teil des kurzfristig anfallenden Regenwasser, wir schätzen zwei Drittel, bringt hingegen keine Leistungssteigerung. Auch aufgrund der Tagesschwankungen des Abwasseranfalles von plus/minus 30 % vom Tagesmittel können insbesondere bei voller Auslastung der WT an den kältesten Wintertagen die Tagesspitzen noch genutzt werden, in der Übergangsjahreszeit hingegen schon. Wir gehen deshalb davon aus, dass die Hälfte von diesen 30 % nicht genutzt werden kann.

Durch diese zwei Einschränkungen sinkt der nutzbare Abwasseranfall von 163 m^3 um 21 % auf 128 m^3 und durch die Tagesschwankungen um weitere 15 % auf 109 m^3 pro Einwohner und Jahr.

5.2.2.1.2 Abwassertemperatur

Wärmepumpe können Abwasser problemlos auf 5° C abkühlen. Bei einem Wärmeentzug vor der Kläranlage darf die Abwassertemperatur schlussendlich in der Kläranlage gemäß den Erläuterungen in den vorangegangenen Kapiteln nicht beliebig abgekühlt werden,[199] nach der Kläranlage ist eine weitere Abkühlung auf 5° C im Winter auch für die Gewässer in der Regel unproblematisch. Ausgehend von den aktuellen Abwassertemperaturen in der Kläranlage kann deshalb die zulässige Abkühlung aus dem Kanal bzw. nach der Kläranlage festgelegt und der Wärmeinhalt berechnet werden.

In unseren Berechnungen haben wir noch nicht berücksichtigt, dass sich in den kältesten Wintermonaten das abgekühlte Abwasser in den Kanälen wieder minimal erwärmt. Dieser Aspekt wurde nicht berücksichtigt, so dass das Potenzial effektiv noch etwas höher ausfallen würde als hier berechnet wird.

Über die Abwassertemperaturen der Kläranlagen in NRW liegen keine verfügbaren Datengrundlagen vor. Freundlicherweise stellten für die Auswertungen der Ruhrverband und der Wupperverband umfangreiches und detailliertes Datenmaterial zur Verfügung. Ergänzt mit Angaben von weiteren, vor allem großen Kläranlagen standen damit Temperaturdaten von über 30 Anlagen zur Verfügung. Damit konnte für jede Größenklasse das Mittel der Abwassertemperaturen von Kläranlagen in NRW ermittelt werden.

Für den Wärmeentzug sind die drei Monate Dezember, Januar und Februar entscheidend, da diese mit Abstand den größten Anteil der ganzjährigen Heizgradtage einnehmen. Diese drei Monate sind auch limitierend für Wärmepotenzial, da in den

198 Vgl. MUNLV (erscheint in Kürze).

199 Vgl. Buri, R. et al. (2004), Wanner, O. (2004b).

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

restlichen Monaten der Wärmeinhalt wegen den höheren Temperaturen deutlich ansteigt und wesentlich größer ist als der sinkende Wärmebedarf in der Übergangszeit und im Sommer und damit das Potenzial nicht mehr einschränken.

Die Mittelwerte der Abwassertemperaturen in diesen drei Monaten D/J/F liegen bei Kläranlagen mit einer Kapazität für 10.000 bis 20.000 Einwohner im Mittel bei 9° C und steigen bei den größeren Kläranlagen erwartungsgemäß deutlich an. Bei den großen Kläranlagen mit 500.000 Einwohnern liegt die Abwassertemperatur im Mittel bei 14° C (siehe nachfolgende Tabelle).

5.2.2.2 Theoretisches Abwasserwärmepotenzial

Die Abwassertemperaturen liegen bei den kleinen Gemeinden mit 15.000 Einwohnern im Mittel bei 9° C (vgl. nachfolgende Tabelle). Das theoretische Potenzial aus dem Kanalabwasser ergibt sich bei einer Abkühlung des gesamten Abwassers auf 5° C - was jedoch vor der Kläranlage nicht zulässig ist. Daraus resultiert ein theoretisches Abwasserwärmepotenzial - gemessen am Wärmeleistungsbedarf der gesamten bivalenten Heizanlage inkl. Spitzendeckung - von 3.617 kW, bei den großen Gemeinden mit 500.000 Einwohnern von 288.197 kW.

Tab. 2-1: Abwassermenge und -temperaturen und daraus hergeleitetes Wärmepotenzial nach Gemeindegrößenklassen (Variante WP + BHKW)

Gemeindeklassen	bis 20.000	20-50.000	50-200.000	über 200.000 Einw.
typische Gemeinde	15.000	30.000	100.000	500.000 Einw.
Abwassermenge pro Einw.				
Anfall insgesamt	163 m^3/a	163 m^3/a	163 m^3/a	163 m^3/a
davon nutzbar	109 m^3/a	109 m^3/a	109 m^3/a	109 m^3/a
Abwassertemperatur (Mittel Dez./Jan./Feb.)	9°C	9,5°C	11°C	14°C
Abkühlung Abwasser:				
- im Kanal	0,5 K	0,75 K	1,5 K	3,0 K
- nach Kläranlage	3,5 K	3,75 K	4,5 K	6,0 K
Total	4,0 K	4,5 K	6,0 K	9,0 K
Wärmeleistung WP+BHKW (inkl. Spitzenkessel)				
- im Kanal	570 kW	1.711 kW	11.408 kW	114.083 kW
- nach Kläranlage	3.047 kW	6.529 kW	26.117 kW	174.114 kW
Total	3.617 kW	8.240 kW	37.525 kW	288.197 kW

Darstellung: Büro eam

5.2.2.3 Gewinnungspotenzial

Wir gehen beim Potenzial vor der Kläranlage bei den kleinen Gemeinden mit 15.000 Einwohnern - gestützt auf die vorgängigen Untersuchungen im Rahmen dieses Forschungsprogrammes - davon aus, dass das Abwasser vor der Kläranlage von 9° C um 0,5 K abgekühlt werden kann, bei den großen Anlagen von 14° C um 3 K auf 11° C. Daraus ergibt sich ein Potenzial gemessen an der Leistung der gesamten bivalenten Heizanlage inkl. Spitzendeckung bei den Gemeinden mit durchschnittlich 15.000 Einwohnern von 570 kW, bei den großen Gemeinden mit 500.000 Einwohnern von 114.083 kW. Wie die nachfolgenden Ausführungen zeigen, sind für die Nutzung dieser Potenziale auch ausreichend geeignete Kanäle verfügbar, so dass diese Zahlen dem Gewinnungspotenzial entspricht.

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

Das Kanalisationsnetz in NRW weist eine Länge von 87.307 km auf.[200] Das ergibt auf die gesamte Zahl der Einwohner in NRW bezogen 4,8 m pro Einwohner. Leider existieren keine Datengrundlagen über die spezifische Kanallängen nach Gemeindegrößen, so dass angenommen wird, dass diese angesichts der größeren Siedlungsdichte bei den großen Gemeinden mit durchschnittlich 500.000 Einwohnern tiefer und bei den kleinen Gemeinden mit 15.000 Einwohnern höher liegt.

Für die Wärmenutzung sind nur Schmutz- und Mischwasserkanalisation oder insgesamt 77,7 % der gesamten Kanalisation geeignet; Regenwasserkanalisation hingegen nicht. Zudem sind nur Kanalisationsleitungen mit einem Durchmesser über 80 cm geeignet, das sind 11,8 % der gesamten Kanallänge.[201] Insgesamt sind also 8.008 km oder 9,2 % der gesamten heute bestehenden Kanalisation für die Wärmenutzung geeignet, 40 % davon werden in den nächsten 20 Jahren saniert. Leider existieren auch zu diesen zwei Kriterien keine Datengrundlagen nach Gemeindegrößen, so dass angenommen wird, dass der geeignete Anteil der Kanallänge angesichts der höheren Siedlungsdichte bei den großen Gemeinden höher liegt (12 %) und den kleinen Gemeinden tiefer (6 %). In den kleinen Gemeinden mit 15.000 Einwohnern lassen sich rund 5 km geeignete Kanallänge finden, in den großen Gemeinden 280 km.

Im Nachhinein stellte sich heraus, dass diese Annahmen für die Potenzialrechnung nicht relevant sind, weshalb auf weitere Untersuchungen verzichtet wurde.

Tab. 2-2: Kanallänge nach Gemeindegrößenklassen

Gemeindegröße	15.000	30.000	100.000	500.000 Einw.
heute bestehende Kanäle:				
spezifische Länge pro Einw.	5,5	5	4,8	4,6 m/Einw.
total Länge	82	150	480	2300 km
davon geeignet	6 %	8 %	9 %	12 %
geeignete Kanallänge	5	12	40	280 km
davon saniert innerhalb von 20 Jahren	3	5	16	112 km
Kanalisationsneubau über 20 Jahre:	1	2	7	35 km
Wärmeentzug aus Abwasser	109	326	2.176	21.764 kW
notwendige Kanallänge	0,04	0,13	0,87	8,7 km

Darstellung: Büro eam

Im Mittel kann pro Laufmeter Kanalleitung von den Wärmetauschern 2,5 kW Wärmeleistung aus dem Abwasser entnommen werden. Von der gesamten Wärmeleistung in den kleinen Gemeinden mit 15.000 Einwohnern inklusive Spitzenkessel von 570 kW stammen 109 kW aus der Wärme, die dem Abwasser entnommen wird. Somit wird dafür eine Kanallänge von 0,044 km benötigt. Das Angebot an geeigneten bestehenden Kanälen beträgt demgegenüber rund 5 km, ist also mehr als 100-mal größer. Auch in den großen Gemeinden mit 500.000 Einwohnern ist das Angebot von geeigneten Kanälen rund 30 mal größer als der

200 Vgl. MUNLV (erscheint in Kürze).

201 Vgl. Berger, C. (2001).

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

Bedarf. Da rund 40 % von den geeigneten Kanälen innerhalb des Betrachtungszeitraumes von 20 Jahren saniert werden, und der Einbau der WT in diesen Fällen günstiger ist, ist der Sanierungsfall von Kanälen keine Bedingung, aber ein Vorteil für den Bau von Abwasserwärmenutzungsanlagen. Dieser Vorteil trifft noch vermehrt für den Kanalisationsneubau zu. Von den jährlich in NRW neu gebauten 700 km sind 64,2 km für den WT-Einbau geeignet, was über 20 Jahre 1.284 km oder 0,07 m pro Einwohner ergibt. Das entspricht in der kleinen Gemeinde rund 1 km geeignete Länge Kanalisationsneubau und bei den großen Gemeinden rund 35 km. Alleine die Länge des Kanalisationsneubau reicht um ein Mehrfaches aus, den Bedarf an geeigneter Kanallänge decken zu können.

Wie die Ausführungen gezeigt haben, sind auch ausreichend geeignete Kanalabschnitte verfügbar. Alleine die Kanalisationsneubauten würden ausreichen, so dass das theoretische Abwasserwärmepotenzial auch dem Gewinnungspotenzial entspricht.

5.2.2.4 Vermarktungspotenzial

In der Schweiz wurden in zahlreichen Gemeinden individuelle Untersuchungen gemacht, wie viele potenziell geeignete Abnehmer und wie viele Standorte sich davon für die Abwasserwärmenutzung sowohl in technischer als auch in wirtschaftlicher Hinsicht eignen könnten. Geeignete Standorte erfüllen dabei sowohl die Anforderungen an die Abnehmer (Größe, Vorlauftemperatur, etc.) als auch die Anforderungen an die Kanäle (über 80 cm Durchmesser, ausreichender Wärmeinhalt) und an die Lage (Distanz Abnehmer zum Kanal). Leider wurden in Deutschland noch keine solchen Standortabklärungen durchgeführt. Wir haben deshalb die Ergebnisse aus der Schweiz ausgewertet und auf die 4 Gemeindeklassen übertragen. Dazu wurde die Anzahl der potenziell geeigneten Abnehmer auf eine Standardanlage mit einer mittleren Leistung von 500 kW (inkl. Spitzenkessel) umgerechnet.

In Gemeinden mit 15.000 Einwohnern sind aufgrund der Schweizer Erfahrungen hochgerechnet im Mittel 9 Standorte geeignet und gleichzeitig auch wirtschaftlich vertretbar, also rund 8-mal mehr als vom Wärmeangebot aus dem Abwasser benötigt werden, bei den Gemeinden mit 500.000 Einwohnern sind es mehr als doppelt so viele geeignete Abnehmer. Es sind also unter obigen Annahmen ausreichend Abnehmer zu finden.

Das Vermarktungspotenzial ist also gleich groß, wie das Gewinnungspotenzial, es wird nicht durch die Abnehmerseite eingeschränkt.

Bedingung für diese Schlussfolgerung ist, dass sich in NRW die Struktur der Abnehmer nicht sehr stark von den Schweizer Verhältnissen unterscheiden bzw. in den gleich großen Gemeinden in NRW wesentlich weniger Gebäude von dieser Größe zu finden sind. Standortabklärungen an ausgewählten Gemeinden könnten zu dieser Frage weitere Aufschlüsse geben.

5.2.2.5 Realisierungspotenzial

Das Vermarktungspotenzial basiert bereits auf wirtschaftlichen Randbedingungen. Es wird deshalb davon ausgegangen, dass das Vermarktungspotenzial weitgehend umgesetzt werden kann, insbesondere da im Vergleich zum Bedarf

- rund 40 mal mehr geeignete Kanallänge zur Verfügung stehen,
- rund 3 mal mehr Abnehmer für eine wirtschaftliche Nutzung geeignet sind

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

- und deshalb die vorteilhaftesten Standorte bezüglich Kanal (Neubau oder Sanierung, günstiger Einbau) und Abnehmer (große Objekte, nahe bei Kanal oder einfache Erschließung, ev. Klimabedarf oder hoher Warmwasserbedarf im Sommer) ausgewählt werden können.

Bezüglich der Kanalnetzbetreiber darf anhand der Erfahrungen mit Studien und Realisierungen festgehalten werden, dass die meisten Betreiber der Abwasserwärmenutzung positiv und mit einem gewissen Interesse gegenüber stehen, die offenen Fragen aber durchaus sehr kritisch hinterfragen und beurteilen. Bisher haben die Betreiber in NRW - abgesehen von einer Ausnahme - nach ausführlichen Informationsgesprächen und Diskussionen dem Einbau der WT zugestimmt und sogar unterstützt. Wir gehen aber davon aus, dass es in NRW auch zahlreiche Betreiber geben könnte, die heute in der Abwasserwärmenutzung ein gewisses Risiko sehen und deshalb zurückhaltend sind. Wir gehen deshalb davon aus, dass diese Zurückhaltung zu einer Verzögerung der Umsetzung führt, die risikoscheuen Betreiber im Zuge der Verbreitung und der gemachten Erfahrungen einerseits und aufgrund des öffentlichen Drucks andererseits ihre Zurückhaltung in den nächsten 20 Jahren abstreifen werden.

Unter diesen Annahmen könnte das gesamte Vermarktungspotenzial realisiert werden. Dieses Realisierungspotenzial aus dem Kanal liegt bei Gemeinden mit 15.000 Einwohnern bei 570 kW und bei großen Gemeinden mit 500.000 Einwohnern bei 114.083 kW, immer gemessen an der gesamten Leistung der WP+BHKW-Anlage inklusive Spitzenkessel.

Tab. 2-3: Vermarktungs- und realisierbares Wärmepotenzial

Gemeindeklassen	bis 20.000	20-50.000	50-200.000	über 200.000 Einw.
typische Gemeinde	15.000	30.000	100.000	500.000 Einw.
Anzahl Abnehmer (umgerechnet in eine Standardanlage mit 500 kW Wärmeleistung WP+BHKW, inkl. Spitzendeckung)				
- im Kanal				
- Bedarf	1	3	23	228
- vorhanden	9	20	90	500
- nach Kläranlage				
- Bedarf	5	13	52	348
- vorhanden	1	2	5	15
nutzbarer Anteil vom Gewinnungspotenzial:				
- im Kanal	100%	100%	100%	100%
- nach Kläranlagen	21%	15%	10%	4%
Vermarktungs- und realisierbares Wärmepotenzial (Wärmeleistung WP+BHKW; inkl. Spitzenkessel)				
- im Kanal	570 kW	1.711 kW	11.408 kW	114.083 kW
- nach Kläranlage	625 kW	1.000 kW	2.500 kW	7.500 kW
Total	1195 kW	2.711 kW	13.908 kW	121.583 kW

Darstellung: Büro eam

5.2.3 Potenzial nach Kläranlagen in typischen Gemeinden

5.2.3.1 Theoretisches Abwasserwärmepotenzial

Das theoretische Wärmeangebotspotenzial nach der Kläranlage ist gleich gross wie vor der Kläranlage und liegt bei 7,7 MW Wärmeleistung inklusive Spitzenkessel für die Variante WP + BHKW und bei 6,1 MW bei der Variante EWP.

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

5.2.3.2 Gewinnungspotenzial

Wir *[d.h. Büro eam, Anmerkung des Verfassers]* gehen davon aus, dass in den Kläranlagen oder im Auslauf zu den Vorflutern ausreichend Möglichkeiten bestehen, um das theoretische Potenzial zu nutzen. Deshalb entspricht auch hier das theoretische Abwasserwärmepotenzial dem Gewinnungspotenzial.

5.2.3.3 Vermarktungspotenzial

Auch über die Abwasserwärmenutzung nach der Kläranlage muss auf die Erfahrungen in der Schweiz zurückgegriffen werden.

Bei kleinen Gemeinden liegen die Kläranlagen häufig etwas abseits des Siedlungsgebietes. Das Gebiet zwischen dem Siedlungsgebiet und der Kläranlage wird vom Siedlungsrand her aber vermehrt überbaut, insbesondere mit Gewerbe- und Industriebauten, aber auch mit Verwaltungs- und Wohnbauten. Dabei ist zu berücksichtigen, dass in diesem Gebiet zwischen Kläranlage und solchen Neubaugebieten, weil es noch nicht überbaut ist, Leitungen und insbesondere kalte Fernwärmeleitungen in der Regel kostengünstig verlegt werden können. Dies erlaubt eine Nutzung von Abwasserwärme auch über größere Distanzen von mehr als 1 km. In großen Gemeinden wie Köln, Düsseldorf, etc. liegen die großen Kläranlagen mitten im Siedlungsgebiet, weshalb eine größere Zahl von geeigneten Abnehmern in der Nähe liegen. Die Leitungen sind pro Laufmeter teurer, wenn aber mehrere große Abnehmer angeschlossen und allenfalls die Hauptsammler zum Einbau der Nahwärmeleitungen benutzt werden können, kann trotzdem ein Umkreis von über 500 m sinnvoll erschlossen werden.

Wir schätzen aufgrund dieser Ausgangslage, dass in den kleinen Gemeinden mit 15.000 Einwohnern im Mittel ein bis eineinhalb potenzielle Standorte liegen, bei den großen Gemeinden von 500.000 Einwohnern ca. 15 Standorte à 500 kW. Das Vermarktungspotenzial wird durch die potenziellen Abnehmer sehr stark eingeschränkt. Bei den Gemeinden mit 15.000 Einwohnern kann das Gewinnungspotenzial nur zu rund einem Fünftel und in den großen Gemeinden mit 500.000 Einwohnern zu einem Zwanzigstel ausgeschöpft werden (vgl. Tab. 2-3). Es liegt bei Gemeinden mit 15.000 Einwohnern bei 625 kW und steigt bei den bei Gemeinden mit 500.000 Einwohnern - nicht linear - auf 7.500 kW an.

5.2.3.4 Realisierungspotenzial

Das Realisierungspotenzial entspricht dem Vermarktungspotenzial. Um zuverlässigere Aussagen über das Potenzial der Abwasserwärmenutzung nach der Kläranlage machen zu können, wären detaillierte Analysen bzw. Fallstudien wertvoll und auch sinnvoll, insbesondere in Bezug auf die potenziell geeigneten Standorte.

5.2.4 Hochrechnung Realisierungspotenzial

Über die Anzahl Einwohner wurde für jede Gemeindeklasse ausgehend vom Potenzial der typischen Gemeinden das Wärmepotenzial für NRW hochgerechnet, sowohl für die Variante WP+BHKW als auch für die Variante EWP.

Insgesamt ergibt sich in NRW ein theoretisches Abwasserwärmepotenzial, das auch dem Gewinnungspotenzial entspricht, von 6,9 Mio. kW. Mit der Variante WP + BHKW ist das Potenzial um rund 10 % höher, mit der Variante EWP um 10 % niedriger. Vom Gewinnungspotenzial ist ein Drittel umsetzbar, so dass das Realisierungspotenzial bei 2,5 Mio. kW liegt.

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

Tab. 4-1: Vom theoretischen Abwasserwärmepotenzial zum theoretischen Realisierungspotenzial

Wärmeleistung in MW (inkl. Spitzenkessel)	WP+BHKW	EWP	Total
Theoretisches Abwasserwärmepotenzial = Gewinnungspotenzial	7,7 MW	6,1 MW	6,9 MW
nutzbarer Anteil	35%	35%	35%
Vermarktungspotenzial = Realisierungspotenzial	2,8 MW	2,2 MW	2,5 MW

Darstellung: Büro eam

Das Realisierungspotenzial der Abwasserwärmenutzung aus dem Kanal und aus kommunalen Kläranlagen liegt in NRW bei 2,5 Mio. kW inkl. Spitzenleistung. Das entspricht rund 5.000 Anlagen à 500 kW.

Der größte Teil des Potenzials entfällt auf die Kanalnutzung (82 %), etwa ein Fünftel auf die zusätzliche Nutzung nach der Kläranlage. Die Wärmenutzung aus dem Kanal ist vor allem bei den großen Kommunen interessant. Alleine die 15 Städte mit mehr als 200.000 Einwohnern verfügen über 61 % des Potenzials. In Bezug auf die gesamte Abwasserwärmenutzung, einerseits aus dem Kanal und andererseits in/nach der Kläranlage, verfügen die 67 größten Kommunen mit über 50.000 Einwohnern über 79 % des Potenzials.

Bei der Wärmenutzung aus gereinigtem Abwasser nach der Kläranlage verfügen auch die kleineren Gemeinden mit z.B. 5.000 Einwohnern noch über ein größeres Wärmeangebot, mit dem zwei Standardanlagen à 500 kW versorgt werden können. Im Einzelfall ist zu prüfen, ob sich Abnehmer (bestehende Bauten oder Neubaugebiete) um Kläranlagen herum befinden.

Tab. 4-2: Vermarktungs- und realisierbares Wärmepotenzial in NRW

Gemeindeklassen (Einwohner)	bis 20.000	20-50.000	50-200.000	über 200.000	Total
Variante WP+BHKW (Wärmeleistung in Mio. kW):					
aus Kanal	86	251	590	1433	2360
in/nach Kläranlage	94	147	129	94	464
Total	180	398	719	1528	2825
Anteil	*6%*	*14%*	*25%*	*55%*	*100%*
Anzahl Anlagen à 500 kW	359	795	1438	3056	5649
Variante EWP (Wärmeleistung in Mio. kW):					
aus Kanal	64	188	442	1073	1767
in/nach Kläranlage	94	147	129	94	464
Total	158	335	571	1167	2231
Anteil	*7%*	*15%*	*26%*	*52%*	*100%*
Anz. Anlagen à 500 kW	316	669	1142	2335	4461
Total NRW mit beiden Varianten (Wärmeleistung in Mio. kW):					
aus Kanal	75	220	516	1253	2064
in/nach Kläranlage	94	147	129	94	464
Total	169	367	645	1347	2528
Anteil	*7%*	*15%*	*26%*	*53%*	*100%*
Anz. Anlagen à 500 kW	338	732	1290	2695	5055

Darstellung: Büro eam

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

5.3 Abschätzung des theoretischen Wärmepotenzials – Darstellung eines evolutorischen Ansatzes am Beispiel der Wärmerückgewinnung in Abwasserkanalisationen

5.3.1 Vorgehensweise

Der evolutorische Ansatz zur Abschätzung des Potenzials der Wärmerückgewinnung in Abwasserkanalisationen setzt an den technischen und wirtschaftlichen Restriktionen zur Nutzung der Abwasserwärme an. Es fließen ferner akteursbezogene Restriktionen der NB, EVU sowie der Wärmenachfrager in die Betrachtung ein. Unter Berücksichtigung dieser Restriktionen lassen sich über die Stufen der Abschätzung des Gewinnungspotenzial und des Vermarktungspotenzials im Ergebnis realisierungsfähige Kanalisationsabschnitte sowie jährliche Realisierungspotenziale der Wärmeentnahme aus der Kanalisation ermitteln. Dem Faktor „Zeit“ kommt bei der Abschätzung des Realisierungspotenzials eine besondere Rolle zu; insofern ist es sinnvoll, den Entwicklungsgang einer möglichen Potenzialentfaltung auch im Lichte eines evolutorischen Ansatzes zu betrachten. Dabei werden zunächst die Einflussgrößen dargestellt, die auf die Dynamik der Potenzialentwicklung einwirken. Vor diesem Hintergrund erfolgt sodann eine Ableitung von theoretischen Potenzialpfaden, wobei – ausgehend vom Status-quo – die Stoßrichtung der zuvor dargestellten Einflussgrößen sichtbar gemacht wird.

5.3.2 Gewinnungspotenzial

5.3.2.1 Anforderungen an die Kanalisation zur Wärmerückgewinnung

Für die Gewinnung von Wärme aus der Abwasserkanalisation können nur spezielle Abschnitte der Kanalisation eingesetzt werden, d.h. die technische Umsetzung knüpft an Bedingungen an, die durch die Kanalisation vorgegeben sind. Die Identifikation der für die Verwendung der Wärmetauscher prinzipiell geeigneten Kanalabschnitte, auf deren Grundlage letztendlich das theoretische Wärmegewinnungspotenzial in NRW ermittelt wird, basiert auf den nachfolgend aufgeführten Anforderungskriterien.

Prinzipiell ist der Einbau von Wärmetauschern in Kanalabschnitte technisch machbar, wenn[202]

die Entwässerungsfunktion während und nach Einbau von Wärmetauschern nicht nachteilig beeinflusst wird,

- die grundlegenden Leistungsanforderungen an einen Kanal (Standsicherheit, Funktionsfähigkeit, Dichtheit) erfüllt sowie die Betreibbarkeit gewährleistet sind,
- sich die Anforderungen an die Arbeitssicherheit umsetzen lassen,
- Wartung und Instandsetzung von Kanal und Wärmetauschern möglich sind,
- der Kanal mindestens einen Innendurchmesser von 80 cm aufweist (DN 800, begehbarer Kanal) und
- der mittlere Trockenwetter-Abfluss 15 l/s beträgt.

Für die Beurteilung der Eignung bestehender Kanalisationsabschnitte ist somit vor Ort zu untersuchen, ob bspw.

[202] Siehe oben, Kapitel 4, S. 69 ff.

