



Reinhard Jank, Reiner Kuklinski

# Integrales Quartiers-Energiekonzept Karlsruhe-Rintheim

Optimierungsmethoden · Praxiserfahrungen · Ergebnisse



Gefördert durch:



## Impressum

**Herausgeber:**

Begleitforschung EnEff:Stadt  
c/o pro: 21 GmbH  
Am Hofgarten 3, 53113 Bonn  
Dr. Armand Dütz (V.i.S.d.P.), Jessica Löffler  
Tel.: 0228 - 97 14 49 - 21  
Fax: 0228 - 97 14 49 - 29  
E-Mail: j.loeffler@pro-21.de

Inhalte basieren auf den Ergebnissen  
des Forschungsprojekts "Integrales Quartiers-  
Energiekonzept Karlsruhe-Rintheim"  
(Förderkennzeichen 0327400H)

**Lektorat und Gestaltung:**

löwenholz kommunikation GbR, Berlin  
Rüdiger Buchholz, Claudia Oly

**Druck:**

Fraunhofer IRB Verlag

**Titelbild:**

© Volkswohnung

Bonn, 2015

ISBN (Print): 978-3-8167-9421-9

ISBN (E-Book): 978-3-8167-9422-6

## Schriftenreihe EnEff:Stadt

Diese Publikation wird herausgegeben im Rahmen der Schriftenreihe EnEff:Stadt. In dieser werden fortlaufend die für Fachwelt und Praxis besonders relevanten Ergebnisse und Erkenntnisse aus der Forschungsinitiative EnEff:Stadt des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) veröffentlicht.

Bislang erschienen:

- Der Energiekonzept-Berater für Stadtquartiere
- Energetische Stadtraumtypen
- Integrales Quartiers-Energiekonzept Karlsruhe-Rintheim

Neuerscheinungen werden fortlaufend über die Website der Förderinitiative ([www.eneff-stadt.info](http://www.eneff-stadt.info)) im Bereich Begleitforschung angekündigt.

Reinhard Jank, Reiner Kuklinski

## **Integrales Quartiers-Energiekonzept Karlsruhe-Rintheim**

Optimierungsmethoden · Praxiserfahrungen · Ergebnisse



# Inhalt

<b>Vorwort zur Schriftenreihe</b>	<b>11</b>
<b>Vorwort</b>	<b>13</b>
<b>I Einleitung: Das Quartier „Rintheimer Feld“</b>	<b>15</b>
I.1 Das Wohnquartier	16
I.2 Ergebnisse der Quartiersanalyse	18
<b>II Quartiers-Energiebilanz – Ausgangsdaten 2008</b>	<b>22</b>
<b>III Quartiers-Energiekonzept Karlsruhe-Rintheim</b>	<b>26</b>
III.1 Einleitung	26
III.2 Energiekonzept	27
III.3 Gebäudesanierungs-Zeitplan	28
III.4 Entwicklung der Quartiers-Energiebilanz 2008-2015	30
III.4.1 Eckpunkte der Bilanzierung	30
III.4.2 Gemessener Wärmeverbrauch 2012	31
III.4.3 Entwicklung des spezifischen Heizenergiebedarfs bis 2015	33
III.4.4 Primärenergie- und CO <sub>2</sub> -Bilanz Quartier Rintheimer Feld (VOLKSWOHNUNGS-Gebäude), 1997 bis 2015	35
III.4.5 Wirkungsgrade der Hausübergabestationen (HÜS)	38
III.4.6 Volllastbenutzungsdauern der installierten HÜS-Heizleistungen	40
<b>IV Forschungsgebäude</b>	<b>42</b>
IV.1 „Standardsanierung“: Vergleichsgebäude	44
IV.2 Forschungsansatz für die beiden Forschungsgebäude	47
IV.3 „3-Liter-Gebäude“: Heilbronner Straße 33-37	48
IV.4 „Experimentiergebäude“: Mannheimer Straße 43-47	49
IV.5 Rechnerische Energiekennzahlen für das „Experimentiergebäude“	52
IV.6 Messtechnische Begleitung und Evaluierung: Stand 2013	55
IV.7 Übersichtsauswertung Forschungsgebäude	56
IV.7.1 Heizenergieverbrauch	56
IV.7.2 Verbrauch an Trinkwarmwasser	59
<b>V Zusammenfassung der Ergebnisse und Schlussfolgerungen</b>	<b>61</b>
V.1 Einleitung	61
V.2 Ergebnisse der „konventionellen energetischen Sanierung“ von Mehrfamilienhäusern im Quartier	62
V.3 Sanierung von Bestands-Mehrfamilienhäusern und Quartierskonzept – integraler Ansatz	64
V.4 Energiecontrolling	65
V.5 Forschungsgebäude – Betriebserfahrungen	66
V.6 Schlussfolgerungen	71
<b>Literatur</b>	<b>73</b>



Der Schlussbericht dient einer Übersicht über das Gesamtvorhaben. Die wichtigsten Informationen und Ergebnisse sind den nachstehenden Kapiteln zu entnehmen. Einige Themen müssen jedoch detaillierter behandelt werden, als es im Hauptteil möglich ist. Diese werden daher in Form thematischer Anhänge dargestellt.