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

- eine Verkleinerung des Kanalquerschnitts infolge des Einbaus von Wärmetauschern mit der Entwässerungsaufgabe vereinbar ist,
- Kanalabschnitte den geforderten Mindestdurchmesser sowie den geeigneten Mindestabwasserabfluss aufweisen und
- der betreffende Kanalabschnitt für die Dauer des Einbaus (ein- bis zwei Wochen) von Abwasser frei gehalten werden kann.

Darüber hinaus ist zu berücksichtigen, dass es für die wirtschaftliche Tragfähigkeit eines Einbaus von WT-Elementen in bestehende Kanalisationen bedeutsam ist, dass Planung und Durchführung der Baumaßnahme im Rahmen einer Sanierung des entsprechenden Kanalisationsabschnittes erfolgen. Während im Fall der Sanierung Teile der auftretenden Planungs-, Bau- und Verkehrssicherungskosten der Sanierungsmaßnahme zugerechnet werden können, fallen bei isolierter Installation der AWN-Anlage sämtliche Kosten der Anlage als alleinigem Kostenträger zu. Sofern in der Literatur zur Wirtschaftlichkeit von Anlagen zur Nutzung der Abwasserwärme die Aussage getroffen wird, dass diese durchaus positiv sein kann, haben Rückfragen mit den Verfassern gezeigt, dass für die Berechnungen der Wirtschaftlichkeit günstige Randbedingungen unterstellt werden. D.h. es wird die durchaus legitime Annahme getroffen, dass der Kanal zugleich saniert wird. Nunmehr lässt sich zeigen, dass die Rentabilität der AWN-Anlage Einschnitte erfährt, wenn diese isoliert durchgeführt werden soll und die relevanten Kosten der Maßnahme angelastet werden: Die Bremerhavener Energiemanagement Agentur GmbH (bea) und die Gesellschaft für produktionsintegrierte Umweltsystemtechnologien und –management mbH (prosys) haben in einer Potenzialstudie zur Abwasserwärmenutzung in Bremerhaven drei Fallbeispiele auch einer wirtschaftlichen Betrachtung unterzogen. In einem der Fallbeispiele, bei dem Wärmerückgewinnung im Kanal untersucht wurde, wird eine Amortisationszeitraum der Anlage von 13 Jahren ermittelt. Auf Nachfrage wurde dem IKT – Institut für Unterirdische Infrastruktur mitgeteilt, dass den Berechnungen die Annahme zugrunde liegt, dass der Einbau der WT-Elemente im Rahmen einer Sanierung des Kanals stattfindet. Zudem wurden interne Kosten der Netzbetreiber nicht berücksichtigt. Fallen jedoch zusätzliche Kosten in Höhe von nur 14.300 € (bzw. 20.900 €) an, wird unter den in der Studie getroffenen Annahmen eine Amortisation innerhalb der erwarteten Lebensdauer von 20 Jahren (bzw. 25 Jahren) nicht erreicht. Bereits bei geringfügig erhöhten Kosten, die deutlich unterhalb der o.g. Beträge liegen, stellen sich spürbare Rentabilitätseinbußen ein. Bei einer Erhöhung der Kosten um 5.000 € verringert sich der Überschuss c.p. um 25 % (Laufzeit 25 Jahre) bzw. um 57 % (Laufzeit 20 Jahre).[203]

Vor dem Hintergrund dieses Beispieles grundsätzlicher Natur ist eine Eignung eines Kanalisationsbestandes zur Rückgewinnung von Abwasserwärme v.a. dann zu erwarten, wenn dieser auch die wirtschaftlich begründete Anforderung erfüllt, dass

- die Planung und die Durchführung des Einbaus der WT-Elemente in den Kanal im Rahmen der Planung und Durchführung einer Sanierungsmaßnahme des entsprechenden Kanalabschnittes erfolgt.

[203] Vgl. bea / prosys (2004), S. 34 ff.

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

Kanalabschnitte, die zugleich die oben genannten Kriterien erfüllen, eignen sich in besonderer Weise für eine wirtschaftlich tragfähige Nutzung der Abwasserwärme.[204]

Die Aspekte der Aufrechterhaltung der grundlegenden Kanalfunktionen, der Arbeitssicherheit, der Wartungs- und Instandhaltungserfordernisse der Kanalisation sind sowohl für den Kanalbestand als auch für Neubaumaßnahmen relevant. Der Einbau von Wärmetauschern im Zuge von Neubaumaßnahmen weist gegenüber der Alternative des nachträglichen Einbaus in bestehende Kanalisationsabschnitte den bestechenden Vorteil auf, dass in der Planungsphase noch ein Spielraum zur Berücksichtigung der o.g. Anforderungen besteht, bspw. hinsichtlich des Kanaldurchmessers. Somit können in der Planungsphase die Weichen in Richtung auf technische Machbarkeit gestellt werden und die Anforderungen wirken weniger restriktiv.

Die Auswirkungen der oben dargestellten Restriktionen auf das technisch und wirtschaftlich vertretbare Potenzial (hier: Gewinnungspotenzial) werden in den nachfolgenden Kapiteln jeweils für den Kanalisationsbestand und die Kanalisationsneuerrichtungen behandelt.

5.3.2.2 Gewinnungspotenzial im Kanalisationsbestand

Zur Ermittlung der potenziellen Wärmerückgewinnung in der bestehenden Abwasserkanalisationen wird folgende Vorgehensweise beschritten: Zunächst erfolgt auf der Basis des Kanalisationsbestandes in Nordrhein-Westfalen eine Abschätzung der Gesamtlänge der geeigneten Kanalabschnitte. Dieses geschieht unter Beachtung der zuvor dargestellten Anforderungen. Sodann wird für die geeigneten Längen das gewinnbare Wärmepotenzial auf der Basis der Wärmeleistung berechnet, das von Wärmetauschern je Meter Kanalleitung aus dem Abwasser entnommen werden kann.

Bei einem Anschlussgrad von 96,6 % der über 18 Mio. Einwohner Nordrhein-Westfalens ist für die Sammlung, den Transport, die Reinigung und die Einleitung des Abwassers in die Vorfluter eine umfangreiche Entwässerungsinfrastruktur erforderlich. Dementsprechend weist der Bestand der kommunalen Abwasserkanalisation in NRW nach einer Erhebung des LDS NRW eine Länge von 87.307 km auf.[205] Die Kanalisation wird teils als Mischwasserkanalisation, teils als Trennkanalisation genutzt. Die Mischwasserkanalisation, in der die häuslichen und gewerblichen Abwässer (Schmutzwasser) sowie Regenwasser gemeinsam in einem Kanalsystem abgeleitet werden, weist eine Länge von 44.848 km auf. Die Trennkanalisation, bei der Schmutz- und Niederschlagswasser in gesonderten Kanälen abgeleitet werden, weist insgesamt eine Länge von 42.459 km auf. Zur Ableitung des Schmutzwassers stehen 23.016 km Schmutzwasserkanalisation und zur Ableitung von Niederschlagswasser stehen 19.443 km Regenwasserkanalisation zur Verfügung.[206]

---

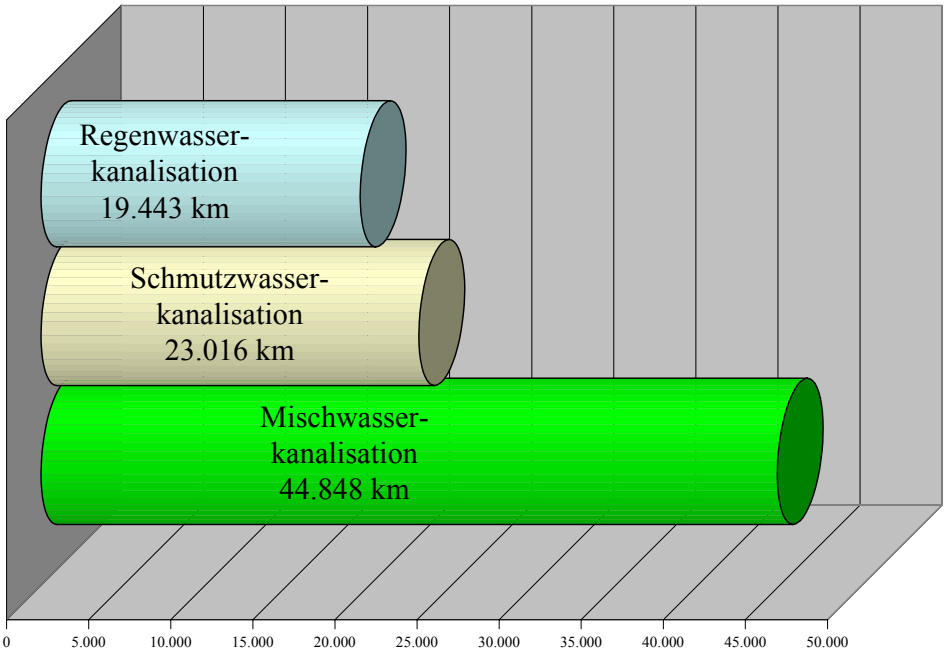
[204] Vor dem Hintergrund der oben dargestellten Kriterien lassen sich geeignete Kanalisationsabschnitte identifizieren, die für die Rückgewinnung von Abwasserwärme in besonderer Weise geeignet erscheinen. Im Einzelfall ist eine Entscheidung jedoch erst auf der Grundlage einer individuelle Wirtschaftlichkeitsberechnung zu treffen.

[205] Vgl. LDS NRW (2003).

[206] Die Längen der Misch- und Schmutzwasserkanalisation in den Regierungsbezirken betragen im RB Arnsberg 16.043 km (davon 82 % Mischkanalisation), im RB Detmold 10.714 km (davon 35 % Mischkanalisation), im RB Düsseldorf 15.448 km (davon 65 % Mischkanalisation), im RB Köln 16.077 km (davon 72 % Mischkanalisation) und im RB Münster 9.582 km (davon 58 % Mischkanalisation). Vgl. MUNLV (2005), S. 11 f.

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

Misch-, Schmutz- und Regenwasserkanalisation in NRW in km (Stand 2001)



Vgl. MUNLV (2005), S. 12.

Die Unterscheidung der Kanalisationssysteme ist für die Ermittlung des Gewinnungspotenzials relevant, da die Regenwasserkanalisation aufgrund des diskontinuierlichen Auftretens von Niederschlagsereignissen die Anforderung des Mindestabflusses nicht erfüllt und damit für die Wärmerückgewinnung nicht geeignet ist. Da also ausschließlich Schmutz- und Mischwasserkanalisationen eine grundsätzliche Eignung für die Wärmerückgewinnung aufweisen, verbleibt ein fortan zu betrachtender Kanalisationsbestand mit einer Länge von 67.864 km.

Ein weiteres Eignungskriterium besteht darin, dass der Kanal einen Mindestquerschnitt von DN 800 aufweisen muss. Hinweise über den Anteil der Kanalisation, der dieses Kriterium erfüllt, lassen sich auf der Basis einer von der ATV-DVWK im Jahr 2001 durchgeführten bundesweiten Umfrage gewinnen. Die ATV-DVWK weisen aus, dass insgesamt 9.077 km lange Kanalisationsabschnitte aus einer 77.236 km umfassenden Stichprobe einen Querschnitt größer oder gleich DN 800 aufweisen. Zugleich wird festgestellt, dass viele kleinere Gemeinden überhaupt nicht über derartige Kanäle verfügen.[207] Damit ergibt sich im Rahmen der Umfrage der ATV-DVWK ein Anteil der Kanalisation mit einem Querschnitt ≥ DN 800 in Höhe von rd. 11,8 %.[208]

---

[207] Die nachfolgenden Ausführungen basieren auf einer von ATV-DVWK bundesweit durchgeführten Umfrage. Die Datenbasis umfasst 162 Kommunen und Abwasserverbände, die 27 % der Einwohner und 18 % der Gesamtlänge der Kanalisation repräsentieren. Große Betreiber sind in der Umfrage tendenziell überrepräsentiert, der ländliche Raum (> 10.000 Einwohner) ist unterrepräsentiert. Der Schwerpunkt der Datenbasis liegt mit 92 % in den alten Bundesländern, nur 8 % der Antworten stammen aus den neuen Bundesländern. Vgl. Berger, Christian et al. (2001), S. 2 und S. 4.

[208] 12 % ergeben sich bezogen auf die Kanallänge von 77.236 km, wobei 9.077 km einen Querschnitt größer oder gleich DN 800 aufweisen. Vgl. Berger, Christian et al. (2001), S. 4.

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

Bezogen auf die nordrhein-westfälische Misch- und Schmutzwasserkanalisation erfüllen Kanalabschnitte mit einer Länge von 8.008 km die Anforderung des Mindestquerschnitts.

Unter Wirtschaftlichkeitsaspekten ist für den Einbau von WT in Abwasserkanalisationen erforderlich, dass der Einbau im Rahmen einer Sanierungsmaßnahme erfolgt, weil dann die Kosten für die Baumaßnahme und die Verkehrssicherung nicht vollständig in die Wirtschaftlichkeitsrechnung der AWN-Anlage einfließen. Daher stellt die Sanierungsbedingung eine weitere zu berücksichtigende Anforderung für die wirtschaftlich vertretbare Eignung von Kanälen zur Wärmerückgewinnung dar. In Nordrhein-Westfalen sind nach derzeitigem Wissen rd. 1,25 % der Kanalisation p.a. zu sanieren.[209] Unter Zugrundelegung der erwarteten Lebensdauer von Kanälen in Höhe von 50 Jahren kann auch eine erhöhte Sanierungsquote von 2 % angenommen werden, so dass sich jährlich 160 km der Kanalisation der Misch- und Schmutzwasserkanalisation mit einem Mindestquerschnitt von DN 800 in Sanierungsmaßnahmen befinden.

Was die Anforderung der Erfüllung der Entwässerungsaufgabe betrifft, kann ein Einbau in den Kanalisationsbestand nur dann erfolgen, wenn aus Sicht des NB die hydraulischen Erfordernisse erfüllt werden können. Dieses beinhaltet nicht nur, dass die bestehenden gesetzlichen Vorgaben zu Überlastereignissen eingehalten werden, darüber hinaus macht es für einen rational handelnden NB durchaus Sinn, aus Vorsichtserwägungen für den Fall der Verschärfung der gesetzlichen Vorgaben weitergehende Reserven vorzuhalten. Vor dem Hintergrund der bestehenden gesetzlichen Vorgaben und des Vorsichtsdenkens kann der Einbau von WT auf Ablehnung stoßen.

Als weiterer Bestandteil des Themenkomplexes „Entwässerungsaufgabe“ ist der Bereich der Abwasserhaltung bzw. der alternativen Lösung der Abwasserführung zu betrachten. Aufgrund der erforderlichen Schachterweiterung und des Einbaus der WT-Elemente ist in Abhängigkeit von den im Einzelfall vorfindbaren Randbedingungen ein zusätzlicher Zeitbedarf einzukalkulieren. Hier können u.U. technische Probleme auftreten oder Akzeptanzgrenzen erreicht werden.

Auch mit dem Hinweis auf fehlendes Wissen oder fehlende Erfahrungen im Hinblick auf die Eignung in Abhängigkeit von der materialmäßigen Beschaffenheit des Kanals (z.B. Kunststoff-Kanäle[210]) sowie auf Probleme im Kläranlagenbetrieb und aufgrund sonstiger betroffener Interessen kann eine Ablehnung von WT erfolgen.

Über diese Restriktionen liegen im Gegensatz zu den oben genannten Restriktionen keine quantifizierbaren Angaben vor. In einer Fallunterscheidung wird für die Anforderungen „Entwässerung/Wasserhaltung/Material/Sonstiges“ angenommen, dass diese in 75 % der Fälle (oberer Wert) oder in 50 % der Fälle (mittlerer Wert) erfüllt werden können. D.h. in mindestens 25 % bis 50 % der Fälle erfolgt eine Ablehnung mit dem Hinweis auf deren Nicht-Erfüllung.

Damit verbleibt im Kanalisationsbestand unter dem Strich eine Kanallänge von 80 km bis maximal 120 km, die zugleich sämtliche, hier dargestellten Anforderungen hinsichtlich der Eignung zur Wärmerückgewinnung erfüllen. Auf der Grundlage

---

209 Derzeit weisen rd. 15 % der Kanalisation kurz- und mittelfristige Sanierungsbedarfe auf. Für die Bewältigung dieser Sanierungsaufgabe ist mit einem Zeithorizont von zwölf Jahren zu rechnen (fünf Jahre für kurzfristige und weitere sieben Jahre für mittelfristige Sanierungsbedarfe). Vgl. MUNLV (erscheint in Kürze), S 32 f.

210 Der Anteil der Kanäle (DN > 800) aus Kunststoff und sonstigen Materialien lässt sich mit 2 % beziffern. Vgl. Berger, Christian et al. (2001), S. 4.

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

der für die Wärmerückgewinnung geeigneten Kanallänge und der entnehmbaren Wärmeleistung lässt sich nunmehr das Wärmegewinnungspotenzial in NRW ermitteln.

Im Mittel kann pro Laufmeter Kanalleitung von WT eine Wärmeleistung in Höhe von 2,5 kW aus dem Abwasser entnommen werden.[211] Sofern nun der zuvor ermittelte geeignete Kanalisationsbestand vollständig mit WT-Elementen ausgestattet wird und diese eine mittlere Wärmeleistung von 2,5 kW aus dem Abwasser entnehmen, errechnet sich ein jährlich erschließbares Gewinnungspotenzial in Höhe von 200.000 bis 300.000 kW.

In der nachfolgenden Tabelle sind die Auswirkungen der Anforderungen zur Ermittlung der geeigneten Kanäle und das theoretische Wärmerückgewinnungspotenzial zusammengefasst:

Wärmerückgewinnungspotenzial im Bestand der Abwasserkanalisation in NRW

Kanalisationsbestand NRW		**87.307,0 km**		
./. Regenwasserkanalisation	22,3%	-19.443,0 km		
= Misch-/Schmutzwasserkanäle		**67.864,0 km**		
./. Kanäle < DN 800	88,2%	-59.856,0 km		
= Misch-/Schmutzwasserkanäle > DN 800		**8.008,0 km**		
./. Keine Sanierung innerh. 1 Jahres	98,0%	-7.847,8 km		
= Misch- /Schmutzwasserkanäle, > DN800, Sanierung		**160,2 km**		
./. Entwässerg./Abwasserhaltg./Material/Sonstiges	25,0%	-40,0 km	50,0%	-80,1 km
= geeignete Kanäle	**0,14%**	**120,1 km**	**0,09%**	**80,1 km**

Gewinnungspotenzial im Kanalisationsbestand		
bei mittlerer Wärmeleistung (2,5 kW / m)	**300.000 kW**	**200.000 kW**

IKT – eigene Darstellung

5.3.2.3 Gewinnungspotenzial im Kanalisationsneubau

Um im Rahmen der Potenzialanalyse das Bild vom Wärmegewinnungspotenzial in NRW zu vervollständigen, wird nachfolgend der Bereich des Neubaus von Kanalisationen betrachtet. Dabei wird folgende Vorgehensweise beschritten: Zunächst erfolgt eine Abschätzung der jährlichen Neuerrichtungen von Kanalisationen in Nordrhein-Westfalen. Die Abschätzung erfolgt zum einen auf der Grundlage einer retrograden Betrachtung der jährlichen Neuerrichtungen von Kanälen. Zum anderen werden

[211] Siehe oben, Kapitel 5.2.2.3, S. 184 ff.

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

die Neuerrichtungspotenziale auf der Grundlage der in den kommunalen Abwasserbeseitigungskonzepten dokumentierten Investitionsvolumina für Neubaumaßnahmen ermittelt. Auf den auf diese Weise ermittelten Wert für den Kanalisationsneubau werden sodann die aus den Anforderungen an geeignete Kanäle abgeleiteten Restriktionen angewendet. Anders als bei der Ermittlung geeigneter Kanalabschnitte im Bestand spielen im Bereich des Neubaus die Restriktionen „Sanierung“ und „Entwässerung“ keine Rolle. Auf der Basis der auf diese Weise ermittelten geeigneten Neubau-Abschnitte wird schließlich das Wärmegewinnungspotenzial im Kanalisationsneubau errechnet.

Der Blick auf die Entwicklung des Umfangs der Kanalisation in NRW in den Jahren 1991 bis 2001 zeigt, dass in dieser Zeit rd. 13.000 km Kanalisation neu errichtet wurden.[212] Damit hat der durchschnittliche jährliche Bestandszuwachs in der Vergangenheit 1.300 km betrug.

Die kommunalen Abwasserbeseitigungskonzepte weisen in der ersten Zeitstufe für NRW im Durchschnitt ein jährliches Investitionsvolumen von 560 Mio. € für den Bereich Neubau aus.[213] Werden die durchschnittlichen Herstellkosten mit 750 € je Meter Abwasserkanalisation und die Herstellkosten für Schächte mit 2.500 € je Schacht beziffert,[214] so betragen die durchschnittlichen Herstellkosten für einen km Kanal rd. 800.000 €. Mit den eingeplanten Mitteln lassen sich somit jährlich Kanäle mit einer Länge von rd. 700 km neu errichten.

Die Abweichung zwischen den auf unterschiedliche Weise prognostizierten Kanalisationsneuerrichtungen ist beträchtlich und erklärungsbedürftig. In diesem Zusammenhang ist zunächst auf ein in jüngerer Zeit vermindertes Aktivitätsniveau im Kanalneubau hinzuweisen. Im Zug der Konzentrationsprozesse im Kläranlagenbereich – die Anzahl der Kläranlagen ist in den Jahren 1991 bis 2001 von 1.037 auf 739 zurückgegangen[215] – trat zunächst ein erhöhter Transportbedarf des Abwassers auf. Die erforderlichen Baumaßnahmen sind unterdessen durchgeführt. Es ist erkennbar, dass die Entwicklung der Neuerrichtungen seit Ende der 90er Jahre einen degressiven Verlauf aufweist.[216] Folglich ist gegenwärtig mit einem gegenüber dem oben angegebenen Durchschnittswert geringeren Ausbau des Kanalisationsbestandes zu rechnen. Hinzu kommt, dass künftige Entwicklungen im Zeichen rückläufiger Bevölkerungszahlen in NRW zu sehen sind: Die Basisvariante der Bevölkerungsprognose des LDS NRW sieht bis zum Jahr 2040 einen durchschnittlichen jährlichen Bevölkerungsrückgang um 32.000 auf 16,86 Mio. Einwohner.[217] Bei zugleich hohen Anschlussquoten ist somit eine Stagnation der Aktivitäten im Kanalisationsneubau zu erwarten.

Vor diesem Hintergrund wird für die nachfolgenden Berechnungen angenommen, dass der Umfang der jährlichen Neuerrichtungen im Kanalisationsneubau 700 km beträgt.

---

212 Der Umfang der Kanalisation in NRW ist von 1991 mit 74.350 km auf 87.300 km in 2001 gestiegen. Vgl. LDS NRW (2001), S. 10.

213 Vgl. MUNLV (erscheint in Kürze), S. 20.

214 Die mittleren spezifischen Kosten des Kanalbaus liegen bei rd. 750 € je Meter, wobei in Innenstädten weitaus höhere und in ländlichen Regionen erheblich niedrigere Kosten anfallen. Es wird unterstellt, dass sich die preissteigernden Effekte der Inflation und die kostensenkenden Effekte infolge technischen Fortschritts kompensieren. Vgl. Dohmann, Max (1997), S. 63 f.

215 Vgl. MUNLV (erscheint in Kürze), S. 8.

216 Vgl. LDS NRW (2001), S. 10.

217 Vgl www.lds.nrw.de/statistik/daten/b/d311prog.html.

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

Die Zuordnung zu den Kanalisationssystemen (Misch- und Trennsystem) sowie die Verteilung der Kanalquerschnitte erfolgt unter Verwendung der für den Kanalisationsbestand ermittelten Werte. Somit berechnet sich das Wärmerückgewinnungspotenzial im Kanalneubau wie folgt:

Wärmerückgewinnungspotenzial im Kanalisationsneubau in NRW

Kanalisationsneubau p.a.		**700,0 km**
./. Regenwasserkanalisation	22,3%	-156,1 km
= Misch-/Schmutzwasserkanäle		**543,9 km**
./. Kanäle < DN 800	88,2%	-479,7 km
= geeignete Kanäle	9,2%	**64,2 km**

Gewinnungspotenzial im Kanalisationsneubau	
bei mittlerer Wärmeleistung (2,5 kW / m)	**160.000 kW**

IKT – eigene Darstellung

Wie die obige Abschätzung des theoretischen Gewinnungspotenzials zeigt, liegt das jährlich erschließbare Potenzial im Kanalisationsneubau in Abhängigkeit von der erreichbaren Wärmeleistung bei 160.000 kW.

5.3.2.4 Vertiefende Betrachtung des Gewinnungspotenzials in Stauraumkanälen

Wie bereits dargestellt wurde, ist im Fall des nachträglichen Einbaus von Wärmetauschern in Misch- und Schmutzwasserkanäle zu berücksichtigen, dass während der Dauer des Einbaus die Fortführung der Entwässerung zu gewährleisten ist. Bei großen Schmutzwasserkanalisationen, die unabhängig von Niederschlagsereignissen eine hohe Auslastung erwarten lassen, treten Probleme bei der Abwasserhaltung bzw. der alternativen Ableitung deutlicher zutage als in der Mischkanalisation. So erfüllen in der Mischkanalisation v.a. die Stauraumkanäle (SRK) die Mindestanforderungen hinsichtlich des Kanalquerschnitts und weisen darüber hinaus in Trockenperioden weniger gravierende Probleme hinsichtlich der Vorflutsicherung auf. Zudem sind Stauraumkanäle als Alternative zur Niederschlagswasserbehandlung mittels Regenbecken v.a. in dicht besiedelten Gebieten anzutreffen. Somit besteht ein weiterer Vorteil der Stauraumkanäle im Hinblick auf die Nähe zu potenziellen Abnehmern der im Kanal gewonnenen Wärmeenergie. Nicht zuletzt wird auch die in Leverkusen befindliche Wärmetauscheranlage in einem zentrumsnahen Stauraumkanal betrieben.

Vor dem Hintergrund der Überlegung, dass bei den Stauraumkanälen am ehesten solche Kanäle zu finden sind, die den Anforderungen für den nachträglichen Einbau von Wärmetausch-Elementen entsprechen, hat das IKT – Institut für Unterirdische

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

Infrastruktur den Bestand an Stauraumkanälen in den nordrhein-westfälischen Kommunen ermittelt.[218] Um darüber hinaus eine Vorstellung von der räumlichen Verteilung des Gewinnungspotenzials in NRW zu gewinnen, hat das IKT – Institut für Unterirdische Infrastruktur eine landesweite Erhebung über den Bestand an Stauraumkanälen durchgeführt.

Die nachfolgenden Darstellungen vermitteln einen Überblick über die Anzahl, Verteilung und Lage der Stauraumkanäle in Nordrhein-Westfalen.

Auf der Grundlage der Angaben von 362 kommunalen Netzbetreibern (91,4 % der Kommunen) mit 15,6 Mio. Einwohnern (86,9%) lässt sich für Nordrhein-Westfalen ein Bestand an Stauraumkanälen in Höhe von 1.167 ermitteln. Die Einteilung der Kommunen nach Einwohnerzahl und Anzahl der Stauraumkanäle weist die nachfolgende Verteilung auf:

Stauraumkanäle in Nordrhein-Westfalen

Gesamt-Anzahl Komm.	Einwohner	Kommunen ohne Stauraumkanäle			Kommunen mit wenigen SRK (max. 4 SRK)		
		Anzahl	Einwohner	SRK	Anzahl	Einwohner	SRK
178	bis 20.000	92	1.147.167	0	64	810.630	123
141	20.000-50.000	65	1.957.852	0	41	1.260.581	82
47	50.000-100.000	19	1.317.722	0	20	1.309.840	52
30	über 100.000	6	1.280.842	0	14	3.462.136	31
396	**Summe**	**182**	**5.703.583**	**0**	**139**	**6.843.187**	**288**

Gesamt-Anzahl Komm.		Kommunen mit einigen SRK (5-10 SRK)			Kommunen mit vielen SRK (über 10 SRK)		
		Anzahl	Einwohner	SRK	Anzahl	Einwohner	SRK
178	bis 20.000 EW	17	230.675	115	5	67.318	73
141	20.000-50.000 EW	20	622.436	134	15	521.495	231
47	50.000-100.000 EW	7	503.175	47	1	64.849	18
30	über 100.000 EW	4	916.929	26	6	2.606.039	235
396	**Summe**	**48**	**2.273.215**	**322**	**27**	**3.259.701**	**557**

Umfrage des IKT – Institut für Unterirdische Infrastruktur bei nordrhein-westfälischen Netzbetreibern im Juli / August 2004

182 Kommunen mit rd. 5,7 Mio. Einwohnern verfügen nicht über Stauraumkanäle, 139 Kommunen mit 6,8 Mio. Einwohnern verfügen jeweils über maximal vier Stauraumkanäle. Aufgrund der geringen Anzahl der Stauraumkanäle werden diese Kommunen aus der weiteren Betrachtung ausgeblendet. Zwar sind auch dort möglicherweise technisch geeignete Kanalabschnitte

[218] Die Daten basieren auf einer Befragung der Netzbetreiber durch das IKT im Juli / August 2004. Von 362 kommunalen Netzbetreibern (91,4 % der Kommunen) mit 15,7 Mio. Einwohnern (86,9 %) liegen Informationen zum Stauraumkanalbestand vor. Auf der Grundlage

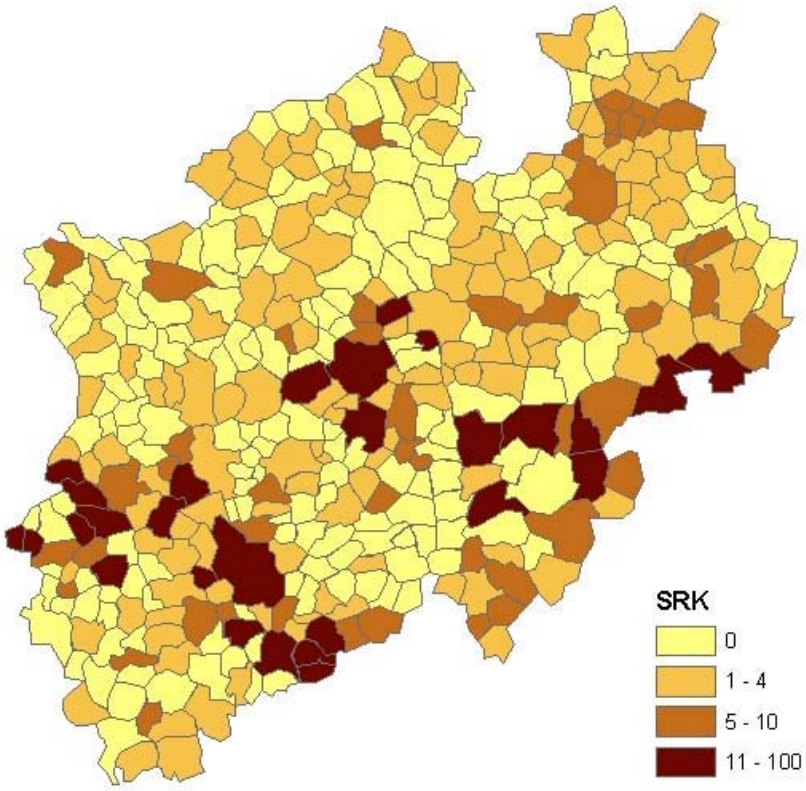
© 2005 All rights reserved by GEK mbH

vorzufinden, jedoch dürfte das größte Potenzial für die Wärmenutzung vor allem dort anzutreffen sein, wo eine Auswahl aus einer größeren Anzahl von Stauraumkanälen getroffen werden kann. Die weitere Einteilung sieht daher eine Unterteilung der Kommunen in solche mit fünf bis zehn und mit mehr als zehn Stauraumkanälen vor.

Insgesamt verfügen 75 Kommunen in NRW über einige (fünf bis zehn) oder viele (mehr als zehn) Stauraumkanäle. Diese Kommunen repräsentieren rd. 5,5 Mio. Einwohner und 879 Stauraumkanäle. Mit anderen Worten sind 75 % der Stauraumkanäle in 19 % der Kommunen mit 31 % der Einwohner zu finden. Bei einer derartigen Konzentration auf eine relativ kleine Anzahl von Kommunen ist nun von Interesse, wo sich diese Kommunen im Land befinden, d.h. es stellt sich die Frage, ob auch eine geographische Konzentration der Stauraumkanäle auf eine bestimmte Region Nordrhein-Westfalens vorzufinden ist.

Zur Darstellung der räumlichen Verteilung der Stauraumkanäle dient die nachfolgende Abbildung. Hier wird gezeigt, wo sich die Kommunen ohne, mit wenigen (1-4), mit einigen (5 – 10) und mit vielen (über 10) Stauraumkanälen befinden.

Verteilung der Stauraumkanäle in Nordrhein-Westfalen



Darstellung auf der Grundlage der Umfrage des IKT – Institut für Unterirdische Infrastruktur bei nordrhein-westfälischen Netzbetreibern im Juli / August 2004

dieser dem IKT mitgeteilten Bestandswerte ist eine Hochrechnung des Bestandes für NRW vorgenommen worden.

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

Auf der Grundlage dieser Bestandsdaten (1.167 Stauraumkanäle) kann eine weitere Abschätzung des Gewinnungspotenzials unter den Annahmen vorgenommen werden, dass

- die 1.167 SRK die Anforderung des Mindestquerschnitts zu 100 % erfüllen,
- rd. 2 % der 1.167 SRK p.a. saniert werden,
- hinsichtlich der Wärmerückgewinnung keine weiteren Restriktionen greifen und
- in jedem SRK eine AWN-Anlage mit einer Wärmeentnahme-Leistung in Höhe von 500 kW betrieben werden kann.[219]

Damit weisen alljährlich nur etwa 23 SRK günstige Ausgangsbedingungen hinsichtlich der Gewinnungsanforderungen auf. Sofern in diesen SRK AWN-Anlagen mit einer Leistung von 500 kW betrieben werden, beläuft sich das in NRW jährlich erschließbare Wärmerückgewinnungspotenzial aus bestehenden Stauraumkanälen auf 11.500 kW. Zur Abschätzung des realisierbaren Potenzials sind jedoch noch weitergehende Vermarktungs- und Realisierungsrestriktionen zu berücksichtigen.

Auch im Bereich der Neuerrichtungen soll den Stauraumkanälen ein besonderes Augenmerk zukommen. Im Anschluss an die vom IKT im Juli/August 2004 durchgeführte Befragung der nordrhein-westfälischen Netzbetreiber ist in Nordrhein-Westfalen in den nächsten Jahren (der Planungshorizont beträgt fünf Jahre) mit der Errichtung von etwa 110 Stauraumkanälen zu rechnen.[220]

Auf der Grundlage dieser Angaben ist im Durchschnitt mit der Errichtung von 22 Stauraumkanälen im Jahr zu rechnen. Die weitere Abschätzung des Gewinnungspotenzials kann nun unter den Annahmen vorgenommen werden, dass

- die 22 SRK die Anforderung des Mindestquerschnitts zu 100 % erfüllen,
- keine weiteren Restriktionen greifen[221] und
- in jedem SRK eine AWN-Anlage mit einer Leistung von 500 kW betrieben werden kann.

Damit weisen alljährlich etwa 22 SRK günstige Ausgangsbedingungen hinsichtlich der Gewinnungsanforderungen auf. Sofern in diesen SRK AWN-Anlagen mit einer Leistung von 500 kW betrieben werden, beläuft sich das in NRW jährlich erschließbare Wärmerückgewinnungspotenzial in neu errichteten Stauraumkanälen auf 11.000 kW. Zur Abschätzung des realisierbaren Potenzials sind jedoch noch weitergehende Vermarktungs- und Realisierungsrestriktionen zu berücksichtigen.

---

219 Bei einer mittleren Wärmeentnahme-Leistung von 2,5 kW je Meter WT bedarf es zur Hervorbringung einer Leistung von 500 kW einer 200 m langen WT-Anlage. Längere Anlangen werden i.d.R. nicht realisiert, da dem Abwasser nach 200 m durch zusätzlichen WT-Elemente keine weitere Wärme entnommen werden kann.

220 Die Datenbasis für die Hochrechnung der geplanten Stauraumkanäle entspricht derjenigen für die Bestandsermittlung.

221 Stauraumkanäle sind in Mischkanalisationen zu finden, daher kommt die Restriktion „Regenwasserkanalisation“ nicht zum Tragen.

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

5.3.2.5 Zusammenfassung des Gewinnungspotenzials in NRW

Das jährlich erschließbare Wärmerückgewinnungspotenzial setzt sich zusammen aus der Summe der Potenziale, die im Kanalisationsbestand und bei den Neuerrichtungen zu finden sind. Die Untersuchung hat gezeigt, dass die Anforderungen zu einer starken Einengung der für die Wärmeentnahme geeigneten Kanalabschnitte führen, erst über die Zeitachse kommt das Potenzial des Kanalisationsbestandes zur Entfaltung. Kurzfristig, d.h. alljährlich ist das Potenzial der Wärmerückgewinnung in 87.307 km umfassenden Kanalisationsbestand unter Zugrundelegung der zuvor dargestellten Restriktionen auf 80 km bis bestenfalls 120 km (d.h. auf 0,09 bis 0,14 % des Bestandes) pro Jahr beschränkt. Im Kanalisationsneubau sind die Restriktionen weniger einschneidend, da die Sanierungsrestriktion entfällt und die hydraulischen Auswirkungen des Einbaus von WT-Elementen bei der Bemessung des Kanals bereits in der Planung berücksichtigt werden können. Somit lässt sich die Länge der jährlich für die Wärmerückgewinnung geeigneten Neubauabschnitte auf 64 km abschätzen, das sind immerhin 9,1 % des jährlichen Neubauvolumens. Zusammen betragen die jährlich für die Wärmerückgewinnung erschließbaren Kanalisationsabschnitte im Bestand und im Neubau 144 bis 184 km.

Sofern eine mittlere Wärmeentnahme von 2,5 kW je Meter zugrunde gelegt wird, lässt sich unter ausschließlicher Zugrundelegung der Anforderungen an geeignete Kanalabschnitte in NRW ein jährlich erschließbares, theoretisches Potenzial der Wärmegewinnung in Höhe von 360.000 kW bis 460.000 kW ermitteln.

Die vertiefende Betrachtung von Stauraumkanälen hat gezeigt, dass dort nur ein verhältnismäßig geringer Teil des Gewinnungspotenzials generiert werden kann. Eine vorrangige Fokussierung auf diese dem Mischsystem zuzurechnenden Kanalisationsabschnitte findet somit keine Berechtigung.

5.3.3 Vermarktungspotenzial

Über die zuvor betrachteten Restriktionen hinsichtlich der Eignung von Kanalisationsabschnitten für den Einbau von Wärmetauschern hinaus sind weitere Restriktionen in Bezug auf die Vermarktung der in Abwasserkanalisationen gewonnen Wärmeenergie zu beachten. Vermarktungsrestriktionen ergeben sich zum einen angebotsseitig durch die Anforderungen der EVU.[222] Darüber hinaus sind zugleich auch nachfrageseitige Restriktionen der Liegenschaftseigentümer bzw. Wärmenutzer zu beachten. In diesem Kapitel erfolgt nunmehr die Darstellung und Bewertung

- der Bedingungen dafür, dass in Kanalisationen gewonnene Wärme von einem EVU angeboten wird,
- der Bedingungen dafür, dass die Wärmenutzer als Nachfrager auftreten und
- der Wahrscheinlichkeit, mit der diese Bedingungen simultan erfüllt sind.

Um AWN-Anlagen rentabel betreiben zu können, stellen EVU unterschiedliche Anforderungen: Wie bereits dargestellt wurde, ist die Vermarktung der Wärmeenergie v.a. in städtischen Gebieten nur innerhalb eines Radius von ca. 100 m um den Ort der Gewinnung rentabel. Innerhalb dieses Radius sind Nachfrager zu finden, die bereit sind, eine langfristige vertragliche Bindung mit einer Laufzeit von 20 bis 25 Jahren einzugehen. Ferner sollte der Wärmebedarf dieser Nachfrager langfristig konstant und kontinuierlich verlaufen sowie einen hohen Grundlastanteil aufweisen.

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

Überdies besteht ein wichtiger Faktor bei der Ermittlung des Vermarktungspotenzials in der Anforderung, eine hohe und kontinuierliche Auslastung der Abwasserwärmeanlage zu erzielen. Geeignet sind im Prinzip größere Heizanlagen mit normalen oder tiefen Vorlauftemperaturen. Hinsichtlich der Auslastung ist jedoch zu ergänzen, dass sich höhere Auslastungsgrade in Wirtschaftlichkeitsvorteile niederschlagen. Verschiedene Verbraucher sind in unterschiedlicher Weise geeignet, dieses Auslastungskriterium zu erfüllen. Eine hohe Auslastung und damit gute Eignung für AWN-Ablagen weisen insbesondere Nachfrager auf, die in den Sommermonaten Klimakälte benötigen.[223] Alternativ sind Wärmeabnehmer interessant, die einen ganzjährigen Wärmebedarf haben, bspw. Hallenbäder.

Nachfrageseitige Restriktionen können immer dann auftreten, wenn die Verbraucher bereits über Heizungsanlagen verfügen und/oder in Energielieferverträgen gebunden sind.

Um die in der Abwasserkanalisation gewonnene Wärmeenergie an den Verbraucher zu bringen, ist es erforderlich, die Liegenschaften mit Wärmepumpen auszustatten. Sofern die Verbraucher bereits über intakte Heizungsanlagen verfügen, ist es fraglich, ob hier zusätzliche Investitionen in ein WP-Heizungssystem auf eine entsprechende Nachfrage treffen. Dieses ist prinzipiell zwar nicht ausgeschlossen, hängt jedoch wesentlich von den ökonomischen Anreizen für die Verbraucher ab, d.h. von dem Umfang, in dem der zusätzliche Investitionsaufwand für die WP-Heizung durch Kostenvorteile bei der Nutzung der Anlage überkompensiert werden kann. Dieses setzt zugleich voraus, dass die EVU etwaige betriebsbezogenen Kostenvorteile an die Verbraucher weitergeben (können). In diesem Punkt zeigt sich wiederum deutlich, dass die Rentabilität einer AWN-Anlage eine wichtige Schlüsselgröße für die Vermarktungschancen darstellt.

Sofern Verbraucher noch nicht über eine Heizungsanlage verfügen oder eine alte Heizungsanlage ersetzen, entfallen die aus der o.g. Vermarktungsanforderung genannten Restriktionen, so dass die Segmente „Liegenschaftsneubau“ und „Heizungs-Ersatzinvestition“ höhere Vermarktungschancen aufweisen.

Größere Energiebedarfe werden auf der Basis von Energielieferverträgen versorgt, die in der Regel für ein Jahr, mitunter auch für längere Laufzeiten abgeschlossen werden. Insofern ist zu berücksichtigen, dass bestehende Energielieferverträge einem Wechsel des Versorgungssystems entgegenstehen können. Ein vorzeitiger Ausstieg ist zwar nicht grundsätzlich ausgeschlossen, jedoch mit zusätzlichen Kosten und daher für Nachfrager mit wirtschaftlichen Nachteilen verbunden. Vor diesem Hintergrund sind bei bestehenden Energielieferverträgen die Kündigungsfristen als weitere Restriktion bei der Ermittlung des Vermarktungspotenzials zu berücksichtigen. Zusammengefasst ist im Bestand der Liegenschaften zu beachten, ob die Möglichkeit der Kündigung des Versorgungsvertrags, der Ersatz der Altheizung und die Sanierung des Kanals in zeitlicher Hinsicht kongruent sind. Bei neu errichteten Liegenschaften, die noch nicht über Heizungsanlagen verfügen und für die noch keine Energielieferverträge abgeschlossen sind, erhöhen sich die Handlungsspielräume freilich.

Im Anschluss an die Darstellung angebots- und nachfrageseitiger Bedingungen für die Vermarktung stellt sich nunmehr die Frage, mit welcher Wahrscheinlichkeit das Eintreten dieser Bedingungen erwartet werden kann. Wie das Gewinnungspotenzial

---

222 Siehe oben, Anforderungen der Energieversorger, Kapitel 4.3, S. 165 ff.

223 Der Absatz von Klimakälte ist aus zwei Gründen von erheblicher Bedeutung für den wirtschaftlichen Erfolg des Einsatzes von WT-Elementen in Abwasserkanalisationen: Eine erhöhte Rentabilität ist zum einen infolge der besseren Auslastung der WT-Anlage, zum anderen aufgrund der größeren preispolitischen Spielräume auf dem Markt für Klimakälte zu verzeichnen. Siehe oben, Zusammenfassung: Anforderungen der EVU an die Wärmerückgewinnung in Abwasserkanäle, Kapitel 4.3.5, S. 172 f.

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

kommt auch das Vermarktungspotenzial erst dann zustande, wenn die Einzelbedingungen simultan erfüllt sind. Die Einzelwahrscheinlichkeiten für diese Bedingungen sind unter der Voraussetzung gegenseitiger Unabhängigkeit multiplikativ zu verknüpfen. Sofern über die Einzelwahrscheinlichkeiten keine detaillierten Informationen verfügbar sind, erfolgen Einschätzungen unter Angabe einer Spannweite von Eintrittwahrscheinlichkeiten. Während der obere Wert eine optimistische Eintrittswahrscheinlichkeit repräsentiert, steht der untere Wert für eher gedämpfte Erwartungen.

Angebotsseitige Restriktionen zur Vermarktung bestehen in der Verfügbarkeit geeigneter Wärmeabnehmer, d.h. es bedarf eines hinreichend hohen, langfristig bestehenden Wärmebedarfs in räumlicher Nähe zum Gewinnungsort. Dieser Bedarf muss zudem eine hohe Auslastung aufweisen: Die Nachfrage nach Klimakälte oder ein ganzjähriger Wärmebedarf machen AWN-Anlagen wirtschaftlich interessant.

- Für den Komplex „Wärmebedarf (ohne Auslastungsbedingung)“ wird vom Verfasser als oberer (unterer) Wert eine Eintrittswahrscheinlichkeit von 80 % (50 %) angenommen. Die Eintrittswahrscheinlichkeit von 80 % (bzw. 50 %) ist wie folgt zu interpretieren: Hat die Ermittlung des Gewinnungspotenzials geeignete Kanalisationsabschnitte für die Installation von 100 Wärmenutzungsanlagen ergeben, so bietet sich nach Berücksichtigung des Wärmebedarfs-Kriteriums für 80 (bzw. 50) Wärmenutzungsanlagen eine Vermarktung an.

- Der Ausweis der Auslastungsbedingung erfolgt zur Erhöhung der Transparenz isoliert, obwohl es sich letztlich auch um eine Komponente des geeigneten Wärmebedarfs handelt. Für die Erfüllung der Auslastungsbedingung (Klimatisierungs- oder ganzjähriger Wärmebedarf) wird eine Eintrittswahrscheinlichkeit von 33 % (20 %) angenommen. Dieser Wert ist wiederum derart zu interpretieren, dass 33 von 100 gewinnungstheoretisch geeigneten Anlagen auch das für eine Vermarktung erforderliche Auslastungskriterium erfüllen.

Nachfrageseitige Bedingungen für die Vermarktung bestehen hinsichtlich des Bedarfs an Heizungsanlagen und der Bindung an bestehende Energieliefer-Verträge. Dabei sind die Bedarfe für Neuausstattungen und Ersatzinvestitionen zu berücksichtigen. Ferner soll davon ausgegangen werden, dass auch im Heizungsbestand ein vermarktungsfähiges Potenzial zu finden ist. Aus der additiven Verknüpfung der Einzelwahrscheinlichkeiten ergibt sich die Gesamtwahrscheinlichkeit für die Erfüllung der Bedingung „Bedarf an Heizungsanlagen“.

- Nach Mitteilung des Landesinnungsverbandes des Schornsteinfegerhandwerks Nordrhein-Westfalen sind in der Zeit von 1998 bis 2003 rd. 21,4 % der derzeit bestehenden Feuerungsanlagen errichtet worden, d.h. im Durchschnitt werden jährlich rd. 3,6 % der Anlagen neu errichtet oder ersetzt.[224] Bei einer angenommenen mittleren Nutzungsdauer von 20 Jahren kann für den Heizungsbestand ein jährlicher Ersatz von 5 % angenommen werden. Insgesamt wird für die Neuerrichtung und den Ersatz von Heizungsanlagen eine Eintrittswahrscheinlichkeit von 8 % angenommen. Hinzuzurechnen ist derjenige Anteil, der von Betreibern intakter und nicht zu ersetzender Heizungen nachgefragt wird. Es handelt sich somit um eine Nachfrage nach WP-Anlagen, die ergänzend zu bestehenden und weiterhin betriebenen Heizungsanlagen zu installieren sind. Zu diesem Marktpotenzial liegen keine Angaben vor, daher wird für die weitere Ermittlung des Vermarktungspotenzials der Abwasserwärme mit der Annahme gearbeitet, dass 20 % (10 %) der Nachfrager bereit sind, zusätzlich zu bestehenden Anlage eine WP zu installieren, um die Abwasserwärme zu nutzen.

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

Zusammenfassend ergibt sich für die Erfüllung der Bedingung „Bedarf an Heizungsanlagen“ eine Wahrscheinlichkeit von 28 % (18 %).

- Die Bedingung „Vertragliche Bindung“ wirkt sich weniger restriktiv als die Bedingung „Bedarf an Heizungsanlagen“ aus. Dieses gilt insbesondere für Erdöl-Heizungen. Es ist darüber hinaus damit zu begründen, dass bei rechtzeitiger Information der Liegenschaftseigentümer und bei zeitlicher Variabilität der Baumaßnahme eine Kongruenz von Vertragsablauf und Anschluss an das Abwasserheizwerk erreicht werden kann. Dennoch kann nicht grundsätzlich davon ausgegangen werden, dass die erforderliche Synchronisation gelingt. Daher wird für die Erfüllung der Bedingung „Vertragliche Bindung“ eine Wahrscheinlichkeit von 90 % (80 %) unterstellt.

Insgesamt kann nunmehr eine Gesamtabschätzung des Vermarktungspotenzials erfolgen. Dabei ist wiederum eine Unterscheidung in den Bereich Kanalisationsbestand und Kanalisationsneubau zu treffen. Aus Vereinfachungsgründen wird die plausible Annahme getroffen, dass der Neubau von Kanalisationen einhergeht mit dem Neubau von Liegenschaften, so dass in diesem Segment die Bedingungen „Heizungsbedarf“ und „Vertragliche Bindung“ nicht restriktiv wirken: Für die diesbezüglichen Vermarktungschancen wird ein Wert von 100 % angenommen.

Vor dem Hintergrund der zuvor dargestellten Einzelwahrscheinlichkeiten lassen sich die Vermarktungswahrscheinlichkeiten für die Bereiche „Bestand“ und „Neubau“ wie in der nachfolgenden Tabelle dargestellt ermitteln:

Vermarktungspotenzial [v.H.]

Kanalisationsbestand

Vermarktungschancen im Kanalisationsbestand	hoher Wert	niedriger Wert
Wärmebedarf (ohne Auslastungsbedingung)	80,0%	50,0%
Auslastungsbedingung (Klimakälte/Wärmebedarf)	33,0%	20,0%
Heizungsbedarf (Neuerrichtung, Ersatz, Erweiterung)	28,0%	18,0%
Vertragliche Bindung	90,0%	80,0%
Vermarktungswahrscheinlichkeit	**6,65%**	**1,44%**

Kanalisationsneubau

Vermarktungschancen im Kanalisationsneubau	hoher Wert	niedriger Wert
Wärmebedarf (ohne Auslastungsbedingung)	80,0%	50,0%
Auslastungsbedingung (Klimakälte/Wärmebedarf)	50,0%	33,0%
Heizungsbedarf (Neuerrichtung, Ersatz, Erweiterung)	100,0%	100,0%
Vertragliche Bindung	100,0%	100,0%
Vermarktungswahrscheinlichkeit	**40,00%**	**16,50%**

IKT – eigene Darstellung

Wie die Aufstellung verdeutlicht, bietet das Segment „Kanalisationsbestand“ eine Vermarktungswahrscheinlichkeit von 1% bis 7 %, d.h. von dem für den Kanalisationsbestand ermittelten Gewinnungspotenzial lassen sich 1 % bis 7 % vermarkten, sofern keine weiteren Restriktionen greifen würden. Wurden also zuvor für die Wärmegewinnung nutzbare Kanalisationsabschnitte mit einer Länge von 120 bis 80 km ermittelt, so verbleibt nach Berücksichtigung der Gewinnungs- und Vermarktungs-

224 Vgl. LIV NRW (2004).

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

restriktionen ein jährlich erschließbares Vermarktungspotenzial von Abwasserwärme auf der Basis der Nutzung von ein bis acht Kilometer bestehender Kanalisationsabschnitte.

Für das Segment „Kanalisationsneubau“ wurden Vermarktungschancen von 16,5 % bis 40 % ermittelt, d.h. von dem für den Kanalisationsneubau ermittelten Gewinnungspotenzial lassen sich 16,5 % bis 40 % vermarkten, sofern keine weiteren Restriktionen greifen. Wurden also zuvor für die Wärmegewinnung nutzbare Kanalisationsabschnitte mit einer Länge von 64 km ermittelt, so verbleibt nach Berücksichtigung der Gewinnungs- und Vermarktungsrestriktionen ein jährlich erschließbares Vermarktungspotenzial von Abwasserwärme auf der Basis der Nutzung 10 km bis 26 km neu zu errichtender Kanalisationsabschnitte.

Das gemeinsame Vermarktungspotenzial von Kanalisationsbestand und –neubau basiert auf geeigneten Kanalabschnitten mit einer Länge von elf bis 34 km. Bei einer mittleren Wärmegewinnung von 2,5 kW/m beträgt das jährlich in NRW erschließbare Vermarktungspotenzial 27.500 kW bis maximal 85.000 kW.