<b>Anhänge:</b>	<b>75</b>
<b>Anhang I: Methoden der energetischen Bilanzierung</b>	<b>77</b>
AI-1: Primärenergie- und CO <sub>2</sub> -Emissions-Faktoren	77
AI-2: Nahwärmenetz Rintheim: Primärenergie- und CO <sub>2</sub> -Emissions-Faktoren	80
AI-3: Energiebilanz auf Quartiersebene	82
AI-4: Heizgradtage und Temperaturbereinigung	87
AI-4.1 Berechnung des Jahres-Heizenergieverbauchs mit der Heizgradtag-Methode	87
AI-4.2 Rechenhilfen für den Gebäude-Energiemanager	89
<b>Anhang II: Gebäude- und Quartiersoptimierung</b>	<b>91</b>
All-1 Optimierung des Wärmeschutzes der Gebäude-Hüllflächen	91
All-1.1 Kostenstruktur der Wärmeschutzmaßnahmen	92
All-1.2 Wirtschaftliches Optimum der Dämmstärke	93
All-1.2.1 Energieeinsparung durch Wärmedämmung	93
All-1.2.2 Graue Energie der Wärmedämmung	96
All-1.2.3 Energieeinsparkosten durch Dämmung der Hüllflächen	99
All-1.3 Gebäudebetrachtung	103
All-1.3.1 Heizenergieverbrauch	103
All-1.3.2 Wirtschaftlichkeit von energetischen Verbesserungsmaßnahmen der Hüllfläche	107
All-1.3.3 Energetische Verbesserungsmaßnahmen der technischen Gebäudeausrüstung: Einzelgebäude	112
All-1.4 Nahwärmeversorgung	115
All-1.5 Gesamtbetrachtung der Gebäude-Modernisierung	118
All-2: Verluste der Wärmeverteilung im Gebäude	121
<b>Anhang III: Wirtschaftlichkeitsrechnung: Nahwärme und Wohnungsunternehmen</b>	<b>124</b>
AIII-1: Nahwärmenetz Rintheim	124
AIII-2: Kosten und Wirtschaftlichkeit in der Wohnungswirtschaft	128
AIII-2.1 Wirtschaftlichkeitsanalysen in der Wohnungswirtschaft	128
AIII-2.2 Integrale Energieplanung	130
<b>Danksagung</b>	<b>133</b>