5.3.4 Realisierbares Potenzial

Nachdem nun unter Berücksichtigung der kanalseitigen Anforderungen (Gewinnungspotenzial) und der marktseitigen Anforderungen (Vermarktungspotenzial) eine Beurteilung der nutzbaren Kanalabschnitte durchgeführt worden ist, sind zur Ableitung des Realisierungspotenzials in einem nächsten Schritt noch weitere, bisher nicht berücksichtigte Restriktionen v.a. auf Seiten der Netzbetreiber zu beachten. Darüber hinaus ist der technische Verschnitt zu berücksichtigen, da nicht alle prinzipiell realisierungsfähigen Kanalisationsabschnitte vollständig mit WT-Elementen ausgestattet werden können - die maximale Länge ist auf 200 m je AWN-Anlage begrenzt. Erst auf dieser Grundlage kann eine Aussage zum theoretisch realisierungsfähigen Potenzial der Wärmegewinnung in NRW getroffen werden, und erst das auf diese Weise ermittelte Realisierungspotenzial kann als Grundlage für die Abschätzung der energiewirtschaftlichen und umweltpolitischen Effekte dienen.

Anforderungen von NB wurden bislang v.a. im Zusammenhang mit der Erfüllung der Entwässerungsaufgabe und im Hinblick auf mögliche Konflikte mit Kläranlagenbetreibern oder mit Anwohnern dargestellt. Darüber hinaus sind zur Ermittlung des realisierbaren Potenzials jedoch weitere Restriktionen zu beachten: So besteht die Möglichkeit, dass die Präferenzlage eines NB eine andere Ausrichtung hat und daher die Projektierung der Wärmegewinnung in Abwasserkanalisationen nicht in Angriff genommen wird. Ferner sind die Risikopräferenzen der NB zu beachten, da bei NB bereits im Vorfeld der Projektierung eines AWN-Engagementes interne Aufwendungen anfallen, die im Fall des Scheiterns der Vertragsverhandlungen nicht kompensiert werden. Bei risikoaversen NB ist aus diesem Grund ein zurückhaltender Umgang mit dem Thema „Wärmegewinnung in der Abwasserkanalisation“ zu erwarten. Des Weiteren kann es schlichtweg sein, dass NB nicht die erforderliche Motivation für ein entsprechendes Engagement aufweisen. Auch wenn bezüglich der zuvor dargestellten Aspekte keine Restriktionen auftreten, sind noch weitere Hürden zu nehmen: Zum einen kann ein Kapazitätsproblem auftreten, denn sofern die Planung des AWN-Projektes bspw. aus Mangel an finanziellen Ressourcen nicht an ein Ingenieurbüro vergeben wird, muss der NB mit den verfügbaren personellen Ressourcen die Planungsleistung erbringen. Dafür sind entsprechende Kapazitäten erforderlich. Zum andern kann der Fall auftreten, dass die Satzung des NB eine nicht entwässerungsbezogene Nutzung der Kanalisation nicht zulässt und eine Satzungsänderung nicht gewollt oder nicht durchführbar ist.

Die Bewertung dieser Restriktionen ist deshalb schwierig, weil hier kein statistisch abgesichertes Material verfügbar ist und individuelle Faktoren eine Rolle spielen. Es ist jedoch davon auszugehen, dass die o.g. Restriktionen durchaus in spürbarer

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

Weise zum Tragen kommen. Der Umfang dieser akteursbezogenen Realisierungsrestriktion wird vom Verfasser auf 40 % bis 60 % eingeschätzt. Auch hier ist die Berücksichtigung eines „Neubau-Bonus“ plausibel, da der zusätzliche Aufwand im Zuge einer Neubaumaßnahme weniger gravierend ausfällt. Für den Bereich „Neubau“ wird daher eine um 10%-Punkte höhere Realisierungswahrscheinlichkeit unterstellt.

Zusammenfassend wird die Realisierungswahrscheinlichkeit ohne Berücksichtigung des Verschnitts wie folgt eingeschätzt:

- Im Bereich „Kanalisationsbestand“ wird eine akteursbezogene Realisierungswahrscheinlichkeit von 40 % bis 60 % angenommen.

- Im Bereich „Kanalisationsneubau“ wird eine akteursbezogene Realisierungswahrscheinlichkeit von 50 % bis 70 % angenommen.

Unter zusätzlicher Berücksichtigung des Verschnitts, der hier in einer Höhe von 50 % unterstellt wird, lassen sich nunmehr zum Realisierungspotenzial der Wärmerückgewinnung in Abwasserkanalisationen in NRW für die Bereiche „Bestand“ und „Neubau“ folgende Aussagen treffen:

Im Anschluss an die oben getroffenen Annahmen ist für das Segment „Kanalisationsbestand“ unter Einbeziehung des technischen Verschnitts eine Realisierungswahrscheinlichkeit von 20 % bis 30 % zu erwarten. Unter Berücksichtigung der Gewinnungs- und Vermarktungspotenziale lässt sich ein jährlich erschließbares Realisierungspotenzial von Abwasserwärme auf der Basis der Nutzung von 200 m bis 2,4 Kilometer bestehender Kanalisationsabschnitte ermitteln.

Für das Segment „Kanalisationsneubau“ werden unter Einbeziehung des technischen Verschnitts Realisierungschancen in Höhe von 25 % bis 35 % angenommen. Unter Berücksichtigung der Gewinnungs- und Vermarktungspotenziale lässt sich ein jährlich erschließbares Realisierungspotenzial von Abwasserwärme auf der Basis der Nutzung von 2,6 bis 9 Kilometer neu zu errichtender Kanalisationsabschnitte ermitteln.

Unter weiterer Berücksichtigung der mittleren Wärmeleistung je Meter Wärmetauscher in Höhe von 2,5 kW lässt sich in Nordrhein-Westfalen ein jährlich in der Kanalisation erschließbares Realisierungspotenzial in der Größenordnung von 7.000 kW bis 28.500 kW ermitteln. Dabei fällt der größte Teil des realisierbaren Potenzials dem Bereich des Kanalisationsneubaus zu: 79 % bis 93 % des realisierbaren Potenzials, d.h. rd. 6.500 kW bis 22.500 kW sind dort vorzufinden. Der Kanalisationsbestand bietet mit bis zu 6.000 kW nur ein geringfügiges jährlich erschließbares Realisierungspotenzial.

Die nachfolgende Abbildung enthält noch einmal eine Zusammenstellung sämtlicher in dieser Studie berücksichtigten Faktoren und deren Bewertung zur Ermittlung des realisierbaren Potenzial.

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

Jährliches Potenzial der Wärmerückgewinnung in der Abwasserkanalisation in NRW

KANALISATIONSBESTAND

	Potenzialermittlung - hoher Wert		Potenzialermittlung - niedriger Wert	
	Restriktionen [v.H.]	Potenzial [v.H.]	Restriktionen [v.H.]	Potenzial [v.H.]
Kanalisationsbestand		**100,0%**		**100,0%**
./. Regenwasserkanalisation	-22,3%	77,7%	-22,3%	77,7%
./. Kanäle < DN 800	-88,2%	11,8%	-88,2%	11,8%
./. Keine Sanierung innerh. 1 Jahres	-98,0%	2,0%	-98,0%	2,0%
./. Entwässerungsrestriktion	-25,0%	75,0%	-50,0%	50,0%
Gewinnungswahrscheinlichkeit		**0,14%**		**0,09%**
Gewinnungspotenzial		**100,0%**		**100,0%**
./. Kein geeigneter Wärmebedarf	-20,0%	80,0%	-50,0%	50,0%
./. Keine hinreichende Auslastung	-67,0%	33,0%	-80,0%	20,0%
./. Kein Heizungsbedarf	-72,0%	28,0%	-82,0%	18,0%
./. Vertragliche Bindung	-10,0%	90,0%	-20,0%	80,0%
Vermarktungswahrscheinlichkeit		**6,65%**		**1,44%**
Vermarktungspotenzial		**100,0%**		**100,0%**
./. Akteursbez. Realisierungsrestriktionen	-40,0%	60,0%	-60,0%	40,0%
./. Technischer Verschnitt	-50,0%	50,0%	-50,0%	50,0%
Realisierungswahrscheinlichkeit		**30%**		**20%**

Kanalisationsbestand [km]	87.307 km	87.307 km
x Gewinnungswahrscheinlichkeit [v.H.]	0,14 %	0,09 %
x Vermarktungswahrscheinlichkeit [v.H.]	6,65 %	1,44 %
x Realisierungswahrscheinlichkeit [v.H.]	30 %	20 %
Realisierungsfähige Kanalisationsabschnitte [km]	2,4 km	0,2 km
x mittlere Wärmegewinnung [kW / m]	2,5 kW/m	2,5 kW/m
Realisierbares Potenzial	**rd. 6.000 kW**	**rd. 500 kW**

KANALISATIONSNEUBAU

	Potenzialermittlung - hoher Wert		Potenzialermittlung - niedriger Wert	
	Restriktionen [v.H.]	Potenzial [v.H.]	Restriktionen [v.H.]	Potenzial [v.H.]
Kanalisationsbestand		**100,0%**		**100,0%**
./. Regenwasserkanalisation	-22,3%	77,7%	-22,3%	77,7%
./. Kanäle < DN 800	-88,2%	11,8%	-88,2%	11,8%
./. Keine Sanierung innerh. 1 Jahres	0,0%	100,0%	0,0%	100,0%
./. Entwässerungsrestriktion	0,0%	100,0%	0,0%	100,0%
Gewinnungswahrscheinlichkeit		**9,17%**		**9,17%**
Gewinnungspotenzial		**100,0%**		**100,0%**
./. Kein geeigneter Wärmebedarf	-20,0%	80,0%	-50,0%	50,0%
./. Keine hinreichende Auslastung	-50,0%	50,0%	-67,0%	33,0%
./. Kein Heizungsbedarf	0,0%	100,0%	0,0%	100,0%
./. Vertragliche Bindung	0,0%	100,0%	0,0%	100,0%
Vermarktungswahrscheinlichkeit		**40,00%**		**16,50%**
Vermarktungspotenzial		**100,0%**		**100,0%**
./. Akteursbez. Realisierungsrestriktionen	-30,0%	70,0%	-50,0%	50,0%
./. Technischer Verschnitt	-50,0%	50,0%	-50,0%	50,0%
Realisierungswahrscheinlichkeit		**35%**		**25%**

Kanalisationsneubau p.a.[km]	700 km	700 km
x Gewinnungswahrscheinlichkeit [v.H.]	9,17 %	9,17 %
x Vermarktungswahrscheinlichkeit [v.H.]	40 %	16,5 %
x Realisierungswahrscheinlichkeit [v.H.]	35 %	25 %
Realisierungsfähige Kanalisationsabschnitte [km]	9,0 km	2,6 km
x mittlere Wärmegewinnung [kW / m]	2,5 kW/m	2,5 kW/m
Realisierbares Potenzial	**rd. 22.500 kW**	**rd. 6.500 kW**

IKT – eigene Darstellung

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

In einer alternativen Darstellung lässt sichdas jährliche Realisierungspotenzial wie folgt darstellen:

Jährliches Realisierungspotenzial für AWN-Anlagen in NRW

Max. realisierungsfähige Kanalisationsabschnitte p.a.	= 11,4 km
Max. realisierbare 500kW-AWN-Anlagen (200 m WT)	= 11,4 km / 200 m je Anlage = 57 AWN-Anlagen
Realisierbare Wärmeentnahme NRW	**= 57 Anlagen * 500 kW = 28,5 MW**

IKT – eigene Darstellung

Ferner ist nicht auszuschließen, und dieser Punkt wurde bislang ebenfalls noch nicht berücksichtigt, dass die Verwendung der WT-Technologie im Einzelfall nicht die Akzeptanz der Liegenschaftsbesitzer findet. Die Bewertung dieses Aspektes wird im Rahmen dieser Studie nicht weiter verfolgt, jedoch ist deutlich herauszustellen, dass das als oberer Wert dargestellte Potenzial auf optimistischen Einschätzungen beruht und mit aller Ernsthaftigkeit als maximaler Grenzwert zu interpretieren ist.

5.3.5 Robustheit der Potenzialermittlung

Um die Robustheit der oben dargestellten Ableitung des Potenzials zur Wärmerückgewinnung in nordrhein-westfälischen Abwasserkanalisationen zu untersuchen, wird nachfolgend eine Sensitivitätskontrolle der nicht statistisch fundierten Schätzgrößen vorgenommen. In diesem Zusammenhang erfolgt mit Nachdruck der Hinweis, dass hier lediglich anhand eines Rechenexempels die Variationsbreite des Lösungsraums und der Einfluss fundierter und überschlägig ermittelter Restriktionen dargestellt wird. Es ist auf keinem Fall zulässig, von der nachfolgenden fiktiven Variation der Restriktionen auf eine tatsächliche Erhöhung des Wärmerückgewinnungspotenzials in Nordrhein-Westfalen zu schließen.

In einem ersten Schritt ist zunächst eine Unterscheidung in fundierte und in überschlägig ermittelte Parameter zu treffen. Auch in diesem Zusammenhang ist eine Unterscheidung zwischen Kanalisationsbestand und –neubau erforderlich.

Für den Kanalisationsbestand sind im Rahmen der Potenzialermittlung (hohe Werte) mindestens die folgenden Restriktionen als fundiert anzusehen:[225]

- Anteil der Regenwasserkanalisation (22,3 %),
- Anteil der Kanalisation unterhalb des Mindestquerschnitts DN 800 (88,2 %),
- Sanierungsrestriktion (98 %).

[225] Auf die Einbeziehung der Restriktion „Heizungsbedarf“ wurde an dieser Stelle verzichtet, weil die Abschätzung nur teilweise statistisch fundiert ist.

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

Als überschlägig ermittelte Restriktionen (ebenfalls optimistische Werte) sind anzuführen:

- Entwässerungsrestriktion (25 %),
- Kein geeigneter Wärmebedarf (20 %),
- Auslastungsrestriktion (67 %),
- Heizungsrestriktion (72 %),
- Vertragliche Bindung (10%),
- Realisierungsrestriktion (40 %).

Die Gesamtrestriktion greift als Produkt der Einzelrestriktionen für 99,9945 % des Kanalisationsbestandes in NRW.[226] Allein die fundierten Restriktionen greifen für 99,816 % des Kanalisationsbestandes.[227] Damit lassen sich mittels der fundierten Restriktionen bereits 99,822 % der Gesamtrestriktionen begründen.[228] Mit anderen Worten: Selbst wenn die überschlägig ermittelten Restriktionen vollkommen ausgeblendet würden, ließe sich maximal ein fiktiv realisierbares Potenzial auf der Basis von Kanalisationsabschnitten mit einer Läge von 160 km angeben.[229] Das fiktiv realisierbare Potenzial ohne Berücksichtigung der Entwässerungsrestriktion, der Vermarktungs- und Realisierungsrestriktionen würde somit um den Faktor 33 höher ausfallen als unter Berücksichtigung dieser Restriktionen. Das allein auf der Grundlage der fundierten Restriktionen maximal realisierbare fiktive Potenzial würde rd. 400 MW betragen.[230]

Im Fall einer Lockerung der überschlägig ermittelten Einzelrestriktionen um jeweils zehn Prozentpunkte würde das realisierbare Potenzial um den Faktor 2,9 anwachsen.[231] Das fiktiv maximal realisierbare Wärmepotenzial würde sich von 12 MW auf 35 MW erhöhen.

Im Fall einer Verschärfung der überschlägig ermittelten Einzelrestriktionen um jeweils zehn Prozentpunkte würde sich das realisierbare Potenzial um den Faktor 4 vermindern.[232] Das fiktiv maximal realisierbare Wärmepotenzial würde sich von 12 MW auf 3 MW reduzieren.

---

226 Die Gesamtrestriktion errechnet sich aus 1 – (0,777 * 0,118 * 0,02 * 0,75 * 0,8 * 0,33 * 0,28 * 0,9 * 0,6) = 0,999945.

227 Die fundierten Restriktionen errechnen sich aus 1 – (0,777 * 0,118 * 0,02) = 0,998166.

228 Die Gesamtrestriktion beträgt 99,9945 % (87.307 km x 99,9945 % = 87.302 km nicht realisierungsfähige Kanalisationsabschnitte). Die o.g. fundierten Restriktionen belaufen sich zusammengefasst auf 99,8166 % (1 – 0,777 [Regenwasserkanalisation] * 0,118 [DN 800] * 0,02 [Sanierungsrestriktion] = 99,816628 %). Wird der Wert der Gesamtrestriktion mit 100 % bemessen, so beträgt das Gewicht der fundierten Restriktionen 99,8166 / 99,9945 = 99,82 %.

229 Das fiktiv realisierbare Potenzial auf der Grundlage ausschließlich fundierter Restriktionen beträgt 87.307 km – (87.307 km * 0,998166) = 160 km.

230 Realisierungsfähige Kanalabschnitte weisen eine Länge von 4,8 km auf. Auf der Basis der fundierten Restriktionen errechnen sich fiktive realisierungsfähige Kanalabschnitte mit einer Länge von 160 km. Damit erhöht sich das Potenzial theoretisch um den Faktor 33 von 12 MW auf rd. 400 MW.

231 Folgende Einzelrestriktionen wurden der Berechnung zugrunde gelegt: Entwässerungsrestriktion 15 %, kein geeigneter Wärmebedarf 10 %, keine hinreichende Auslastung 57 %, kein Heizungsbedarf 62 %, Vertragliche Bindung 0 %, Realisierungsrestriktionen 30 %. Unter Berücksichtigung dieser Werte und der fundierten Restriktionen lassen sich realisierungsfähige Kanalisationsabschnitte mit einer Länge von 14 km (= 160 km * 0,85 * 0,9 * 0,43 * 0,38 * 0,7) ermitteln. Das entspricht einem Anstieg gegenüber dem ermittelten realisierungsfähigen Potenzial (4,8 km) um den Faktor 2,9.

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

Die Sensitivitätskontrolle zeigt, dass das Potenzial zur Wärmerückgewinnung im Kanalisationsbestand zum überwiegenden Teil durch fundierte Restriktionen determiniert ist. Selbst bei einer vollkommenen Ausblendung der überschlägig ermittelten Restriktionen bleibt das fiktiv realisierbare Wärmepotenzial überschaubar. Indes ist zu berücksichtigen, dass die Ausblendung der überschlägig ermittelten Restriktionen nicht legitim ist und die Sensitivitätsrechnung dann keine realitätsbezogene Grundlage besitzt.

Für den Kanalisationsneubau sind im Rahmen der Potenzialermittlung (hohe Werte) die folgenden Restriktionen als fundiert anzusehen oder weisen den Wert Null auf:[233]

- Anteil der Regenwasserkanalisation (22,3 %),
- Anteil der Kanalisation unterhalb des Mindestquerschnitts DN 800 (88,2 %),
- Sanierungsquote (0 %),
- Entwässerungsrestriktion (0 %),
- Heizungsrestriktion (0 %) und
- Vertragsbindungsrestriktion (0 %).

Als überschlägig ermittelte Restriktionen (optimistische Werte) sind anzuführen:

- Kein geeigneter Wärmebedarf (20 %),
- Auslastungsrestriktion (50 %),
- Realisierungsrestriktion (30 %).

Die Gesamtrestriktion greift als Produkt der Einzelrestriktionen für 97,4328 % des Kanalisationsbestandes in NRW.[234] Allein die fundierten Restriktionen greifen für 90,831 % des Kanalisationsbestandes.[235] Damit lassen sich mittels der fundierten Restriktionen bereits 93,206 % der Gesamtrestriktionen begründen.[236] Mit anderen Worten: Selbst wenn die überschlägig ermittelten Restriktionen vollkommen ausgeblendet würden, ließe sich im Bereich „Neubau“ maximal ein fiktiv realisierbares

---

232 Folgende Einzelrestriktionen wurden der Berechnung zugrunde gelegt: Entwässerungsrestriktion 35 %, kein geeigneter Wärmebedarf 30 %, keine hinreichende Auslastung 77 %, kein Heizungsbedarf 82 %, Vertragliche Bindung 20%, Realisierungsrestriktionen 50 %. Unter Berücksichtigung dieser Werte und der fundierten Restriktionen lassen sich realisierungsfähige Kanalisationsabschnitte mit einer Länge von 1,2 km (= 160 km * 0,65 * 0,7 * 0,23 * 0,18 * 0,8 * 0,5) ermitteln. Das entspricht einer Verminderung gegenüber dem ermittelten realisierungsfähigen Potenzial (4,8 km) um den Faktor 4.

233 Auf die Einbeziehung der Restriktion „Heizungsbedarf“ wurde an dieser Stelle verzichtet, weil die Abschätzung nur teilweise statistisch fundiert ist.

234 Die Gesamtrestriktion errechnet sich aus 1 – (0,777 * 0,118 * 0,8 * 0,5 * 0,7) = 0,974328.

235 Die fundierten Restriktionen errechnet sich aus 1 – (0,777 * 0,118) = 0,908314.

236 Die Gesamtrestriktion beträgt 97,4328 % (700 km x 97,4328 % = 682 km nicht realisierungsfähige Kanalisationsabschnitte im Neubau). Die o.g. fundierten Restriktionen belaufen sich zusammengefasst auf 90,813 % (1 – 0,777 [Regenwasserkanalisation] * 0,118 [DN 800] = 90,4831 %). Wird der Wert der Gesamtrestriktion mit 100 % bemessen, so beträgt das Gewicht der fundierten Restriktionen 90,813 / 97,4328 * 100 = 93,206 %.

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

Potenzial auf der Basis von Kanalisationsabschnitten mit einer Läge von 64 km angeben,[237] das fiktiv realisierbare Potenzial ohne Berücksichtigung der Vermarktungs- und Realisierungsrestriktionen würde somit nur um den Faktor 3,6 höher ausfallen als unter Berücksichtigung dieser Restriktionen. Das allein auf der Grundlage der fundierten Restriktionen maximal realisierbare fiktive Potenzial beträgt rd. 160 MW.[238]

Im Fall einer Lockerung der überschlägig ermittelten Einzelrestriktionen um jeweils zehn Prozentpunkte würde das realisierbare Potenzial um den Faktor 1,5 anwachsen.[239] Das fiktiv maximal realisierbare Wärmepotenzial im Bereich „Neubau“ würde sich auf rd. 68 MW erhöhen.

Im Fall einer Verschärfung der überschlägig ermittelten Einzelrestriktionen um jeweils zehn Prozentpunkte würde sich das realisierbare Potenzial um den Faktor 1,7 vermindern.[240] Das fiktiv maximal realisierbare Wärmepotenzial würde sich auf 26,5 MW reduzieren.

Die Sensitivitätskontrolle zeigt, dass das Potenzial zur Wärmerückgewinnung in den Segmenten „Kanalisationsbestand“ und „Kanalisationsneubau“ zum überwiegenden Teil durch fundierte Restriktionen determiniert ist. Selbst bei einer vollkommenen Ausblendung der überschlägig ermittelten Restriktionen bleibt das fiktiv realisierbare Wärmepotenzial überschaubar. Indes ist zu berücksichtigen, dass die Ausblendung der überschlägig ermittelten Restriktionen nicht legitim ist und die Sensivitätsrechnung dann keine realitätsbezogene Grundlage besitzt.

Des Weiteren lässt die Variation (hier: Lockerung der Restriktionen) der überschlägig ermittelten Einzelrestriktionen um jeweils zehn Prozentpunkte zwar fiktive Erhöhungen des Potenzials erkennen, indes handelt es sich dabei nicht um Quantensprünge auf signifikant höhere Niveaus. Insgesamt ist somit das Fazit zu ziehen, dass sich das ermittelte realisierbare Potenzial auch als robust gegen statistische Ausreißer erweist.

Umgekehrt lässt die Variationsrechung erkennen, dass die Verschärfung der überschlägig ermittelten Restriktionen um zehn Prozentpunkte dem theoretischen Potenzial der Wärmerückgewinnung in der Abwasserkanalisation einen Bedeutungsverlust beschert: Insgesamt umfasst das realisierbare Potenzial nur noch rd. 50.000 kW, wobei der Bereich „Kanalisationsbestand“ bedeutungslos ist. Vor diesem Hintergrund ist darauf hinzuweisen, dass ein Unterschreiten optimistischer Annahmen realitätsnäher ist als die Übererfüllung der optimistischen Annahmen. Sofern in der Realität die Restriktionen jedoch schärfer ausfallen

---

237 Das fiktiv realisierbare Potenzial auf der Grundlage ausschließlich fundierter Restriktionen beträgt 700 km – (700 km * 0,908314) = 64 km.

238 Realisierungsfähige Kanalabschnitte weisen maximal eine Länge von 18 km auf. Auf der Basis der fundierten Restriktionen errechnen sich fiktive realisierungsfähige Kanalabschnitte mit einer Länge von 64 km. Damit erhöht sich das Potenzial theoretisch um den Faktor 3,6 von 45 MW auf rd. 160 MW.

239 Folgende Einzelrestriktionen wurden der Berechnung zugrunde gelegt: kein geeigneter Wärmebedarf 10 %, keine hinreichende Auslastung 40 %, Realisierungsrestriktionen 20 %. Unter Berücksichtigung dieser Werte und der fundierten Restriktionen lassen sich realisierungsfähige Kanalisationsabschnitte mit einer Länge von 27,6 km (= 64 km * 0,9 *0,6 *0,8) ermitteln. Das entspricht einem Anstieg gegenüber dem ermittelten realisierungsfähigen Potenzial (18 km) um den Faktor 1,5.

240 Folgende Einzelrestriktionen wurden der Berechnung zugrunde gelegt: kein geeigneter Wärmebedarf 30 %, keine hinreichende Auslastung 60 %, Realisierungsrestriktionen 40 %. Unter Berücksichtigung dieser Werte und der fundierten Restriktionen lassen sich realisierungsfähige Kanalisationsabschnitte mit einer Länge von 10,8 km (= 64 km * 0,7 *0,4 *0,6) ermitteln. Das entspricht einer Verminderung gegenüber dem ermittelten realisierungsfähigen Potenzial (18 km) um den Faktor 1,7.

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

als in den optimistischen Annahmen unterstellt, sind die damit einhergehenden Verminderungen des Realisierungspotenzials sehr wohl real.

5.3.6 Zur Dynamik der evolutorischen Potenzialentwicklung

5.3.6.1 Einflussfaktoren

Im Rahmen der zuvor dargestellten evolutorischen Potenzialermittlung lässt sich das jährlich realisierbare Potenzial von AWN-Anlagen in Kanalisationen ermitteln. Da sich Kanalneuerrichtungen und –sanierungen als Rahmenbedingungen positiv auf die Wirtschaftlichkeit von AWN-Anlagen auswirken, liegt es nahe, die Potenzialabschätzung auf der Grundlage jährlich realisierbarer AWN-Anlagen vorzunehmen. Dieses bedeutet zugleich, dass bei der Interpretation des ermittelten Realisierungspotenzials zur Wärmerückgewinnung in Abwasserkanalisationen dynamisch evolutorische Aspekte zu berücksichtigen sind.

Diese kommen zum einen darin zum Tragen, dass die energetischen, ressourcen- und emissionsbezogenen Effekte der realisierten AWN-Anlagen im Zeitablauf kumulieren. Da in der Totalperiode letztendlich der gesamte Kanalisationsbestand Sanierungsmaßnahmen durchläuft (von Stilllegungen abgesehen), spielt das im Rahmen der evolutorischen Potenzialabschätzung zu berücksichtigende Kriterium der Sanierung bzw. des Neubaus in der Totalperiode keine Rolle mehr.

Zum anderen ist zu beachten, dass die Potenzialabschätzung von Rahmenbedingungen ausgeht, die in mehrerlei Hinsicht durch den gegenwärtigen Stand des Wissens definiert sind. Dieses betrifft bspw. den Stand der Technik sowie Kosten und Preise. Das technisch und wirtschaftlich nutzbare Potenzial der Wärmerückgewinnung in Abwasserkanalisationen unterliegt nun insofern einer Dynamik, als sich die Fitness der AWN-Technologie auf das Tempo der Durchsetzung am Markt auswirkt.

Damit stellt sich die Frage nach den zentralen Faktoren für die Fitness der Strategie der Wärmeversorgung mittels Wärmetauschern in Abwasserkanalisationen. Wie bereits im Rahmen der spieltheoretischen Grundlagen gezeigt wurde, hängt die Fitness einer Strategie im Wesentlichen davon ab, ob im Vergleich zu alternativen Strategien höhere Überschüsse erzielt werden können und sich infolgedessen die Selektionsprozesse in wachsenden Repräsentanzen niederschlagen.[241] Im Zeitablauf können bspw. höhere Überschüsse auftreten, wenn durch technischen Fortschritt bedingt die Wärmeproduktion mittels AWN-Anlagen effizienter bewerkstelligt werden kann. Selbiges gilt im Prinzip für Lerneffekte: Mit zunehmendem Wissen über den Einsatz einer bestimmten Technologie lassen sich Senkungen der Stückkosten herbeiführen, so dass die Wärmeenergie ebenfalls effizienter bereitgestellt werden kann.[242] Ebenso können mit zunehmender Repräsentanz der Strategie Skaleneffekte und Verbundvorteile[243] auftreten, die den Lerneffekt noch verstärken.

---

241 Siehe oben, Spieltheoretische Grundlagen, Kap. 3.2.3.1, S. 62.

242 Lerneffekte lassen sich anhand von Erfahrungskurven illustrieren. Die Botschaft der Erfahrungskurve besteht darin, dass das bei kumuliert steigenden Produktionszahlen erzeugte Wissen genutzt werden kann, um die Stückkosten zu senken.

243 Skalenerträge (economies of scale) sind kostendegressive Effekte, die auf steigenden Produktions- und Verkaufsmengen beruhen. Verbundvorteile (economies of scope) treten in Mehrproduktunternehmen auf. Es handelt sich um Kostenvorteile, die aus der gemeinsamen Produktion und dem Vertrieb verschiedener Produkte in einem Unternehmen resultieren. Vgl. Woll, A. (1991), S. 142 und S. 645.

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

Ferner sind zur Beurteilung der Fitness der Wärmerückgewinnung aus Abwasserkanalisationen Kostenänderungen bei alternativen Wärmeversorgungsstrategien zu berücksichtigen. In diesem Zusammenhang spielt v.a. die Entwicklung des Ölpreises eine Rolle. Bei einer fortgesetzten Steigerung des Ölpreises weisen auch die Betriebskosten von Öl- und Gas-Heizungen eine entsprechende Entwicklung auf, so dass diese Alternativen kostenintensiver werden. Da die Betriebskosten der Wärmerückgewinnung aus Abwasserkanalisationen nur in verhältnismäßig geringem Umfang vom Ölpreis abhängig sind, lediglich die Antriebsenergie ist betroffen, können AWN-Anlagen relative Wirtschaftlichkeitsvorteile gegenüber konventionellen, d.h. ölpreisgebundenen Heizungssystemen erlangen. Ein derartiges Szenario führt zu einer Erhöhung des evolutorischen Potenzials der Wärmerückgewinnung aus Abwasserkanalisationen, da die ökonomischen Anforderungen weniger restriktiv wirken.

Des Weiteren wird die Fitness der AWN-Strategie durch die Präferenzen der Wärme-Nachfrager beeinflusst. Sofern sich unabhängig von den oben dargestellten ökonomischen Entscheidungsparametern eine signifikante Verlagerung der Präferenzen zugunsten regenerativer Energieformen ereignet, profitiert davon die Wärmerückgewinnung in Abwasserkanalisationen. Eine steigende Nachfrage nach Klimakälte führt ebenfalls zu einer gesteigerten Dynamik in der Entwicklung des evolutorischen Potenzials.

Sofern die oben dargestellten Faktoren eintreten, kommt es zu einer dynamischen Entwicklung des evolutorischen Potenzials. Diese Entwicklung findet Niederschlag in einer jährlich steigenden Anzahl der realisierbaren Anlagen. Die Ermittlung des zuvor dargestellten Realisierungspotenzials in Höhe von 57 Anlagen p.a. bezieht sich auf Rahmenbedingungen, die auf dem heutigen Wissen über den Stand der Technik und auf gegenwärtigen Preisen und Kosten beruhen. Die Entwicklung und damit der konkret zu erwartende Einfluss dieser Faktoren ist indes nicht zu quantifizieren. Sofern jedoch eine signifikante Änderung zugunsten der Strategie „Wärmegewinnung in Abwasserkanalisationen“ eintritt, wirken die ökonomischen Ausschlusskriterien weniger restriktiv als heute. Dieses kann letztendlich dazu führen, dass auch der Kanalisationsbestand in stärkerem Maße für das Realisierungspotenzial interessant wird. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt sind allerdings vornehmlich Kanalneuerrichtungen und –sanierungen für eine technisch und wirtschaftlich vertretbare Nutzung der Abwasserwärme in Betracht zu ziehen.

5.3.6.2 Ableitung von Potenzialpfaden

Vor dem Hintergrund der skizzierten Einflussfaktoren auf die evolutorische Potenzialentwicklung können nunmehr Potenzialpfade abgeleitet werden, die den Verlauf möglicher Realisierungsszenarien im Zeitablauf illustrieren.

Im Rahmen der überschlägigen Ermittlung des maximal realisierbaren Wärmegewinnungspotenzials in Abwasserkanalisationen wurde gezeigt, dass nach derzeitigem Wissen alljährlich geeignete Kanalabschnitte für 57 AWN-Anlagen mit einer mittleren Wärme-Entnahmeleistung von 500 kW im zu sanierenden Kanalisationsbestand und im Kanalisationsneubau zur Verfügung stehen. Im Zeitablauf ist nun zu beachten, dass sich für den Kanalisationsbestand die Sanierungsrestriktion langfristig auflöst: Bei einer angenommenen jährlichen Sanierungsquote von 2 % haben nach 50 Jahren alle Kanalabschnitte Sanierungsmaßnahmen durchlaufen und weisen damit zum Zeitpunkt der Sanierung günstige Voraussetzungen für den Einbau von WT-Elementen auf. Der Potenzialpfad lässt sich somit zunächst durch einen linearen Verlauf skizzieren. Innerhalb von 50 Jahren lassen sich folglich maximal 2.850 AWN-Anlagen mit einer aggregierten Wärme-Entnahmeleistung von 1,425 Mio. kW realisieren.

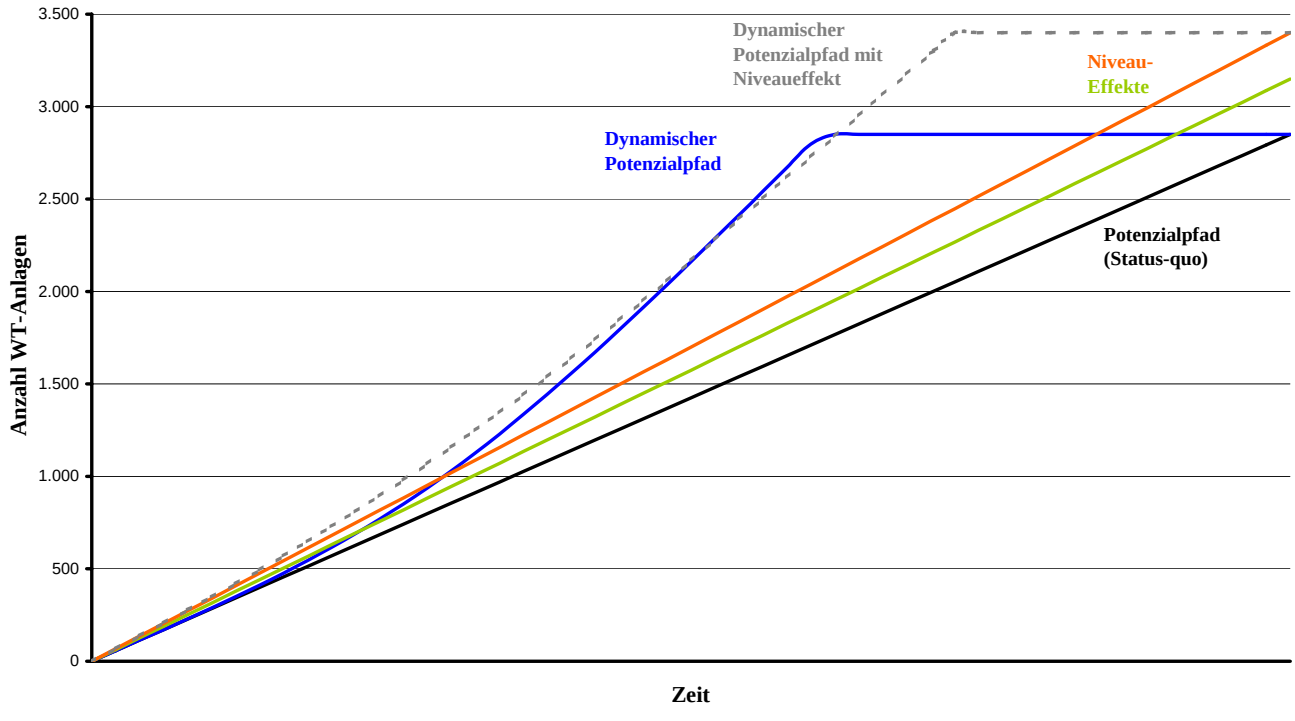
© 2005 All rights reserved by GEK mbH

Die in vorangegangenen Kapitel dargestellten Einflussfaktoren auf die Dynamik der Entwicklung wirken sich auf die Steigung des Potenzialpfades aus: Lern- und Skaleneffekte, steigende Kosten alternativer Versorgungssysteme sowie Verlagerung der Präferenzen zugunsten regenerativer Energieformen können sich positiv auf die Steigung des Potenzialpfades auswirken. Folglich kann das alljährlich wirtschaftlich vertretbar realisierbare Potenzial sukzessive zunehmen, und der Potenzialpfad verlässt den ursprünglich linear angenommenen Verlauf. Ein sprunghafter Anstieg des Potenzialpfades kann eintreten, wenn infolge einer Veränderungen der Rahmenbedingungen auch der nicht in Sanierungsmaßnahmen befindliche Kanalisationsbestand in das Gewinnungspotenzial einzubeziehen ist.[244] Als Konsequenz einer derartigen dynamischen Entwicklung kann das Gesamtpotenzial von 2.850 Anlagen bereits zu einem frühren Zeitpunkt erreicht werden, ein Niveaueffekt, d.h. ein höheres maximales Realisierungspotenzial resultiert aus diesen Faktoren nicht.

Niveaueffekte können grundsätzlich dann auftreten, wenn es gelingt, die weiteren Restriktionen aufzuweichen. Bspw. wäre die Lockerung der Restriktion des Mindestquerschnitts von DN 800 auf DN 600 mit einem Niveaueffekt verbunden, da unabhängig von dem zeitlichen Verlauf des Potenzialpfades insgesamt ein höheres maximales Realisierungspotenzial erreicht werden kann.

Die zuvor dargestellten Überlegungen sind in der nachfolgenden Grafik illustriert.

Alternative Potenzialpfade der Wärmerückgewinnung in Abwasserkanalisationen



IKT – eigene Darstellung

244 In diesem Fall sind jedoch die möglicherweise begrenzten Kapazitäten der WT- und WP-Hersteller als Restriktion zu beachten.

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

Der Potenzialpfad (Status quo) repräsentiert die lineare Fortschreibung des gegenwärtigen realisierbaren Potenzials. Der dynamische Potenzialpfad weist in der zweiten und dritten Dekade einen dynamischen Anstieg des Potenzials auf, das maximale Potenzial wird bereits zu einem früheren Zeitpunkt erreicht. Niveaueffekte sind in der Größenordnung von 10 % (grüne Kurve) und 20 % (rote Kurve) zunächst ohne Dynamik dargestellt. Eine Überlagerung von Dynamik- und Niveau-Effekten (20 %) führen zu einem Verlauf des Potenzialpfades gemäß der grau-gestrichelten Linie.

5.3.7 Zusammenfassung der Ergebnisse der evolutorischen Potenzialabschätzung

Von 87.307 km bestehender Kanalisation in NRW erfüllen jährlich rd. 5 km zugleich diejenigen Anforderungen, die sich aus den Gewinnungs-, Vermarktungs- und Realisierungsrestriktionen ergeben. Insofern ist das Potenzial zur Wärmerückgewinnung auf der Basis der realisierungsfähigen Kanalisationsabschnitte mit rd. 12.000 kW gering. Interessanter für die Wärmerückgewinnung ist derzeit offenkundig das Segment des Kanalisationsneubaus: Obwohl – bezogen auf den Gesamtbestand – jährlich nur ein geringer Teil der Kanalisation neu errichtet wird, ist infolge weniger gravierender Restriktionen in diesem Segment ein höheres Potenzial vorzufinden.

In dem Segment des Kanalisationsneubaus wirken sich die Gewinnungs-, Vermarktungs- und Realisierungsrestriktionen weniger gravierend aus: Immerhin weisen bis zu 2,6 % der jährlichen Kanalerneuerungen ein realisierungsfähiges Potenzial auf.[245] Bei einer mittleren Wärmeentnahme aus dem Abwasser von 2,5 kW/m lässt sich insgesamt maximal eine Wärmeleistung von 45 MW aus dem Abwasser entnehmen. Bei zusätzlicher Berücksichtigung des „Verschnitts“ verbleibt im Bereich der Kanalisation ein jährliches Realisierungspotenzial für rd. 57 AWN-Anlagen mit einem Wärmeentzug aus dem Abwasser in Höhe von rd. 30 MW. Die Sensitivitätskontrolle zeigt allerdings, dass bereits eine Erhöhung der überschlägig ermittelten Restriktionen[246] um zehn Prozentpunkte zu einer Verminderung des realisierbaren Wärmepotenzials um mehr als 40 % führt.

Da der jährliche Zuwachs des realisierbaren Potenzials durch die realisierungsfähigen Kanalabschnitte definiert ist, kann ein Durchdringen des Wärmemarktes durch die AWN-Technolgie nur über die Zeitachse erwartet werden. Ein flächendeckender Einsatz der AWN-Technologie ist somit in Nordrhein-Westfalen vorerst nicht zu erwarten. Veränderte Rahmenbedingungen zugunsten der Wirtschaftlichkeit von AWN-Anlagen infolge von Lern-, Skalen- und Verbundeffekten, erhöhter Kosten konventioneller Heizungen sowie veränderter Präferenzen zugunsten regenerativer Energieformen können allerdings dynamisch auf die evolutorische Potenzialentwicklung der Wärmerückgewinnung in Abwasserkanalisationen einwirken.

In einem weiteren Ansatz zur Abschätzung des Marktpotenzials wird der Blick auf die bisherigen Marktentwicklungen gerichtet. Dabei ist festzustellen, dass die Wärmerückgewinnung in Abwasserkanalisationen bislang keine nennenswerte Verbreitung gefunden hat. Das kann zum einen daran liegen, dass die Technologie nicht hinreichend bekannt ist oder dass die Realisierung am Markt auf Restriktionen stößt. In Deutschland wird mit dem Einsatz der AWN-Technologie in Abwasserkanälen Neuland betreten: Derzeit befinden sich in Deutschland zwei derartige Anlagen in Betrieb, in Leverkusen und in Singen (Baden-

---

245 Unter der Annahme günstiger Bedingungen bieten jährlich 18 km Kanalisation von 700 km neu errichteten Abschnitten ein Potenzial für die Realisierung der Wärmegewinnung.

246 Den überschlägig ermittelten Restriktionen kommt im Bereich des Kanalisationsneubaus ein Anteil von 6,8 % an den Gesamtrestriktionen zu.

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

Württemberg). Im Land Bremen konnte, trotz Ankündigung des Bremer Energie-Konsens[247], die Investitionskosten zu übernehmen, bislang kein geeigneter Standort für eine AWN-Anlage gefunden werden. Und auch in der Schweiz, wo teilweise bereits vieljährige Erfahrungen mit der Wärmerückgewinnung in Abwasserkanalisationen bestehen, sind erheblich weniger Projekte realisiert, als Einsatz als die theoretische Potenzialermittlung erwarten lässt.[248]

Ob die Verwendung der AWN-Technologie langfristig am Markt eine Dynamik entfalten kann, hängt von dem wirtschaftlichen Anreizen ab, die von derartigen Anlagen ausgehen. Sollten sich sorgfältig ausgewählte Projekte als energiewirtschaftlicher, umweltpolitischer und v.a. als wirtschaftlicher Erfolg erweisen, sollte also die Strategie „Wärmegewinnung in Abwasserkanalisationen“ eine entsprechende Fitness aufweisen, dann werden Imitatoren in verstärktem Maße die Anwendung dieser Technologie nachfragen und es kann sich eine entsprechende Marktdynamik entfalten. Überdies können sich in der Folge einer derartigen Entwicklung die Restriktionen hinsichtlich Vermarktung und Realisierung zugunsten der AWN-Technologie verändern. Zum Einstieg in eine derartige Entwicklung ist jedoch zuvor der Nachweis zu erbringen, dass die Verwendung der AWN-Technologie in Abwasserkanalisationen ein rentables Geschäft für die EVU und preiswerte und sichere Energieversorgung für die Nachfrager bedeutet. Ein langfristiges und großräumiges Eintreten in den Wärmemarkt kann eben nur dann gelingen, wenn erkennbare und in Euro darstellbare Vorteile für die Akteure auftreten. Insofern sind gerade zum Markteintritt solche Projekte zu realisieren, die nicht nur eine akzeptable, sondern eine herausragende Performance erwarten lassen.

Flankierend könnte eine staatliche Subventionierung der Entwicklung ebenfalls Vorschub leisten. Dieses würde über die AWN-Technologie jedoch zugleich den Schatten der Subventionierungswürdigkeit werfen. Zudem wäre eine finanzielle staatliche Unterstützung zu legitimieren, weil es sich um einen Eingriff in einen wettbewerblich organisierten Markt handelt. Eine stichhaltige Legitimation liegt jedoch derzeit nicht vor. Sinnvoller – und langfristig sicherlich wirkungsvoller – erscheint daher die Einrichtung von Plattformen für Informations- und Erfahrungsaustausche zwischen den beteiligten Akteuren. Zum einen gehen von der Kommunikation erfolgreicher Vermarktungen positive Anreize zur Imitation aus, zum anderen kann Erfahrungswissen in der Entwicklung kostensenkender Problemlösungen Niederschlag finden, und es können die an individuelle Einschätzungen anknüpfenden Restriktionen abgebaut werden.

Insgesamt ist das Fazit zu ziehen, dass die Wirtschaftlichkeit den Dreh- und Angelpunkt für die Realisierung von AWN-AAnlagen darstellt. Ein interessanter Aspekt ist in diesem Zusammenhang darin zu sehen, dass der Bereich der Kanalisationsneuerrichtung nicht nur mengenmäßig das größere Potenzial aufweist, es ist darüber hinaus auch zu erwarten, dass dort grundsätzlich die Realisierungsmöglichkeiten mit der höheren Rentabilität zu finden sind.[249] Wenn also der Kanalisationsneubau sowohl mengen- als auch wertmäßig das höhere Realisierungspotenzial aufweist, ist es aus ökonomische Sicht sinnvoll, die Suchaktivitäten zum Auffinden geeigneter Potenziale und Markteintrittsmöglichkeiten zunächst in diese Richtung zu lenken.

---

247 Mitteilung der Bremer Energie-Konsens (Dr. Rasmussen) an das IKT – Institut für Unterirdische Infrastruktur vom 16.12.2004.

248 Zu den in Betrieb befindlichen Abwasser-Wärmepumpen in der Schweiz siehe www.infrastrukturanlagen.ch/dokumente/datenbank_abwasserwaermepumpen.xls, 09.12.04.

249 Wie bereits dargestellt, ist die Rentabilität durch das Verhältnis von Gewinn zu eingesetztem Kapital definiert. Im Rahmen von Neubaumaßnahmen sind Planung und Durchführung der WT-Baumaßnahme weniger kapitalintensiv, und zudem bietet der Neubau von Liegenschaften eine bessere wirtschaftliche Ausgangslage zur Vermarktung der Wärmeenergie. Insgesamt wirken sich damit sowohl die gewinn- und kapitalseitigen Effekte rentabilitätserhöhend aus. Im Einzelfall kann natürlich auch im zu sanierenden Bestand ein Engagement mit überdurchschnittlicher Rentabilität vorzufinden sein. Allerdings ist die statistische Wahrscheinlichkeit, ein geeignetes Engagement im Bestand vorzufinden, ungleich geringer als im Kanalisationsneubau.

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

6 Abschätzung der Primärenergie- und CO_2–Reduktion – Beitrag von Ernst A. Müller (Büro eam)

6.1 End- und Primärenergie-Reduktion

Aufgrund der Wärmeleistung kann über die Vollbetriebsstundenzahl der jährliche Nutzenergieverbrauch und über den Jahresnutzungsgrad der Endenergieverbrauch berechnet werden. Für die Hochrechnung werden für die ganze Anlage inkl. Spitzenkessel Vollbetriebsstunden von 2.500 h/a eingesetzt, da neben Raumheizung z.T. auch Warmwasser aufbereitet wird. Für die Grundlast der Wärmepumpenanlage bzw. der kombinierten Anlage WP+BHKW, die auf 30 % des gesamten Wärmeleistungsbedarfes ausgelegt ist, wird mit 5000 h/a gerechnet.

Ausgehend vom Endenergieverbrauch wird der Primärenergieverbrauch mit den nachfolgenden Faktoren von GEMIS 3.0 umgerechnet.[250] Auch die CO_2-Emissionen wurden aufgrund der gleichen Quelle berechnet. Dabei wurde auf die speziellen Angaben für Wärmepumpenstrom abgestützt. Auffallend ist, dass für den Wärmepumpenstrom der Primärenergiefaktor tiefer ist als beim Strom-Mix, hingegen bei der CO_2-Emission deutlich höher.

Tab. 5-1: Faktoren für Primärenergie und CO_2-Emissionen gemäß GEMIS 3.0

Energieträger	Erdgas	Heizöl	Wärmepumpenstrom	Strom-Mix
Primärenergiefaktor pro kWh Endenergie	1,07	1,08	2,79	2,97
Emissionsfaktor CO_2 (g/kWh Endenergie)	229	293	918	689

Darstellung: Büro eam

Insgesamt kann mit der Variante WP+BHKW ein Gebäudebestand mit 2,825 Mio. kW Wärmeleistungsbedarf versorgt werden. Konventionelle Heizanlagen brauchen dafür bei den angenommenen Vollbetriebsstunden von 2.500 h/a und einem Jahresnutzungsgrad von 0,8 also 8,83 TWh/a (31.776 TJ/a) Endenergie. Gemäß den Grundlagen in der Tabelle 1-3 (S. 182) verbraucht die Abwasserwärmenutzung für den gleichen Gebäudebestand 5,31 TWh/a Brennstoffe für das BHKW und den Spitzenkessel. Das sind 3,52 TWh/a oder 40% weniger Endenergie als die konventionellen Heizungen. Die Primärenergie-Einsparung liegt bei 5,74 TWh/a, prozentual bleibt der Wert ebenfalls bei 40 %, da immer nur Brennstoffe verbraucht werden.

[250] Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V. (1997).

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

Tab. 5-2: End- und Primärenergie-Einsparung

Variante WP +BHKW	WP+BHKW	Heizkessel
Endenergieverbrauch (TWh/a):		
Strom	0	0
Brennstoff BHKW	2,37	0
Brennstoff Kessel	2,94	8,83
Total Energieverbrauch	5,31	8,83
Einsparung	*3,51 (40%)*	
Primärenergieverbrauch (TWh/a):		
Total (Brennstoff BHKW bzw. Kessel)	5,74	9,53
Einsparung	*3,79 (40%)*	
Variante EWP	EWP	Heizkessel
Endenergieverbrauch (TWh/a):		
Strom	0,87	0
Brennstoff Kessel	2,32	6,97
Total Endenergieverbrauch	3,20	6,97
Reduktion	*3,77 (54%)*	
Primärenergieverbrauch (TWh/a):		
Strom	2,44	0
Brennstoff Kessel	2,51	7,53
Total Primärenergieverbrauch	4,95	7,53
Reduktion	*2,58 (34%)*	

Darstellung: Büro eam

Bei der Variante EWP ist das Potenzial kleiner, es können Gebäude mit Abwasserwärme versorgt werden, für die heute Erdöl- oder Erdgasheizungen 6,97 TWh/a (25.096 TJ/a) Endenergie verbrauchen. Der Endenergieverbrauch für die EWP und den Spitzenkessel liegt bei 3,20 TWh/a, und damit 54 % tiefer als bei den konventionellen Heizungen. Auf Primärenergiestufe steigt vor allem der Stromverbrauch stark an, so dass die Einsparungen bei 2,58 TWh/a oder bei 34 % liegen.

Zu diesen Energieeinsparungen tragen die Nutzung der "erneuerbaren" Energie aus dem Abwasser bei, aber auch die besseren Wirkungsgrade der Wärmepumpe.

Der Beitrag der Wärmegewinnung aus dem Abwasser liegt bei der WP+BHKW-Variante bei 30,7% des Brennstoffverbrauches der konventionellen Heizanlage (vgl. Tab. 1-3, S. 182), was in der Hochrechnung für NRW also einen Beitrag von 2,71 TWh/a Endenergie (vorwiegend Heizöl oder Erdgas) ergibt, bei der EWP-Variante 40,0% oder absolut betrachtet mit 2,79 TWh/a praktisch gleich groß wie bei der WP-BHKW-Variante.

Die Verluste werden bei der WP+BHKW-Variante im Vergleich zu konventionellen Anlagen um 9,3% oder um 0,82 TWh/a Endenergie (Heizöl oder Erdgas) und bei der EWP-Variante um 14,4% oder 1,0 TWh/a. Bei der EWP-Variante wird dadurch der Verbrauch an fossilen Brennstoffen gesenkt, dafür aber auch zusätzlicher Strom benötigt (vgl. Primärenergieverbrauch).

Die beiden Varianten WP+BHKW und EWP haben unterschiedliche energetische, umweltpolitische, betriebliche und wirtschaftliche Vor- und Nachteile. Welche Variante zukünftig vermehrt Priorität hat, hängt von der Entwicklung der Preise der unterschiedlichen Energieträger, der Politik und der allgemeinen Akzeptanz bei den Bauherren ab. Wir gehen in der Zusammenfassung von einer gleichartigen Entwicklung aus, ohne dass dies als Wertung verstanden werden soll.

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

Tab. 5-3: Realisierbares Wärmepotenzial

	Einheit	WP-BHKW	EWP	Mittel
Wärmeleistung	GW	2,8	2,2	2,5
Endenergie-Einsparung im Vergleich zu konventionellen Heizungen	TWh/a %	3,5 40%	3,8 54%	3,6 47%
Primärenergie-Reduktion im Vergleich zu konventionellen Heizungen	TWh/a %	3,8 40%	2,6 34%	3,2 37%
CO_2-Reduktion im Vergleich zu konventionellen Heizungen	Mio. t/a %	0,9 40%	0,4 21%	0,7 30%

Darstellung: Büro eam

6.2 CO_2-Reduktion

Gehen wir davon aus, das zur Hälfte Erdgas und zur Hälfte Heizöl substituiert wird, so werden bei Ausschöpfung des Potenzials mit der Variante WP+BHKW 0,9 Mio. Tonnen CO_2-Emissionen oder 40 % reduziert, und mit der Variante EWP nur halb soviel (0,4 Mio. Tonnen bzw. 21 %).

Tab. 5-2: Reduktion CO_2-Emissionen

	Erdgas		***Heizöl***	
Variante WP +BHKW	WP+BHKW	Heizkessel	WP+BHKW	Kessel
CO_2-Emssionen (Mio. t/a):				
Strom	0	0	0	0
Brennstoff Kessel/BHKW	1,22	2,02	1,56	2,59
Total	1,22	2,02	1,56	2,59
Einsparung	*0,81 (40%)*		*1,03 (40%)*	
Variante EWP	EWP	Heizkessel	EWP	Kessel
CO_2-Emssionen (Mio. t/a):				
Strom	0,80	0	0,83	
Brennstoff Kessel	0,53	1,60	0,68	2,04
Total	1,33	1,60	1,48	2,04
Einsparung	*0,26 (16%)*		*0,56 (27%)*	

Darstellung: Büro eam

Die beiden Varianten WP+BHKW und EWP haben unterschiedliche energetische, umweltpolitische, betriebliche du wirtschaftliche Vor- und Nachteile. Welche Variante zukünftig vermehrt Priorität hat, hängt von der Entwicklung der Preise der unterschiedlichen Energieträger, der Politik und der allgemeinen Akzeptanz bei den Bauherren ab. Wir gehen in der Zusammenfassung von einer gleichartigen Entwicklung aus, ohne dass dies als Wertung verstanden werden soll.

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

6.3 Zusätzliche Effekte

6.3.1 Raumkühlung

In den obigen Überlegungen ist die Wirkung aus der gleichzeitigen Kühlung mit der Abwasser-Wärmepumpe noch nicht berücksichtigt. Wärmepumpenanlagen, die für Kühlzwecke eingesetzt werden, brauchen nur ein Fünftel bis ein Zehntel des Stromes wie konventionelle Kälteanlagen. Dieses Potenzial kann im Rahmen dieses Abschnitts aufgrund mangelnder Datengrundlagen nicht genauer berechnet werden, es soll aber doch eine erste Abschätzung gemacht werden. Das Potenzial liegt bei einem solchen Objekte etwa in der gleichen Größenordnung wie die Wärmepumpen an Strom verbrauchen. Wird angenommen, dass ein Zehntel der versorgten Gebäude gekühlt werden müssen, steigt das Potenzial auf Endenergiestufe um 0,1 TWh/a Strom, auf Primärenergiestufe sogar um 0,3 TWh/a.

Durch Berücksichtigung der Kühlung steigt die Wirkung auf Endenergiestufe nur wenig an (um 1 %). Da es sich aber um hochwertigen Strom handelt, steigen die Einsparungen auf Primärenergiestufe (auf 40 %) und auch auf CO_2-Stufe (sogar von 30 auf 38 %) beachtlich an.

Tab. 5-4: Wirkung der Kühlung im Realisierungspotenzial

	Einheit	Wärme	Kälte	Total
Endenergie-Einsparung im Vergleich	TWh/a	3,6	0,1	3,7
zu konventionellen Heizungen	%	47%	1%	48%
Primärenergie-Reduktion im Vergleich	TWh/a	3,2	0,3	3,5
zu konventionellen Heizungen	%	37%	3%	40%
CO_2-Reduktion im Vergleich	Mio. t/a	0,7	0,2	0,9
zu konventionellen Heizungen	%	30%	8%	38%

Darstellung: Büro eam

6.3.2 Industriekläranlagen

Bisher wurden die Potenziale der Industriekläranlagen noch nicht berücksichtigt, da keine fundierten Datengrundlagen verfügbar sind. Da aber die Abwassermenge der Industriekläranlagen beinahe in der gleichen Größenordnung liegen wie bei den kommunalen Kläranlagen, die Abwassertemperaturen aber deutlich höher liegen dürfte, dürfte das theoretische Abwasserwärmepotenzial der Industriekläranlagen in etwa doppelt so groß sein wie das bisher betrachtete Potenzial der kommunalen Kläranlagen. Umgekehrt ist schwer zu beurteilen, ob mehr oder weniger potenzielle Abnehmer rund um die Industriekläranlagen zu finden sind. Wir machen deshalb den - vereinfachten - Ansatz, dass das theoretische Abwasserwärmepotenzial der Industriekläranlagen doppelt so groß ist wie bei den kommunalen Kläranlagen, dafür nur halb so viele potenzielle Abnehmer zu finden sind. Dieser Ansatz ist allerdings in einer Forschungsarbeit noch zu untersuchen.

Unter dieser vereinfachten Annahmen ist das Realisierungspotenzial der Industriekläranlagen gleich groß wie bei der Nutzung nach der Kläranlage. Wir gehen auch davon aus, dass der Anteil der gekühlten Gebäude gleich ist.

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

Unter Berücksichtigung der Industriekläranlagen bleiben die Einsparungen in Prozent gleich wie vorher, das Realisierungspotenzial steigt aber auf Stufe Primärenergie von 3,5 auf 4,1 TWh/a und die CO_2-Reduktion von 0,9 auf 1,1 Mio. Tonnen pro Jahr.

Tab. 5-4: Realisierungspotenzial inklusive Kühlung und Industriekläranlagen

	Einheit	kommunale Kläranlagen	Industrie-kläranlagen	Total
Wärmeleistung	GW	2,5	0,5	3,0
Endenergie-Einsparung im Vergleich zu konventionellen Heizungen	TWh/a %	3,7 48%	0,7 48%	4,4 48%
Primärenergie-Reduktion im Vergleich zu konventionellen Heizungen	TWh/a %	3,5 40%	0,6 40%	4,1 40%
CO_2-Reduktion im Vergleich konventionellen Heizungen	Mio. t/a %	0,9 38%	0,2 38%	1,1 zu 38%

Darstellung: Büro eam

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

7 Zusammenfassung und weiterer Forschungsbedarf

Der vorliegende Forschungsbericht beschäftigt sich mit der Wärmerückgewinnung aus Abwasser. Unter Berücksichtigung der abwassertechnischen Gegebenheiten war ein Anforderungskatalog für Kanalnetz- und Kläranlagenbetreiber anzufertigen. Zur vollständigen Erfassung der angebots- und nachfrageseitig involvierten Akteure waren überdies Anforderungen von Energieversorgungsunternehmen als Vermarkter der Wärmeenergie sowie Liegenschaftsbesitzer bzw. Bauherren als Nachfrager zu berücksichtigen. Eine weitere Zielsetzung der Studie besteht in der Abschätzung des technisch und wirtschaftlich vertretbaren Potenzials der Wärmerückgewinnung in NRW sowie der daraus resultierenden Primärenergieeinsparungen und CO_2-Emissionsminderungen.

Das Forschungsprojekt wurde im Jahr 2004 im IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur in Gelsenkirchen bearbeitet. Als Projektpartner standen dem IKT die schweizer Unternehmen Ryser Ingenieure AG, Bern, sowie Büro eam, Zürich, zur Seite. Die durch den Auftraggeber, das MUNLV NRW, für die vorliegende Studie vertraglich bestimmten Leistungen von Ryser Ingenieure AG bestanden in der Erstellung von Berichten zu den Themen „Praxiserfahrungen in der Schweiz“, „Anforderungen aus Sicht der Kanalbetreiber“, „Empfehlungen zur Dimensionierung von WT-Anlagen“ und „Darstellung von Grenzkriterien für die Wärmenutzung“. In gleicher Weise bestand die Leistungsverpflichtung von Büro eam in einer Ausarbeitung zur „Darstellung des Wärmepotenzials in NRW“. Die von Beat Kobel für Ryser Ingenieure AG und Ernst A. Müller für Büro eam vorgelegten Beiträge sind auszugsweise in diesem Forschungsbericht enthalten und in den jeweiligen Kapitelüberschriften durch einen entsprechenden Hinweis kenntlich gemacht. Die Beiträge von Ryser Ingenieure AG und Büro eam repräsentieren die Argumentation der Projektpartner, die auf den in der Schweiz gewonnenen Erfahrungen beruhen. Die Darstellung der Beiträge von Ryser Ingenieure AG und Büro eam beschränkt sich im Rahmen dieses Forschungsberichtes auf diejenigen inhaltlichen Ausführungen, die für die in dieser Studie zu behandelnde Fragestellungen aus Sicht des Verfassers relevant sind. Die inhaltliche und redaktionelle Verantwortung für die zugrundeliegenden Berichte tragen Ryser Ingenieure AG und Büro eam.

Ausgangspunkt für die Untersuchung ist die Überlegung, dass Abwasser eine potenzielle Ressource für die Rückgewinnung von Wärme darstellt, welche für die Beheizung und Warmwasserversorgung von Liegenschaften eingesetzt werden kann. Die Rückgewinnung erfolgt mit Hilfe von Abwasserwärmenutzungsanlagen (AWN-Anlagen): Wärmetauscher entziehen dem Abwasser Wärme, und Wärmepumpen heben die rückgewonnene Wärme auf ein nutzbares Niveau an. In warmen Sommermonaten können AWN-Anlagen invers betrieben werden, d.h. zur Klimatisierung von Liegenschaften eingesetzt werden.

Das Thema der Wärmerückgewinnung aus Abwasser berührt zugleich energiewirtschaftliche wie auch abwassertechnische Fragestellungen. Beide Themenkomplexe - die Verfügbarkeit von Energie und der Schutz der Gewässer - sind von vitaler Bedeutung für die Bevölkerung unseres Landes. Da die Errichtung und der Betrieb der Entwässerungs-Infrastruktur u.a. aus Gründen des Gewässerschutzes erfolgt, ist hinsichtlich der Wärmerückgewinnung aus Abwasser den umweltpolitischen Zielen des Gewässerschutzes Priorität vor energiewirtschaftlichen Zielen einzuräumen. Mit anderen Worten: Die energiewirtschaftlich motivierte Betrachtung der Wärmerückgewinnung aus Abwasser kommt erst dann zum Tragen, wenn Zielkonflikte zu Fragen des Gewässerschutzes ausgeschlossen werden können.

Diese grundlegende Ausrichtung der Prioritäten spiegelt sich im weiteren Aufbau der vorliegenden Forschungsarbeit wider: Aufbauend auf Ausführungen zur prinzipiellen Machbarkeit der Wärmerückgewinnung im dritten Kapitel sind im vierten Ka-

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

pitel die technischen und akteursseitigen Anforderungen dargestellt. Ein Schwerpunkt des Forschungsberichts liegt in der Analyse der Anforderungen der Kanalnetzbetreiber zum Vollzug der Entwässerungsaufgabe. Darüber hinaus sind auch ökonomische und vertragsrechtliche Anforderungen erläutert. Um dem Akteursbezug hinreichend Rechnung zu tragen, sind zudem die Anforderungen der Energieversorgungsunternehmen erläutert. Im Anschluss an die Untersuchung der Anforderungen werden zwei unterschiedliche Wege zur Abschätzung des Potenzials der Wärmerückgewinnung aus Abwasser in Nordrhein-Westfalen vorgestellt. Darauf aufbauend erfolgt eine Skizzierung der potenziellen energiewirtschaftlichen und umweltpolitischen Bedeutung der Wärmerückgewinnung aus Abwasser.

Vor dem Hintergrund der zuvor dargestellten inhaltlichen Ausrichtung der Forschungsarbeit und der jeweiligen Aufgaben auf die Projektpartner lassen sich die Ergebnisse des vorliegenden Berichtes in den nachfolgenden Kernaussagen zusammenfassen:

1. **Wärmerückgewinnung aus Abwasser ist technisch machbar und unter bestimmten Rahmenbedingungen auch wirtschaftlich vertretbar.**

Hinsichtlich der technischen Machbarkeit der Wärmerückgewinnung aus Abwasser ist festzustellen, dass die Wärmeversorgung aus Abwasser mit Hilfe von AWN-Anlagen (Abwasserwärmenutzungsanlagen) erfolgt. Die Wärmepumpe einer AWN-Anlage kann zur Grundlastversorgung für die Raumheizung und Warmwasserversorgung sowie zur Klimatisierung eingesetzt werden. Bei darüber hinausgehenden Bedarfen übernimmt eine konventionelle Heizungsanlage die Warmwasserversorgung. Da zwei Heizungsanlagen zur Wärmeversorgung erforderlich sind, handelt es sich um ein bivalentes System. In der Schweiz sind bis heute rund 20 Anlagen zur Abwasserwärmenutzung realisiert. Probleme oder Betriebsstörungen der AWN-Anlagen sind bis auf einen Pumpendefekt (Binningen) und verschmutzungsbedingter Effektivitätsminderung (Zwingen) nicht bekannt.

Die Dimensionierung von AWN-Anlagen (siehe Bericht von B. Kobel) ist im Anschluss an die Ermittlung des Wärmebedarfs einer Liegenschaft vorzunehmen. Die Wärmepumpe wird auf eine Leistung von 30 - 40 % der maximal erforderlichen Heizleistung ausgelegt. Für die Dimensionierung der Wärmetauscher werden die folgenden Richtwerte angegeben: 2 bis 3 kW je m^2 Wärmetauscheroberfläche bei verschmutztem Abwasser, 3 bis 4 kW je m^2 Wärmetauscheroberfläche bei gering verschmutztem Abwasser oder regelmäßiger Reinigung.

Die ökonomische Machbarkeit der Nutzung der Abwasserwärme setzt auf den nachfolgenden Voraussetzungen auf:

a) Die Akteure Netzbetreiber (NB) und Energieversorgungsunternehmen (EVU) können jeweils einen wirtschaftlichen Vorteil infolge des Einsatzes von AWN-Anlagen realisieren (Kooperationsgewinn). Hierin besteht eine wesentliche Voraussetzung für die freiwillige Kooperation der Akteure auf der Seite der Leistungserstellung. Darüber hinaus müssen auch Liegenschaftseigentümer bzw. Bauherren als Nachfrager der Wärmeenergie von dem Einsatz der AWN-Anlagen profitieren.

b) NB und EVU treffen im Konsens eine Vereinbarung über die Aufteilung des Kooperationsgewinns.

c) Zur Stabilisierung der Kooperation schließen NB und EVU langfristige und verbindliche Verträge.

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

2. Folgende technische und akteursseitige Anforderungen stellen sich generell an den Einbau und den Betrieb von Wärmetauschern in Abwasserkanalisationen bzw. den Einsatz von AWN-Anlagen:

Wärmetauscher lassen sich in Abwasserkanalisationen einbauen, wenn zugleich die nachfolgend genannten, voneinander unabhängigen Bedingungen erfüllt sind (siehe hierzu den Beitrag von B. Kobel):

- Geeignet sind sogenannte begehbare Mischwasser- oder Schmutzwasserkanalisation mit einem Mindestquerschnitt ≥ DN 800 (nicht geeignet sind Niederschlagswasserkanalisationen und Kanalisationen mit einem Querschnitt < DN 800).

- Geeignet sind Beton- und Zement-Kanäle, gemauerte oder mit Klinkerplatten ausgekleidete Kanäle (nicht geeignet sind GFK-, Kunststoff-, Stahl- und Steinzeug-Kanäle).

- Geeignet sind Kanäle, die ein bestimmtes Mindestgefälle aufweisen.

- Geeignet sind Kanäle, wenn keine Einschränkungen der Entwässerungsfunktion infolge der Querschnittsverkleinerung durch den Einbau von WT-Elementen auftreten.

- Geeignet sind Kanäle mit einem mittleren Trockenwetterabfluss von 15 l/s.

- Die Abwassertemperatur muss auch im Winter nach der Wärmeentnahme im Kläranlagenzulauf noch über 10 °C liegen.

- Geeignete Kanalabschnitte verlaufen über eine Länge von bis zu 200 m (maximale Länge der verbundenen WT-Elemente) möglichst geradlinig.

- Geeignet sind Kanäle, die während der Bauphase und des Betriebs die erforderlichen Zugänglichkeiten aufweisen.

Die Kanalnetzbetreiber stellen technische Anforderungen (Vollzug der Entwässerungsaufgabe) sowie ökonomische und vertragsrechtliche Anforderungen an den Einsatz von WT in Abwasserkanalisationen. Die aus dem Vollzug der Entwässerungsaufgabe resultierenden technischen Anforderungen beziehen sich zum einen auf den Bau und Betrieb von Kanalisationen, zum anderen auf den Betrieb von Kläranlagen. Das IKT hat eine Untersuchung der betrieblichen Anforderungen in Kanalisationen durchgeführt, um die durch den Einbau von Wärmetauschern auftretenden Fragestellungen zu beantworten. Es wurden Versuche zur Beurteilung der Dauerhaftigkeit und der Arbeitssicherheit sowie zu den Auswirkungen von Kanalreinigungen durchgeführt.

Zur Untersuchung der Dauerhaftigkeit wurde das Verhalten von WT-Elementen im Rahmen von Einlagerungsversuchen (vor und nach betrieblicher Belastung der WT-Elemente) sowie durch Abriebversuche in der Darmstädter Kipprinne analysiert.

- Da im Rahmen von systematischen Untersuchungen von Kanalisationsnetzen zunehmend Korrosionsschäden festgestellt wurden, kommt der Untersuchung der Korrosion von WT-Elementen eine besondere Bedeutung zu. In Einlagerungsversuchen wurde das Korrosionsverhalten von Edelstahl mit der Werkstoffnummer 1.4571, also dem in Lever-

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

kusen für die WT-Elemente verwendeten Werkstoff, mit vier unterschiedlichen Medien (destilliertes Wasser, Schwefelsäure, Peroxidlösung, Natronlauge) untersucht. Dabei kamen neuwertige sowie mechanisch vorbelastete Prüfkörper zum Einsatz. Die Versuchsergebnisse zeigten, dass an den verwendeten Edelstahl-Prüfkörpern keine bis nur kaum wahrnehmbare Veränderungen (Fleckenbildung) festzustellen waren. Die Abtragsrate des Metalls lag unterhalb des Grenzwertes von 0,1 g/h m^2. Insgesamt ist auf der Grundlage der durchgeführten Tests mit keinen Einschränkungen der Dauerhaftigkeit durch Korrosionsvorgänge zu rechnen.

- Die darüber hinaus durchgeführten Abriebversuche in der Darmstädter Kipprinne brachten nach 200.000 Lastwechseln eine maximale Abriebtiefe von 0,24 mm hervor. Auch hier waren weitere Auswirkungen auf den Kanalbetrieb nicht zu erkennen.

Kanalablagerungen gehören zu den unerwünschten Begleiterscheinungen der Abwasserableitung. Da Ablagerungen mitunter zu einer Beeinträchtigung der hydraulischen und hygienischen Gegebenheiten in Kanalisationen führen, sind Kanalreinigungen erforderlich. Ferner verlangt die Zustandserfassung der Kanalsubstanz durch optische Inspektionen eine Reinigung der Kanalisation. Auch WT-Elemente, die dauerhaft von einem Abwasserstrom überspült werden, sind zu reinigen - zum einen, um die Effektivität der Wärmeübertragung zu erhöhen, zum anderen um Voraussetzungen für Inspektionen der WT-Elemente zu schaffen. Zumeist wird zur Kanalreinigung das Hochdruckspülverfahren eingesetzt. Die dabei auftretenden Belastungen sind in Schleif- und Fallversuchen sowie in einem Hamburger Spülversuch mit 30 Spülvorgängen untersucht worden.

- Durch den während des Hamburger Spülversuchs zugegebenen Splitt wurde die Oberfläche des Probekörpers angerauht, bzw. die auftreffenden Körner verursachten kleine Krater auf der Oberfäche des Wärmetauschers. Auch 30 Schleifvorgänge mit einer HD-Düse (4,5 kg) führten nur zu leichten oberflächlichen Schleifspuren, die keine nennenswerte Tiefe aufwiesen. Schließlich waren auch im Anschluss an die Versuchsreihe mit einer aus ca. 30 cm Höhe fallenden HD-Düse (4,5 kg) keine auffälligen Veränderungen am Prüfkörper festzustellen. Insgesamt sind aufgrund der durchgeführten Untersuchungen keine Veränderungen zu erwarten, die einen negativen Einfluss auf die Dauerhaftigkeit der WT-Elemente haben.

Nahezu jeder fünfter Arbeitsunfall in der gewerblichen Wirtschaft in Deutschland wird durch Stolpern, Rutschen und Stürzen - sogenannte SRS-Unfälle - verursacht. Bei der Begehung abwassertechnischer Anlagen ist das Betriebspersonal derartigen SRS-Gefährdungen ausgesetzt. Die Gefahr des Ausrutschens im Kanal hängt u.a. mit den unterschiedlichen Oberflächeneigenschaften der verschiedenen, in Kanalisationen verwendeten Werkstoffe zusammen. Eine physikalische Größe, die mit der Gefahr des Ausrutschens in Verbindung gebracht werden kann, ist die sogenannte Haftreibungszahl bzw. der Haftreibungskoeffizient oder die Gleitreibungszahl bzw. der Gleitreibungskoeffizient. Die Verwendung von WT-Elementen in Abwasserkanalisationen kann zu Veränderungen der Oberflächeneigenschaften des zu begehenden Kanalabschnittes führen. Inwieweit mit einer höheren Gefahr des Ausrutschens auf den WT-Elementen zu rechnen ist, wurde im IKT mit Hilfe von zwei Versuchsreihen durch Bestimmung der Haft- und Gleitreibungsbeiwerte untersucht.

- Im Rahmen der ersten Versuchsreihe wurden die Haftreibungs- bzw. Gleitreibungsbeiwerte zwischen Edelstahl mit der Werkstoffnummer 1.4571 und einem Elastomer an separat hergestellten Probekörpern unter Variation der Oberflächenbeschaffenheit (trocken, Wasser als Gleitmittel, Biofilm als Gleitmittel) bestimmt. Der Versuch wurde mit Hil-

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

fe eines modifizierten Kastenschergerätes durchgeführt, bei dem die Auflast und auch die Schergeschwindigkeit mit hoher Genauigkeit eingestellt werden konnten.

- Im Rahmen der zweiten Versuchsreihe wurde mit Hilfe eines speziell konstruierten Versuchsstandes der Gleitreibungsbeiwert zwischen einer Schuhsohle und einem originalen WT-Element aus Edelstahl bzw. einer Schuhsohle und einer Betonoberfläche ermittelt. Die Untersuchung wurde unter Berücksichtigung der speziellen WT-Elemente-Geometrie und unter Zugabe von Gleitmitteln durchgeführt.

- Die beiden Versuchsreihen lieferten unterschiedliche Ergebnisse. Die mit dem modifizierten Kastenschergerät ermittelten Reibungskoeffizienten sind durchgehend niedriger als die mit dem Gleitreibungsprüfgerät ermittelten Werte. Zudem liefert das Gleitreibungsprüfgerät bei nassen Gleitflächen höhere Koeffizienten. Ein Grund für beide Effekte kann in der Wahl der gewählten Elastomerauflagen gesehen werden. Während bei den Versuchen mit dem modifizierten Kastenschergerät das Elastomer jeweils vollflächig auflag, wurden bei dem Gleitreibungsprüfgerät bewusst das Sohlenprofil eines Arbeitsschuhs verwendet. Diese Punktlagerung führte wahrscheinlich dazu, dass das zwischen den Gleitflächen befindliche Wasser verdrängt wurde und so der Unterschied zwischen trockenen und nassen Oberflächen nicht ins Gewicht fiel. Profilierte Sohlen sorgen dafür, die Gefahr des Ausrutschens zu vermindern.

- Da die o.g. Versuchsreihen zu unterschiedlichen und schwer interpretierbaren Ergebnissen führten, wurde ergänzend die Gefahr des Rutschens auf den WT-Elementen während einer Begehung des Leverkusener Wärmetauschers durch vergleichende subjektive Bewertungen beurteilt. Zum Vergleich standen neben der WT-Oberfläche noch Beton- bzw. Kanalklinkeroberflächen zur Verfügung. Die Gefahr des Rutschens auf der WT-Oberfläche war mit der Rutschgefahr auf der Betonoberfläche vergleichbar. Eine subjektiv höhere Rutschgefahr bestand auf der Oberfläche aus Kanalklinker.

- Auf der Grundlage der im IKT durchgeführten Untersuchungen zur Arbeitssicherheit ließen sich insgesamt folgende Feststellungen treffen: Die Haft- und Gleitreibungskoeffizienten für eine nasse Edelstahloberfläche weisen im Vergleich zu den herangezogenen Koeffizienten für mit Biofilm benetzten Betonoberflächen geringfügig geringere bis gleiche Werte auf. Folglich ist mit einer prinzipiell erhöhten Gefahr des Ausrutschens auf Edelstahloberflächen im Vergleich zu Betonoberflächen zu rechnen. Um die Bedeutung der Messwerte in der Praxis zu überprüfen, wurde eine Begehung der in Leverkusen eingebauten WT-Elemente durchgeführt. Dabei entstand subjektiv der Eindruck, dass eine erkennbar erhöhte Rutschgefahr, wie sie die Messwerte implizieren, für Edelstahloberflächen nicht festgestellt werden konnte. Auf ebenfalls begangenen Kanalklinkeroberflächen erschien die Gefahr des Ausrutschens höher als auf Edelstahl. Insgesamt scheint somit, zur sicheren Seite, die z.B. beim Begehen von Mauerwerkskanälen übliche Vorsicht auch für das Begehen der WT angemessen und ausreichend zu sein.

Aus dem Betrieb von Kläranlagen resultieren weitere Anforderungen in Bezug auf die Abwassertemperatur. Da die Reinigungsleistung von Kläranlagen bei sinkender Abwassertemperatur abnimmt (dieses gilt insbesondere für die Prozesse der Nitrifikation und Denitrifikation) sind bestimmte Mindesttemperaturen im Vorlauf der Kläranlagen erforderlich. Beat Kobel (Ryser Ingenieure AG) stellt in seinem Beitrag fest, dass eine kurzfristige Absenkung der Kläranlagen-Zulauftemperaturen für wenige Stunden die Nitrifikationsleistung kaum beeinflusst. Ständig tiefere Abwassertemperaturen im Zulauf einer Kläranlage

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

können hingegen zu einer verminderten Nitrifikationsleistung und einer erhöhten Ammoniumkonzentration im Ablauf der Kläranlage führen. Die zusätzliche Abkühlung des Abwassers durch die Wärmeentnahme mittels Wärmetauscher schätzt Kobel als gering ein. Zu berücksichtigen ist, dass durch Abwasser-Zuläufe zwischem dem Ort der Wärmeentnahme und der Kläranlage ein kompensierender Temperaturausgleich erfolgen kann. Unterschreitet die Abwassertemperatur im Kläranlagenzulauf einen vorgegebenen Grenzwert für die Sicherstellung der Reinigungsprozesse, ist eine Abschaltung der AWN-Anlage in Erwägung zu ziehen. Daher sind vor allem im Winter die Abwassertemperaturen einer zeitlich engmaschigen Überwachung zu unterziehen.

Über die zuvor dargestellten technischen Anforderungen hinaus haben die Kanalnetzbetreiber ökonomische Anforderungen an den Einsatz von WT in Abwasserkanalisationen zu berücksichtigen. Aus einem Engagement eines Kanalnetzbetreibers in eine AWN-Anlage resultieren Kosten, die nicht durch den Entwässerungsauftrag gedeckt sind und daher nicht aus der Abwassergebühr finanziert werden dürfen. Vielmehr müssen diese Kosten aus den Erträgen von AWN-Anlagen kompensiert werden. Insofern besteht die Mindestanforderung der Kanalnetzbetreiber in einer Kostenneutralität des AWN-Engagements. Damit stellt sich die Frage, welche Kosten und Risiken auf einen Netzbetreiber im hier untersuchten Zusammenhang zukommen können und wie die Netzbetreiber damit umgehen sollten. Im Zusammenhang mit der Nutzung der Abwasserwärme treten Kosten in den nachfolgend genannten Phasen auf:

- In der Vorbereitungsphase fallen Informationskosten an, bspw. für die Ermittlung geeigneter Einsatzmöglichkeiten, für Wirtschaftlichkeitsberechnungen, für Planungs- und Verhandlungsaktivitäten. Im Planungsbereich sind zahlreiche Teilaufgaben zu erbringen (interne Kommunikation, Strukturierung der Teilaufgaben/Arbeitsschritte, Zuordnung von Kompetenzen und Pflichten, Terminplanung, Kapazitätsplanung, technische Vorplanung bzw. Planungsbegleitung, Planung der Qualitätssicherung und der Kriterien für die Abnahme der Baumaßnahme). Überdies sind Verhandlungen zu führen bei der Suche nach einem Vertragspartner (EVU), es fallen Kosten der Vertragsanbahnung an (Kommunikation, Datenbeschaffung, juristische Begleitung), es sind Vertragsverhandlungen zu führen und Vertragsabschlüsse zu erbringen. Insgesamt verlangt bereits die Phase der Vorbereitung einen beachtlichen personellen und zeitlichen Aufwand. Sofern die Errichtung einer AWN-Anlage nicht erfolgt, werden die in der Vorbereitungsphase anfallenden Kosten nicht kompensiert.

- Risikomanagement: Etwaige Risiken sind sorgfältig abzuschätzen und durch geeignete Maßnahmen abzuwehren. Sofern einer Versicherbarkeit nicht gegeben ist, sind alternative Wege der Kompensation zu beschreiten, d.h. Kanalnetzbetreiber müssen sich weitgehende Handlungsfreiheiten vorbehalten, soweit dieses zur Abwehr von Risiken erforderlich ist.

- In der Bauphase fallen bspw. Kosten für Materialbeschaffungen, Baustellen- und Verkehrssicherungsmaßnahmen, Einbauorganisation und Qualitätssicherung an.

- Während der Betriebsphase fallen v.a. Kapitalkosten (Zinsen und Abschreibungen) an. Auch zusätzliche Reinigungsbedarfe zur Inspektion der WT sind mit Kosten verbunden.

- Im Anschluss an die Nutzungsperiode fallen möglicherweise Aufwendungen für den Ausbau und die Entsorgung der WT-Elemente an.

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

- Insgesamt sind die internen Kosten eines Kanalnetzbetreibers bei der Realisierung einer AWN-Anlage beträchtlich. Im Zuge der Errichtung der AWN-Anlage in Leverkusen sind beim Kanalnetzbetreiber interne Kosten in der Größenordnung von 60.000 € bis 80.000 € angefallen. Infolge von Lerneffekten besteht ein erhebliches Senkungspotenzial. Dennoch ist festzustellen, dass für den Kanalnetzbetreiber im Fall der Kompensation dieser Kosten noch kein Nettovorteil aus dem Engagement resultiert. Um einen risikoaversen Netzbetreiber zu einem Engagement in AWN-Anlagen zu bewegen, sind über die obligatorische Mindestanforderung der Kompensation der Kosten weitere Anreize erforderlich. Diese Anreize können monetärer Natur sein (Verteilung des Kooperationsgewinns). Es kann sich allerdings auch um nicht-monetäre Effekte handeln, wenn bspw. infolge der Nutzung der Abwasserwärme ein positives Image in der Öffentlichkeit aufgebaut werden kann.

Schließlich haben die Kanalnetzbetreiber vertragsrechtliche Anforderungen im Rahmen der Gestaltung der privatrechtlich geregelten Leistungs- und Haftungsbeziehungen mit den EVU. Da es sich bei der Errichtung einer AWN-Anlage um eine hochspezifische, langfristige und komplexe Transaktion handelt und nicht alle erdenklichen Zustände der Zukunft prognostizierbar sind, ist der Abschluss eines unvollständigen Rahmenvertrags mit minimalen Transaktionskosten verbunden. Der hier betrachteten Transaktion liegt jedoch ein spezielles Transaktionsmilieu zugrunde: Auf der einen Seite ist die Transaktion aufgrund der Langfristigkeit durch hohe Unsicherheit gekennzeichnet, auf der anderen Seite verhalten sich v.a. öffentliche Kanalnetzbetreiber risikoavers. Somit erklärt sich der Anspruch der Netzbetreiber, Regelungstatbestände möglichst weitgehend zu definieren, während die EVU dann als Optionsempfänger auftreten. Das Beispiel des Umgang der Technischen Betriebe Leverkusen mit dem Risiko des Ausfalls der Mietzinszahlungen (der Betrag für die gesamte Laufzeit wurde mit Unterzeichung des Vertrags fällig), zeigt, dass Kanalnetzbetreiber mögliche Risiken weitgehend eliminieren können.

Hinsichtlich der Anforderunge der EVU ist festzustellen, dass diese primär ökonomische Zielsetzungen verfolgen, daher ist das Kriterium der Rentabilität von zentraler Bedeutung für die Durchführung von Engagements. Daneben können auch die Möglichkeit des Eintritts in neue Märkte bzw. der Ausbau von Marktanteilen sowie die Diversifizierung des Produktportfolios zur internen Kompensation von Ertragsschwankung eine Rolle spielen. Langfristig lassen sich Investitionsentscheidungen jedoch nicht von den Rentabilitätsanforderungen der EVU abkoppeln. Aus den Besonderheiten des Produktes, der Produktion und des Vertriebs von Wärmeenergie resultieren aus der Sicht der EVU die nachfolgenden Anforderungen an die Vermarktung von AWN-Anlagen:

Der Wärmebedarf sollte langfristig einen möglichst konstanten Verlauf aufweisen: Der Einsatz der Wärmegewinnung aus Abwasserkanalisationen ist dort sinnvoll, wo auf lange Sicht gleichbleibende Wärmebedarfe vorzufinden sind.

Der Wärmebedarf sollte in räumlicher Nähe zum Produktionsort auftreten, da sich bei zunehmender Distanz der Investitionsaufwand zu Lasten der Rentabilität auswirkt.

Eine langfristige Bindung der Nachfrager an die Wärmeversorgung mittels Wärmetauscher ist erforderlich. Die beachtlichen Investitionen sind mit Risiken verbunden, bspw. aufgrund der sunk-cost-Eigenschaften des Engagements. Daher ist eine langfristige Bindung der Nachfrager erforderlich, damit durch die Absicherung des Wärmeabsatzes für die gesamte Nutzungsperiode über den für die Amortisation erforderlichen Zeitraum hinaus ein positives Ergebnis erzielt werden kann.

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

Mit den am Markt erzielbaren Preisen für Wärmeenergie und Klimakälte muss ein rentabler Erlös erzielt werden. Dabei muss der Preis über dem vollkostendeckenden Preis liegen. Als obere Grenze ist der für substitutive Güter am Markt herrschende Preis zu berücksichtigen. Der Verkauf von Klimakälte stellt eine bedeutsame Ertragskomponente bei der Vermarktung von AWN-Anlagen dar.

- Vor dem Hintergrund der zuvor dargestellten Anforderungen lassen sich aus Sicht der EVU Nachfrager mit tendenziell mehr oder weniger geeigneten Bedarfsstrukturen identifizieren. Als Beispiel für einen idealen Wärmenachfrager mit einer geeigneten Bedarfsstruktur sind bspw. Hallenbäder anzuführen, weil diese einen ganzjährigen sowie langfristig relativ konstanten Wärme-Input v.a. zur Beheizung des Beckenwassers benötigen. Auch klimatisierte Gebäude zählen zu den geeigneten Nutzern von Wärmetauschanlagen. Über diese generellen Überlegung zur Wirtschaftlichkeit von AWN-Anlagen hinaus sind für konkrete Objekte jeweils detaillierte Wirtschaftlichkeitsanalyse auf der Basis individueller Daten durchzuführen.

3. Im Rahmen der Abschätzung des Potenzials der Abwasserwärmenutzung in NRW konnten die nachfolgenden Ergebnisse herausgearbeitet werden:

Bei der Abschätzung des Potenzials sind die Restriktionen zu berücksichtigen, die zum einen aus den zuvor dargestellten und zum anderen aus weiteren, noch anzuführenden technischen und akteursbezogenen Anforderungen resultieren. Zur Abschätzung des Potenzials wurde ein stufenweises Vorgehen gewählt, wobei die nachfolgend genannten Definitionen verwendet wurden:

- Theoretisch kann Abwasser durch Wärmetauscher bis auf eine Temperatur von 5 °C abgekült werden (Siehe Beitrag von E.A. Müller, S. 179). Das theoretische Abwasserwärmepotenzial versteht sich als die Summe der dem Trägermedium Abwasser durch Wärmetauscher entnehmbaren Wärmeenergie.

- Das Gewinnungspotenzial lässt sich unter Berücksichtigung der für die Wärmerückgewinnung geeigneten Kanalisationsabschnitte ermitteln. Als das Produkt aus der Länge der geeigneten Kanalisationsabschnitte und der mittleren Wärmeentnahme je Kanalmeter lässt sich das Gewinnungspotenzial überschlägig errechnen.

- Unter weiterer Berücksichtigung von Vermarktungsrestriktionen lässt sich das Vermarktungspotenzial als Produkt aus dem Gewinnungspotenzial und der Vermarktungswahrscheinlichkeit überschlägig errechnen.

- Die Abschätzung der realisierbaren Kanalisationsabschnitte wird in zwei Stufen vorgenommen. Zunächst lassen sich unter Berücksichtigung der Präferenzen, des Grades der Risikoaversion und der freien Kapazitäten der involvierten Akteure die prinzipiell realisierungsfähigen Kanalabschnitte abschätzen. Darüber hinaus ist zu berücksichtigen, dass die prinzipiell realisierungsfähigen Kanalabschnitte nicht vollständig mit WT-Elementen ausgestattet werden können, da die maximale Länge von WT-Anlagen auf 200 m begrenzt ist. Somit ist zur Abschätzung des Realisierungspotenzials noch ein "technischer Verschnitt" zu berücksichtigen. Erst auf dieser Grundlage kann eine Aussage zum theoretisch realisierungsfähigen Potenzial der Wärmegewinnung in NRW getroffen werden.

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

- Der Begriff des Wärmeangebots aus Abwasser ist losgelöst von der Potenzialbetrachtung zu verstehen. Von einem Wärmeangebot kann letztlich nur insofern gesprochen werden, als Wärmeproduktion in AWN-Anlagen tatsächlich stattfindet. Das Wärmeangebot ist somit derjenige Teil des realisierbaren Potenzials, der mittels WT in Kanälen gewonnen und vermarktet wird.

Die Abschätzung des gesamtheitlichen, theoretischen Wärmepotenzials von Ernst A. Müller erfolgt unter Bezugnahme auf die gesamte Leistung der bivalenten Anlage inklusive Spitzenlastdeckung. Die Aussagen zur Leistung werden auf der Grundlage einer Einteilung der nordrhein-westfälischen Gemeinden in vier Größenklassen getroffen. Zudem wird bei den Leistungsaussagen zwischen elektrisch und mittels Blockheizkraftwerk betriebenen Anlagen unterschieden. Müller gibt an, dass – bezogen auf den Endenergieverbrauch - die Energieeinsparung der Wärmepumpen zwischen 40 und 54 % gegenüber konventionellen Heizungskesseln liegt.

- Das theoretische Abwasserwärmepotenzial fällt bei größeren Gemeinden bereits aufgrund der höheren Abwassertemperatur höher aus als bei kleineren Gemeinden. Die Wärmeleistung schätzt Müller auf 3,6 MW in Gemeinden bis 20.000 Einwohner, 8,2 MW in Gemeinden von 20.000 bis 50.000 Einwohner, 37,5 MW in Gemeinden mit 50.000 bis 200.000 Einwohnern und 288,2 MW in Gemeinden mit über 200.000 Einwohnern ein.

- Bei Zugrundelegung einer Wärmeentnahme je Laufmeter Kanalleitung in Höhe von ca. 2,5 kW stellt Müller fest, dass ausreichend geeignete Kanalisationsabschnitte für die vollständige Gewinnung des theoretischen Abwasserwärmepotenzials zur Verfügung stehen.

- Hinsichtlich des Vermarktungs- und des Realisierungspotenzials stellt Müller fest, dass keine Restriktionen greifen, so dass auch diese dem theoretischen Abwasserwärmepotenzial entsprechen.

- Unter Einbeziehung des Potenzials nach Kläranlagen, dem ein Anteil von rd. 20 % am gesamten realisierbaren Potenzial zukommt, wurde im Rahmen dieser Potenzialabschätzung für die unterschiedlichen Gemeindengrößen jeweils das nachfolgenden realisierbaren Potenziale (Wärmebedarfsleistung) eingeschätzt:

- Potenzial in Gemeinden mit bis 20.000 Einwohnern: 169.000 MW,

- Potenzial in Gemeinden mit 20.000 bis 50.000 Einwohnern: 367.000 MW,

- Potenzial in Gemeinden mit 50.000 bis 200.000 Einwohnern: 645.000 MW und

- Potenzial in Gemeinden mit mehr als 200.000 Einwohnern: 1.347.000 MW.

- Damit beläuft sich das gesamte Realisierungspotenzial der Wärmerückgewinnung aus Abwasser in NRW bezogen auf die Wäremebedarfsleistung inklusive Spitzelastdeckung nach der Abschätzung von E.A. Müller auf rd. 2,5 Mio. MW.

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

Mit der evolutorischen Potenzialabschätzung des IKT wurde ein alternativer Weg zur Ermittlung des Potenzials der Wärmerückgewinnung aus Abwasser vorgestellt. Ausgangspunkt des Ansatzes ist die Überlegung, dass sich Potenziale in Abhängigkeit von verschiedenen Einflussgrößen über die Zeitachse entfalten können. Mit dem aus diesem Grund als evolutorisch bezeichnete Ansatz wurde der Fokus auf die Ermittlung des jährlich in Abwasserkanalisationen realisierbaren Wärmepotenzials gesetzt. Dabei wurde ausschließlich die aus dem Abwasser entnehmbare Wärmeenergie betrachtet. Die Antriebsenergien für Wärmepumpen und die Energieeinsätze für die zusätzlich erforderlichen Heizungssysteme wurden bei dieser Betrachtung ausgeblendet, da hieraus gegenüber dem Status quo keine zusätzlichen energiewirtschaftlich und umweltpolitisch relevanten Effekte resultieren. Im Übrigen folgte auch dieser Ansatz dem zuvor dargestellten stufenweisen Vorgehen zur Ermittlung des Realisierungspotenzials, wobei allerdings die Ermittlung der für eine potenzielle Realisierung der Wärmerückgewinnung geeigneten (d.h. realisierungsfähigen) Kanalisationsabschnitte betrachtet wird. Zur Ermittlung der Potenziale wurden die jeweilig ermittelten Kanalisationsabschnitte mit dem Wert der mittleren Wärmeentnahme je Laufmeter Kanalisation in Höhe von 2,5 kW multipliziert.

- Zur Abschätzung des Gewinnungspotenzials erfolgte zunächst die Ermittlung der technisch und wirtschaftlich geeigneten Kanalisationsabschnitte. Zu diesem Zweck wurde der rd. 87.300 km umfassende Bestand der kommunalen Abwasserkanalisation in NRW um die nicht geeigneten Kanalisationsabschnitte reduziert. Infolge technischer Restriktionen eignen sich Niederschlagswasserkanalisation und Kanalisationen mit einem Querschnitt < DN 800 nicht für die Wärmerückgewinnung. Darüber hinaus wurden aus der Entwässerung resultierende Restriktionen (Verengung des Kanalquerschnitts infolge des Einbaus von WT-Elementen) sowie wirtschaftliche Restriktionen berücksichtigt. Letzte fanden darin Niederschlag, dass sich ein richtungsweisende Erhöhung der Wirtschaftlichkeit ergibt, wenn der Einbau von WT-Elementen in den Kanalisationsbestand im Rahmen von Kanalsanierungen erfolgt. Andernfalls sind die gesamten bei den Netzbetreibern anfallenden Planungs- und Durchführungskosten der AWN-Anlage anzulasten. Für diesen Fall ließ sich anhand von Wirtschaftlichkeitsberechnungen aufzeigen, dass derzeit noch erhebliche Zweifel hinsichtlich des rentablen Einsatzes von AWN-Anlagen im Kanalisationsbestand bestehen. Vor diesem Hintergrund wurden die Restriktionen zur Ermittlung des Gewinnungspotenzials wie folgt quantifiziert:

Restriktion	**Umfang der Restriktion [in v.H. vom Bestand]**	**geeignete Kanalisationsabschnitte [in v.H. vom Bestand]**
Niederschlagswasserkanalisation	22,3 %	77,7 %
Mindestquerschnitt DN 800	88,2 %	11,8 %
keine Sanierung innerh. 1 Jahres	98,0 %	2,0 %
Entwässerungsrestriktion	25 % bis 50 %	75 % bis 50 %
Summe		0,09 % bis 0,14 %
IKT – eigene Darstellung		

- Unter Berücksichtigung dieser Restriktionen konnten für die Wärmegewinnung geeignete Kanalisationsabschnitte mit einer Länge von 80 km bis 120 km abgeschätzt werden.

- Da im Kanalisationsneubau weder die Sanierungs- noch die Entwässerungsrestriktion greifen, konnten trotz der niedrigeren Ausgangsgröße von 700 km Neuerrichtungen im Jahr geeignete Kanalisationsabschnitte mit einer Länge von 64 km abgeschätzt werden.

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

- Unter weiterer Berücksichtigung der Vermarktungsrestriktionen der EVU – d.h. hinreichender Wärmebedarf in Nähe des Standortes der Wärmegewinnung und hinreichende Auslastung der Anlagen (insbes. Klimatisierungsbedarf) - sowie der Wärmenachfrager (Neuerrichtung bzw. Ersatz bestehender Heizungsanlagen und Lösung aus bestehenden Versorgungsverträgen) wurde für den Kanalisationsbestand eine Vermarktungswahrscheinlichkeit in Höhe von 1 % bis 7 % ermittelt. Die für die Gewinnung und Vermarktung zugleich geeigneten Kanalisationsabschnitte im Kanalisationsbestand belaufen sich demnach jährlich auf eine Länge von 1 bis 8 km.

- Für den Kanalisationsneubau wurden günstigere Bedingungen hinsichtlich der Auslastungsrestriktion unterstellt. Zudem wurden die nachfrageseitigen Restriktionen aufgehoben. Damit ergaben sich für den Kanalisationsneubau Vermarktungswahrscheinlichkeiten von 16,5 % bis 40 %. Die für die Gewinnung und Vermarktung zugleich geeigneten Kanalisationsabschnitte im Kanalisationsneubau belaufen sich demnach jährlich auf eine Länge von 10 bis 26 km.

- Zur Ermittlung des Realisierungspotenzial sind die akteursbezogenen Restriktionen im Kanalisationsbestand mit 40 % bis 60 % angenommen worden, im Kanalisationsneubau mit 50 % bis 70 %. Für die technische „Verschnittrestriktion“ wurde für den Kanalisationsbestand und für den Neubau jeweils eine Wahrscheinlichkeit von 50 % unterstellt. Damit ließen sich folgende realisierungsfähige Kanalabschnitte ermitteln:

  - Für den Kanalisationsbestand konnten alljährlich realisierungsfähige Abschnitte mit einer Länge von bis zu 2,4 km ermittelt werden.

  - Für den Kanalisationsneubau ließen sich alljährlich realisierungsfähige Abschnitte mit einer Länge von 2,5 km bis 9,0 km ermitteln.

- In der Summe konnten im Rahmen der evolutorischen Potenzialabschätzung realisierungsfähige Kanalabschnitte mit einer Länge von 2,7 km bis 11,4 km ermittelt werden. Das bedeutet, dass jährlich für maximal 57 AWN-Anlagen mit 200 m langen WT-Abschnitten realisierungsfähige Kanalabschnitte zur Verfügung stehen. Auf dieser Grundlage ließ sich ein jährliches Realisierungspotenzial für eine technisch und wirtschaftlich vertretbare Wärmeentnahme aus der Kanalisation in Höhe von 6,7 MW bis 28,5 MW ermitteln.

Bei der Ermittlung des realisierbaren Potenzials fanden sowohl statistisch fundierte als auch überschlägig ermittelte Restriktionen Verwendung. Im Rahmen einer Sensitivitätskontrolle konnte festgestellt werden, dass das Potenzial der Wärmegewinnung in den Segmenten „Kanalisationsbestand“ und „Kanalisationsneubau“ zum überwiegenden Teil durch fundierte Restriktionen determiniert ist.

Als eine wesentliche Botschaft der evolutorischen Potenzialanalyse ist der Hinweis zu verstehen, dass in die Abschätzung des Potenzials Annahmen einflossen, die auf real vorfindbare Einflussfaktoren (Stand der Technik, Kosten, Preise) der Gegenwart beruhten. Da diese im Zeitablauf einem Wandel unterliegen können, wurde die Auswirkung der Veränderung der Einflussgrößen auf die Potenzialentwicklung untersucht, wobei Dynamik- und Niveaueffekte unterschieden wurden.

- Für Lern- und Skaleneffekte, steigende Kosten alternativer Heizungssysteme (insbesondere steigende Ölpreise) sowie Verlagerung der Präferenzen der Nachfrager zugunsten regenerativer Energieformen konnte festgestellt werden, dass

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

sich diese positiv auf die Steigung (Dynamik) des Expansionspfades auswirken. Folglich kann das alljährlich realisierbare Potenzial ansteigen. Letztlich wurde auch auf die Möglichkeit verwiesen, dass bei veränderten Randbedingungen auch der Kanalisationsbestand stärker für die Nutzung der Abwasserwärme in Betracht gezogen werden kann.

- Niveaueffekte können zudem eintreten, wenn bspw. die Anforderungen an den Mindestquerschnitt weniger restriktiv ausfallen. Unabhängig vom zeitlichen Verlauf des Potenzialpfades kann dann ein höheres maximal realisierbares Potenzial erreicht werden.

4. Hinsichtlich der Primärenergieeinsparung und CO_2-Reduktion konnten die nachfolgenden Aussagen getroffen werden:

Im Rahmen der vorliegenden Forschungsarbeit wurde schließlich die Fragestellung untersucht, in welchem Umfang AWN-Anlagen einen Beitrag zu den energiewirtschaftlichen und umweltpolitischen Zielen der Versorgungssicherheit (Substitution endlicher durch regenerative Energieträger) und der Umweltverträglichkeit (Verminderung der Treibhausgas-Emissionen) leisten können. In dem Umfang, wie durch AWN-Anlagen Wärme aus Abwasser zurückgewonnen und einer Nutzung zugeführt werden kann, leistet diese Technologie energiewirtschaftlichen und umweltpolitischen Zielen Vorschub: Da die Wärmerückgewinnung mit einem geringeren Primärenergie-Einsatz im Vergleich zu konventionellen Heizungssystemen erbracht werden kann, sind die Effekte der Ressourceneinsparung und Verminderung von CO_2-Emissionen grundsätzlich positiv zu bewerten. Die Abschätzung der Primärenergie-Effekte und der CO_2-Reduktion ist von E.A. Müller durchgeführt worden. Auf der Basis der gesamtheitlichen Abschätzung des Wärmepotenzials konnte eine Primärenergie-Reduktion in Höhe von 2,6 bis 3,8 TWh/a ermittelt werden. Für die Reduktion der CO_2-Emissionen wurden Werte von 0,4 Mio. bis 0,9 Mio. t angegeben. Zusätzliche Effekte können sich aus der Nutzung der AWN-Anlagen zur Raumkühlung sowie unter Einbeziehung von Industrieklärанlagen ergeben.

5. In einer abschließenden Würdigung der Nutzung der Abwasserwärme kann vor dem Hintergrund der im Rahmen dieser Forschungsarbeit gewonnenen Ergebnisse das folgende Fazit gezogen werden:

Die Anforderungen an die Wärmegewinnung aus Abwasserkanälen sind vielfältig, jedoch durchaus zu bewältigen. Insbesondere haben sich keine Anhaltspunkte für eine grundsätzlich konfligierende Beziehung zwischen der Entwässerungsaufgabe und der Abwasserwärmenutzung im Kanal ergeben. Aus wirtschaftlichen Gründen empfiehlt sich derzeit eine Umsetzung v.a. im Bereich des Kanalisationsneubaus, da dort weniger enge Restriktionen vorzufinden sind. In Abhängigkeit von den erzielten Erfolgen und der Entwicklung der Randbedingungen ist im Zeitablauf ein stärkerer Übergang auf den Kanalisationsbestand nicht ausgeschlossen.

Der kurzfristig realisierbare energiewirtschaftliche und umweltpolitische Nutzen scheint nach derzeitigem Stand des Wissens zwar begrenzt zu sein, zu beachten ist indes das Zusammentreffen unterschiedlicher Vorteile der Wärmerückgewinnung aus Abwasser: Es handelt sich bei AWN-Anlagen um dezentrale Systeme der Wärmeversorgung, die sowohl einen Beitrag zur Abkoppelung von den endlichen fossilen Energieträgern sowie zur Reduzierung der Treibhausgas-Emissionen leistet. Die Erhöhung der Versorgungssicherheit durch Diversifikation der Versorgungsquellen benötigt gerade derartige Systeme, auch wenn sich diese derzeit möglicherweise noch als Nischen darstellen. Vor diesem Hintergrund ist deutlich herauszustellen, dass für das im Rahmen der evolutorischen Analyse ermittelte Realisierungspotenzial bereits zum gegenwärtigen Zeitpunkt eine

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

wirtschaftliche Tragfähigkeit anzunehmen ist. Die Fitness dieser Strategie wird sich jedoch erst über die Zeitachse herauskristallisieren.

Vor dem Hintergrund dieser Würdigung kommt der Verfasser nach dem derzeitigen Stand des Wissens zu der Einschätzung, dass die Wärmerückgewinnung mittels AWN-Anlagen unter dem Strich mehr Chancen als Risiken bietet. Dabei ist allerdings nicht zu übersehen, dass Wissensdefizite hinsichtlich der Umsetzungsmöglichkeiten für AWN-Anlagen bestehen: Um diesen zu begegnen, könnten bspw. in einem ersten Schritt aus einer beispielhaften Auswertung von überschaubaren Teilgebieten in NRW ergänzende Informationen über die energiewirtschaftlich relevanten Nutzungspotenziale gewonnen werden. Sofern darüber hinaus von den zuständigen Institutionen eine politische Förderung von AWN-Anlagen erwogen wird, ist zu hinterfragen, welche Instrumente sinnvoller Weise zum Einsatz kommen sollten. In diesem Zusammenhang spielen sicherlich diejenigen Maßnahmen eine besondere Rolle, die geeignet sind, die Wettbewerbsfähigkeit von AWN-Anlagen zu erhöhen, ohne dabei den Weg über Subventionierungen zu beschreiten. Schlussendlich darf bei aller Sorgfalt, die in theoretischen Studien einfließt, nicht übersehen werden, dass dem in konkreten Projekten gewonnenen Erfahrungswissen eine bedeutsame Rolle zukommt. Die Bewältigung dieser Wissensdefizite verbindet sich mit weiteren Forschungsdesideraten, wobei an dieser Stelle nur ein Ausschnitt über mögliche Aktivitäten dargestellt ist. Die Umsetzung der Wärmerückgewinnung aus Abwasser und die Realisierung der damit verbundenen energiewirtschaftlichen und umweltpolitischen Effekte hängen nicht zuletzt davon ab, in welchem Umfang Grundlagen- und Anwendungswissen über die Wärmerückgewinnung verfügbar ist und verbreitet wird.

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

Literatur- und Quellenverzeichnis

Allnoch, Norbert/Schlusemann, Ralf (2003):
Zur Lage der Regenerativen Energiewirtschaft in Nordrhein-Westfalen 2002, Münster 2003

Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen (2003):
Auswertungstabellen zur Energiebilanz für die Bundesrepublik Deutschland von 1990 bis 2002

Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch E.V. (2002):
Gaswärmepumpen, Kaiserslauten 2002

Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch E.V. (1997):
Energieverbrauch und CO_2-Emissionen: Heizsysteme im Niedrigenergieverbrauch: Gesamtemissions-Modell integrierter Systeme (GEMIS): Version 3.0, herausgegeben vom Hessischen Ministerium für Umwelt, Energie und Bundesangelegenheiten,
Wiesbaden 1997

Ashley, R.M. / Crabtree R.W. (1992):
Sediment origins, deposition and build-up in combined sewer systems. In: Water Sience and Technologie, Heft 8 (1992), S. 1 – 12

ATV-DVWK (1990):
Der Zustand der öffentlichen Kanalisation in der Bundesrepublik Deutschland - Ergebnisse der ATV-Umfrage 1990, Korrespondenz Abwasser, 37. Jg. (1990), Heft 10

ATV-DVWK (1992):
Schadenshäufigkeitsverteilung bei TV-untersuchten Abwasserkanälen. Korrespondenz Abwasser Nr. 39 (1992), H. 3, S. 363-367

ATV-DVWK (1993):
Schadensanalyse an Abwasserkanälen aus Beton- und Steinzeugrohren der Bundesrepublik Deutschland - West. Korrespondenz Abwasser Nr. 40 (1003), H. 2, S. 168-179

Baumbach, Günter (1993):
Luftreinhaltung: Entstehung, Ausbreitung und Wirkung von Luftverunreinigungen; Messtechnik, Emissionsminderung und Vorschriften, 3. Aufl., Berlin et al. 1993

bea/prosys (2004):
Potenzialstudie zur Abwasserwärmenutzung in Bremerhaven, Bremerhaven 2004

Berger, Christian et al. (2001):
Zustand der Kanalisation in Deutschland – Ergebnisse ATV-DVWK-Umfrage 2001, Hennef 2001

Binningen AG (2002):
Wärmenutzung aus Abwasser – Projekteingabe Energy Globe, Binningen 2002

Bischofsberger W./C.F. Seyfried (1984):
Wärmeentnahme aus Abwasser. Schriftenreihe des Lehrstuhls für Wassergütewirtschaft und Gesundheitsingenieurwesen der Technischen Universität München, Heft 56, München 1984

Bosseler, Bert/Marco Schlüter (2004):
Kanalreinigung – Düsen, Drücke, Hochdruckstrahlen, Forschungsbericht des IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur, Gelsenkirchen, erscheint in Kürze

Brinkmann, F. (2003):
Wirtschaftlichkeit mittelständischer Energieversorger, in: Energiewirtschaftliche Tagesfragen, 53. Jg. (2003), H. 1/2, S. 20 – 23

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

BUND NRW (2004):
www.bund-nrw.de/braunkohle-aktuelles.htm, 26.05.2004

Bundesverband der Deutschen Wirtschaft (1995):
Erklärung der deutschen Wirtschaft zur Klimavorsorge, Köln 1995

Buri, René/Beat Kobel et al. (2004):
Wärmenutzung aus Abwasser: Leitfaden für Inhaber, Betreiber und Planer von Abwasserreinigungsanlagen und Kanalisationen, im Auftrag Bundesamt für Energie mit den Partnern VSA (Verband Schweizer Abwasser- und Gewässerschutzfachleute) und FES (Schweizerischer Städteverband - Fachorganisation für Entsorgung und Strassenunterhalt), Bern (CH) 2004

Businger E., Energie Freiamt AG (Dezember 2001):
Abwärmenutzung aus der ARA Muri - Betrieb bivalenter Wärmezentralen mit Nahwärmenetzen. Schlussbericht, 2001

Coase, Ronald H. (1937):
The nature of the firm, in: Economica, 4. Jg. (1937), S. 386 – 405

Dietler M., Elektra Birseck Münchenstein (EBM) (2004):
Abwärmenutzung aus bestehendem Schmutzwasserkanal in Binningen - Energiebilanz und Betriebsverhalten im Jahr 2003. Schlussbericht, 2004

Dohmann, Max et al. (1997):
Die Entwicklung der Marktnachfrage nach Abwasserentsorgungsdienstleistungen in Deutschland. Gutachten im Auftrag des Bundesverbandes der Deutschen Entsorgungswirtschaft e.V. (Hrsg.): Taschenbuch für die Entsorgungswirtschaft, Aachen, Köln 1997

Elektra Birseck Münchenstein (EBM) et al. (2002):
Wärmeversorgung Binningen AG - Wärmenutzung aus Abwasser. Projekteingabe „Energy Globe“, 2002

Energieagentur NRW (2001):
Contracting in Kommunen – und es funktioniert doch!, Wuppertal/Duisburg 2001

Energieagentur NRW (2002):
Ein Leitfaden zur Projektabwicklungsform Contracting, Wuppertal 2002

Energiebroschüre Nordrhein-Westfalen (2001):
Energiebroschüre_NRW_2001.pdf, www.mvel.nrw.de

Enquete-Kommission:
Globalisierung der Weltwirtschaft – Herausforderungen und Antworten. Kurzfassung des Abschlussberichtes vom 24. Juni 2002

Erlei, Mathias/Peter-J. Jost (2001):
Theoretische Grundlagen des Transaktionskostenansatzes, in: Jost, Peter-J. (Hrsg.): .): Der Transaktionskostenansatz in der Betriebswirtschaftslehre, Stuttgart 2001, S. 35 –75

Elektrizitätswerk der Stadt Zürich (ewz), Energiedienstleistungen (2000):
Wärmeverbund Wipkingen - Saubere Luft dank Wärme aus Abwasser. Informationsbroschüre, Zürich 2000

Falk, Christian/Marco Schlüter/Pamela et al. (2000):
Empfehlungen zur Kanalreinigung; Forschungsvorhaben am IKT im Auftrag des Ministeriums für Umwelt, Raumordnung und Landwirtschaft des Landes NRW; Gelsenkirchen (Mai 2000)

Falcke H./A. Kaste/Gerta Mentfewitz (2003):
Entwicklung und Stand der Abwasserbeseitigung in Nordrhein-Westfalen. Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (MUNLV) des Landes Nordrhein-Westfalen, Düsseldorf 2003

© 2005 All rights reserved by GEK mbH F:\PROJEKTE\0118 Wärmegewinnung aus Abwasserkanälen\Endbericht\docs\F0118-Abschlussbericht.doc

Fischedick, M. (2004):
Erneuerbare Energien – Schlüsselmärkte für die Zukunft, in: www.energieland.nrw.de/aktuelles/fk2004/04-Eneuerbare_Energien.pdf, Vortrag auf 8. Fachkongress für Zukunftsenergien am 10. Februar 2004 in Essen

Fontanari, Martin (1996):
Kooperationsgestaltungsprozesse in Theorie und Praxis, Betriebswirtschaftliche Schriften H. 138, Berlin et al. 1996

Frischknecht R./M. Faist Emmenegger(2004):
Ökobilanz einer Wärmepumpe mit Abwärmenutzung aus Rohabwasser, im Auftrag Amt für Hochbauten der Stadt Zürich, Uster (CH) 2004

Fritz, Joachim M./Rainer Kampmann (2002):
US-amerikanische Leasingtransaktionen für das Kanalnetz der Stadt Gelsenkirchen, in: KA - Wasserwirtschaft, Abwasser, Abfall, 2002 (49), Nr. 11, S. 1555-1558

Gujer W./M. Henze/T. Mino T./M. van Loosdrecht (1999):
Activated sludge model No. 3 (ASM3). Water Science and Technology Band 39 (1999), H. 1, S. 183-193

Gujer W./A.T. Larsen (1995):
The Implementation of biokinetics and conservation principles in ASIM. Water Science and Technology Band 31 (1995), H. 2, S. 257-266

Head M.A./J.A. Oleszkiewicz (2004):
Bioaugmentation for nitrification at cold temperatures. Water Research Band 38 (2004), H. 3, S. 523-530

Hennerkes, Jörg (2003):
Sprechzettel zur Eröffnung der Eurosolar/Energieagentur NRW-Tagung „Dezentrale Energiespeicherung – Schlüssel zur wirtschaftlichen Entfaltung erneuerbarer Energien“ zum Thema „Die Rolle der erneuerbaren Energien und der Energieeffizienz in der Energiepolitik des Landes NRW“ am 08.04.2003

Holler, Manfred/Gerhard Illing (2000):
Einführung in die Spieltheorie, 4., vollst. überarb. und erw. Aufl., Berlin et al. 2000

Hoppe, Franz (2002):
Parameter des Hochdruckspülversuches nach dem Hamburger Modell. Stadtentwässerung Hamburg, August 2002

Humm O. (1998):
Wärme aus dem Abwasserkanal in Zürich-Wipkingen (1998). Haus Tech 4/98, S. 42-44

Imhoff, Karl (1999):
Taschenbuch der Stadtentwässerung, 29., verb. Aufl., München, Wien 1999

Jarke, Philipp (2004):
Geld aus der Kloake, in: Der Spiegel, H. 33 (2004), S. 117

Jost, Peter-J. (2001):
Der Transaktionskostenansatz im Unternehmenskontext, in: Jost, Peter-J. (Hrsg.): Der Transaktionskostenansatz in der Betriebswirtschaftslehre, Stuttgart 2001, S. 9 - 34

Koch G./M. Kühni/H. Siegrist (2001):
Calibration and validation of an ASM3-based steady-state model for activated sludge systems – part 1: Prediction of nitrogen removal and sludge production. Water Research, Band 35, Heft 9, Seiten 2235-2245

Koch G./M. Kühni/W. Gujer/H. Siegrist (2000):
Calibration and validation of activated sludge Model No. 3 (ASM3) for Swiss municipal wastewater. Water Research Band 34, Heft 14, Seiten 3580-3590

© 2005 All rights reserved by GEK mbH F:\PROJEKTE\0118 Wärmegewinnung aus Abwasserkanälen\Endbericht\docs\F0118-Abschlussbericht.doc

Klemmer, Paul/Bernhard Hillebrand/Michaela Bleul (2002):
Klimaschutz und Emissionshandel – Probleme und Perspektiven, RWI-Papiere Nr. 82, Essen 2002

Klemmer, Paul (1999):
Die Klimadebatte, VGB Kraftwerkstechnik, Nr.3 (1999), S. 29-33

LDS NRW (2004 a):
Energiebilanz, http://www.lds.nrw.de/statistik/daten/t/index.html, 23.03.2004

LDS NRW (2004 b):
Statistischer Jahresbericht 2002

LDS NRW (2004 c):
Daten für Regionen in NRW, Amtliche Einwohnerzahlen der kreisfreien Städte, Kreise und kreisangehörigen Städte und Gemeinden NRWs, in: www.lds.nrw.de/statistik/datenregionen/index.html, 10.11.2004

LDS NRW (2003):
Mitteilung des LDS NRW an das IKT – Institut für Unterirdische Infrastruktur vom 17.02.2003, im Detail veröffentlicht in: Rometsch, Lutz: Struktur und Entwicklung der Abwasserwirtschaft in Nordrhein-Westfalen, Bericht des IKT – Institut für Unterirdische Infrastruktur im Auftrag des MUNLV NRW, Gelsenkirchen 2005

LDS NRW (2001):
Öffentliche Wasserversorgung und Abwasserbeseitigung in NRW 1998, Teil 2: Abwasserbeseitigung, Düsseldorf 2001

Landesinitiative Zukunftsenergien NRW (2004):
Zukunftsenergien aus Nordrhein-Westfalen

Landesinitiative Zukunftsenergien NRW (2004b):
Planungsleitfaden Wärmepumpen, Düsseldorf 2004

Längin E., Elektra Birseck Münchenstein (EBM) (2001):
Abwärmenutzung aus bestehendem Schmutzwasserkanal in Zwingen - Energiebilanz und Betriebsverhalten im Jahr 2000. Schlussbericht, 2001

Lenz, Gerolf (o.J.):
Qualifikation des Betriebspersonals auf Kläranlagen – Grundbegriffe / -kenndaten, Hrsg.: ATV-DVWK, Wupperverband, o. J.

Lindner, Helmut (1993):
Physik für Ingenieure, 14. Auflage, Leipzig 1993

LIV NRW (2004):
Mitteilung des LIV NRW an das IKT – Institut für Unterirdische Infrastruktur vom 08.11.2004

Meyer, Pamela:
Charakterisierung von Kanalablagerungen in Mischwasserkanalisationen, unveröffentlichte Studienarbeit, Gelsenkirchen, August 2002.

Müller, Ernst A./Beat Kobel (1999):
Systematische Energieoptimierung der Kläranlagen in Nordrhein-Westfalen, Abschlussbericht im Rahmen Initiativprogramm "Ökologische und nachhaltige Wasserwirtschaft", im Auftrag Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen, Düsseldorf 1999

Müller, Ernst A./Beat Kobel (2001):
Nutzung von Wärme aus Abwasser mit Wärmepumpen: Erfahrungen in der Schweiz, Potenzial in Deutschland, in: KA 8/2001, Hennef 2001

MUNLV (erscheint in Kürze):
Struktur und Entwicklung der Abwasserwirtschaft in Nordrhein-Westfalen, Bericht des IKT – Institut für Unterirdische Infrastruktur, Düsseldorf (erscheint in Kürze)

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

MUNLV (2000):
NRW in globaler Verantwortung, Dialogprozess und Kongress (30.11. und 01.12.2000) im internationalen Kongresszentrum Bundeshaus Bonn, Greenpaper der Arbeitsgruppen, November 2000, erhältlich unter www.munlv.nrw.de/sites/specials/kongress/gesamt_green.pdf

MUNLV (1999):
Energie in Kläranlagen – Handbuch, Düsseldorf 1999

MVEL (2004 a):
http://www.mwmtv.nrw.de, 23. März 2004

MVEL (2004 b):
Mitteilung des MVEL an das IKT – Institut für Unterirdische Infrastruktur vom 05.07.2004

MWMEV NRW (2001):
Klimaschutzkonzept NRW, Düsseldorf 2001

Novak, B. (1984):
Ablagerungen in Abwasserkanälen. In: Kanalisation und Regenwasserbehandlung, 59. Siedlungswasserwirt. Kolloquium Stuttgart 1984

Picot, Arnold/Helmut Dietl/Egon Franck (1999):
Organisation: eine ökonomische Perspektive, Stuttgart 1999

Redmann Andreas (2002):
Bestimmung von Gleit- und Haftreibungsbeiwerten im Zusammenhang mit der Entwicklung eines Inspektions- und Reinigungssystems für die „Abwasserschiene Emscher“. IKT – Institut für Unterirdische Infrastruktur, November 2002, unveröffentlicht

Rognon F. et al. (2004):
FAWA - Feldanalyse von Wärmepumpen-Anlagen. Tagungsunterlagen der 11. Tagung des Forschungsprogramms Umgebungswärme, Wärme-Kraft-Kopplung und Kälte des Bundesamtes für Energie (BFE), Bern 2004

Rometsch, Lutz (2002):
Internationale Konversion in spieltheoretischer und politökonomischer Sicht, Stuttgart 2002

Rometsch, Lutz (1993):
Möglichkeiten zur Implementation und Ausgestaltung alternativer institutioneller Arrangements im Bereich globaler Umweltveränderungen, Ruhr-Universität Bochum, Seminar für Wirtschafts- und Finanzpolitik, Diskussionsbeitrag Nr. 22, Bochum 1993

Sanner, Burkhard (o.J.)
Wärmepumpen, in: www.geothermie.de/oberflaechennahe/waermepumpe/wp/wp_tec.htm, 03.12.04

Schmid, Felix/Ernst A. Müller (2005):
Heizen und Kühlen mit Abwasser: Ratgeber für Bauherrschaften und Gemeinden, erstellt im Rahmen des Forschungsvorhabens der Deutschen Bundesstiftung Umwelt in Zusammenarbeit Beat Kobel und Wolfram Stodtmeister, Osnabrück/Zürich 2005 (erscheint demnächst)

Schnell, Heinz/Boris Slipcevic (1990):
Wärmeaustauscher: Rohrbündel-Wärmeaustauscher; Grundlagen, Aufbau, Anwendung, Ehningen bei Böblingen 1990

Schweizer Ingenieur- und Architektenverein (2004):
SIA 480: Wirtschaftlichkeitsrechnung für Investitionen im Hochbau, Zürich (CH) 2004

Smoltczyk, Ulrich (1990):
Grundbau-Taschenbuch, 4. Auf., Teil 1, Berlin 1990

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

Stodtmeister, Wolfram (2005):
Abwasserwärmenutzung: Ergebnisse von 10 Machbarkeitsstudien in Deutschland, Auswertung im Rahmen des Forschungsvorhabens der Deutschen Bundesstiftung Umwelt in Zusammenarbeit Beat Kobel und Ernst A. Müller, Osnabrück/Berlin 2005 (erscheint demnächst)

Teufer, Stefan (1999):
Die Bedeutung des Arbeitgeberimage bei der Arbeitgeberwahl: theoretische Analyse und empirische Untersuchung bei high potentials, Wiesbaden 1999

Tiefbauamt der Stadt Basel (2004):
Daten Wärmepumpenanlage Bachgraben der Betriebsjahre 2002 und 2003

Uhde, Andre (2004):
Öffentliche Bankenregulierung: effiziente Verfassung relationaler Verträge von Kreditinstituten. Eine Diskussion vor dem Hintergrund der zunehmenden Globalisierung der Finanzmärkte, Diskussionspapier, Lehrstuhl für Wirtschaftspolitik, Insbesondere Wettbewerbstheorie und –politik, Ruhr-Universität Bochum, Bochum 2004

Wagner W. (1998):
Wärmeübertragung – Grundlagen, 5. Auflage, 1998

Wanner, Oskar et. al. (2004a)
Wärmeentnahme aus der Kanalisation – Einfluss auf die Abwassertemperatur, in: KA – Abwasser, Abfall, 51. Jg. (2004), H. 5, S. 489 – 495

Wanner, Oskar et al. (2004b):
Wärmerückgewinnung aus Abwassersystemen, Schlussbericht Forschungsprojekt des Bundesamtes für Energie (CH), Dübendorf (CH) 2004

Wanner, Oskar et al. (2003a)
Wärmerückgewinnung aus Abwassersystemen, Jahresbericht zum BFE-Projekt Nr. 44177 vom 05.12.2003, als pdf-Datei erhältlich zum kostenlosen Download unter www.energieforschung.ch/ENETProject?ReadForm&proj=44177.

Wanner, Oskar et al. (2003b)
Wärmerückgewinnung aus Abwassersystemen, Jahresbericht zum BFE-Projekt Nr. 44177 vom 17.04.2003, als pdf-Datei erhältlich zum kostenlosen Download unter www.energieforschung.ch/ENETProject?ReadForm&proj=44177.

Wanner, Oskar et al. (2002)
Wärmerückgewinnung aus Abwassersystemen, Jahresbericht zum BFE-Projekt Nr. 44177 vom 15.12.2002, als pdf-Datei erhältlich zum kostenlosen Download unter www.energieforschung.ch/ENETProject?ReadForm&proj=44177.

Weyand, M./ Max Dohmann (1991):
Stofftransport in Mischwasserkanälen und Regenbecken. In: Wasser-Abwasser-Abfall, Heft 7.

Williamson, Oliver (1991):
Comparative Economic Organization: The Analysis of Discrete Structural Alternatives, in: Administrative Science Quarterly, 36. Jg. (1991), S. 269 – 296

Woll, Artur (1991):
Wirtschaftslexikon, 5-, unveränd. Aufl., München, Wien 1991

Wuppertal Institut (o.J.):
Der Beitrag regenerativer Energie und rationeller Energienutzung zur wirtschaftlichen Entwicklung in NRW,
im Auftrag Verkehrs- und Energieministerium Nordrhein-Westfalen, Wuppertal/Düsseldorf

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

Verwendete Normen und Arbeitsblätter

ATV-Arbeitsblatt-115, ATV A 115
Einleiten von nicht häuslichem Abwasser in eine öffentliche Abwasseranlage, Oktober 1994

ATV-DVWK (2000):
Arbeitsblatt ATV-DVWK-A 131 – Bemessung von einstufigen Belebungsanlagen, Hennef 2000

ATV-DVWK-Arbeitsblatt 131, ATV A 131
Bemessung von einstufigen Belebungsanlagen, Mai 2000

ATV-DVWK-Arbeitsblatt 142, ATV A 142
Abwasserkanäle und –leitungen in Wassergewinnungsgebieten, November 2002

ATV-DVWK-Arbeitsblatt 157, ATV A 157,
Bauwerke der Kanalisation, November 2000

ATV-Merkblatt-168, ATV M 168
Korrosion von Abwasseranlagen - Abwasserableitung - Juli 1998.

DIN EN ISO 175, Ausgabe:2000-10
Kunststoffe - Prüfverfahren zur Bestimmung des Verhaltens gegen flüssige Chemikalien (ISO 175:1999); Deutsche Fassung EN ISO 175:2000

DIN EN 255-3, Ausgabe:1997-07
Luftkonditionierer, Flüssigkeitskühlsätze und Wärmepumpen mit elektrisch angetriebenen Verdichtern - Heizen - Teil 3: Prüfungen und Anforderungen an die Kennzeichnung von Geräten zum Erwärmen von Brauchwasser (enthält Berichtigung AC:1997); Deutsche Fassung EN 255-3:1997 + AC:1997

DIN EN 295-3, Ausgabe:1999-02
Steinzeugrohre und Formstücke sowie Rohrverbindungen für Abwasserleitungen und -kanäle - Teil 3: Prüfverfahren (enthält Änderung A1:1998); Deutsche Fassung EN 295-3:1991 + A1:1998

DIN EN 598, Ausgabe:1994-11
Rohre, Formstücke, Zubehörteile aus duktilem Gusseisen und ihre Verbindungen für die Abwasser-Entsorgung - Anforderungen und Prüfverfahren; Deutsche Fassung EN 598:1994

DIN EN 752-2, Ausgabe:1996-09
Entwässerungssysteme außerhalb von Gebäuden - Teil 2: Anforderungen; Deutsche Fassung EN 752-2:1996

DIN EN 1610, Ausgabe:1997-10
Verlegung und Prüfung von Abwasserleitungen und -kanälen; Deutsche Fassung EN 1610:1997

DIN EN 10088-1, Ausgabe:1995-08
Nichtrostende Stähle - Teil 1: Verzeichnis der nichtrostenden Stähle; Deutsche Fassung EN 10088-1:1995

DIN 19565-1, Ausgabe:1989-03
Rohre und Formstücke aus glasfaserverstärktem Polyesterharz (UP-GF) für erdverlegte Abwasserkanäle und -leitungen; geschleudert, gefüllt; Maße, Technische Lieferbedingungen

© 2005 All rights reserved by GEK mbH

Verwendete Internetquellen:

www.bund-nrw.de/braunkohle-aktuelles.htm
http://www.physikerboard.de/lexikon/index.php/Fossile_Energie
www.bund-nrw.de/braunkohle-aktuelles.htm
http://www.mwmtv.nrw.de,
www.lds.nrw.de/statistik/datenregionen/index.html
http://www.lds.nrw.de/statistik/daten/t/index.html
http://www.lds.nrw.de/statistik/daten/b/d311prog.html
www.energieinfo.de/glossar/node186.html
www.oekoplus.de/fp/archiv/bauglossar/Waermedurchgangskoeffizient.php
www.energieforschung.ch/ENETProject?ReadForm&proj=44177
www.geothermie.de/oberflaechennahe/waermepumpe/wp/wp_tec.htm
www.infrastrukturanlagen.ch/dokumente/datenbank_abwasserwaermepumpen.xls
www.waermekraftkopplung.ch/technik/haustechnik.html
www.infrastrukturanlagen.ch
www.quest-kommunal.de
http://www.bgfe.de/pages/thema/archiv/feb04.htm
www.waermepumpe.ch
www.energieforschung.ch

© 2005 All rights reserved by GEK mbH