## Abkürzungen:

2-S-Fenster	2-Scheibenfenster	KIT	Karlsruher Institut für Technologie
A <sub>N</sub>	Nutzfläche nach EnEV (in Wohngebäuden: A <sub>N</sub> = 0,32·Ve)	kWhth	(Techn. Univ. Karlsruhe)
AP	Arbeitspreis (€/MWhth)		Kilowattstunde thermisch – Einheit
AW	Anschlusswert (Fernwärme)	kWhel	Wärmeenergie <sup>1</sup>
BHKW	Blockheizkraftwerk	kWhHo	Einheit el. Energie
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie	kWhHu	Energie in Form von Erdgas, oberer Heizwert
DFÜ	Datenfernübertragung	kWhPE	Brennstoffenergie, unterer Heizwert
DN	Nennweite	kWhEE	Einheit Primärenergie
DP	Durchschnittspreis (von LP und AP)	KWK	Einheit Endenergie
EE	Endenergie	LED	Kraft/Wärme-Kopplung
EEWärmeG	Gesetz zur Nutzung erneuerbarer Energien im Gebäudesektor	LJM	Leuchtdiode
EiFER	European Institute for Energy Research, Karlsruhe	LP	langjähriges Mittel
EnBW	Energie Baden-Württemberg AG	MFH	Leistungspreis (€/kWh)
EnEV	Energieeinsparverordnung	MiRO	Mehrfamilienhaus
E.ON-ERC	Energy Research Center, RWTH Aachen	NW	Mineralölraffinerie Oberrhein GmbH & Co. KG
EPS	expandiertes Polystyrol (Wärmedämmung; Styropor, Hartschaum)	oGD	Nahwärme oder Nennweite
F&E	Forschung und Entwicklung	PE	oberste Geschoßdecke
Hochsch. BB	Hochschule beider Basel	PH	Primärenergie
FW	Fernwärme	PHI	Passivhaus
FWE	Frischwasserstationen (dezentrale Warmwasser-Bereitung in den Wohnungen)	PtJ	Passivhaus-Institut
GFZ	Geschossflächenzahl	qHZ	Projektträger Jülich
GP	Grundpreis (€/(m <sup>2</sup> ·a))	qP	spezif. Heizenergiebedarf (kWh/(m <sup>2</sup> ·a))
GuD	Gas- und Dampfkraftwerk	qww	spezif. Primärenergieverbrauch (kWh/ (m <sup>2</sup> ·a))
HEL	leichtes Heizöl	RDK	spezif. Warmwasser-Verbrauch (kWh/ (m <sup>2</sup> ·a))
HH	Haushalt	RESOL	Rheinhafen-Dampfkraftwerk
HKV	Heizkostenverordnung	RWTH	Phenolharz (Kunstharz)
HKW	Heizkraftwerk	SK	Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen
Ho	oberer Heizwert (von Erdgas; kWhHo/m <sup>3</sup> ) (heute: H <sub>s</sub> ... superior heating value)	SW KA	Solarkollektor(en)
HOAI	Honorarordnung für Architekten und Ingenieure	TGA	Stadtwerke Karlsruhe
H <sub>t</sub>	spezif. Transmissionswärmeverlust (W/(m <sup>2</sup> ·K))	THG	Technische Gebäudeausrüstung
Hu	unterer Heizwert (von Erdgas; kWhHu/m <sup>3</sup> ) (heute: H <sub>i</sub> ... internal heating value)	WDVS	Treibhausgas(e)
HÜS	Hausübergabestation	Wfl.	Wärmedämmverbundsystem
HZ	Heizzentrale	WE	(beheizte) Wohnfläche
KA	Karlsruhe	W/I	Wohnheit
KES	Karlsruher Energie-Service GmbH	WLG	Wartung und Instandhaltung
KfW	Kreditanstalt für Wiederaufbau	WMZ	Wärmeleitungsröhre
KGR	Kostengruppe (nach DIN 276 definierte Kostenbestandteile von Maßnahmen an Bau bzw. TGA zwecks Kostenermittlung, z.B. für die HOAI)	WP	Wärmemengenzähler
		WRG	Wärmepumpe
		WW	Wärmerückgewinnung
		Ve	Warmwasser(-bereitung)
		VIP	beheiztes Gebäudevolumen (= Brutto- Volumen)
		XPS	Vakuum-Isolations-Paneele
			extrudiertes Polystyrol

<sup>1</sup> Oder die entsprechende Energieeinheit in Megawattstunden (MWh) anstelle kWh.

## Energiearten in der Heizungstechnik:

Bedeutung der verwendeten energetischen Begriffe umgangssprachlich und nach der zugehörigen Norm DIN V 18599, „Energetische Bewertung von Gebäuden“:

Primärenergie	Energieinhalt des eingesetzten Energieträgers (Erdgas, Heizöl, Kohle, Biomasse etc.) unter Berücksichtigung des Energieaufwandes bei Gewinnung und Verteilung. <b>Definition nach DIN V 18599:</b> Berechnete Energiemenge, die zusätzlich zum Energieinhalt des notwendigen Brennstoffs und der Hilfsenergien für die Anlagentechnik auch die Energiemengen einbezieht, die durch vorgelagerte Prozessketten außerhalb des Gebäudes bei der Gewinnung, Umwandlung und Verteilung der jeweils eingesetzten Brennstoffe entstehen.
„Nicht-erneuerbare Energie“ = oft auch „fossile Primärenergie“	Primärenergieinhalt des betrachteten Energieträgers unter Abzug des im Energieträger enthaltenen Anteils an regenerativer Energie (enthält gegebenenfalls auch Kernenergie).
Endenergie	Energie, die der Energieverbraucher bezahlt (Gas, Strom, Fernwärme ...) – auch „Sekundärenergie“ bezeichnet.
Endenergiebedarf	<b>DIN V 18599:</b> Berechnete Energiemenge, die der Anlagentechnik (Heizungsanlage, raumluftechnische Anlage, Warmwasserbereitungsanlage, Beleuchtungsanlage) zur Verfügung gestellt wird, um die festgelegte Raummittentemperatur, die Erwärmung des Warmwassers und die gewünschte Beleuchtungsqualität über das ganze Jahr sicherzustellen. Diese Energiemenge bezieht die für den Betrieb der Anlagentechnik benötigte Hilfsenergie ein. Die Endenergie wird an der „Schnittstelle“ Gebäudehülle übergeben und stellt somit die Energiemenge dar, die der Verbraucher für eine bestimmungsgemäße Nutzung unter normierten Randbedingungen benötigt. Der Endenergiebedarf wird vor diesem Hintergrund nach verwendeten Energieträgern angegeben.
Nutzwärme	Aus Endenergie (mit Heizkessel oder Fernwärme-Hausübergabestation) erzeugte Wärmeenergie.
Heizenergie	Nutzwärme, die zur Beheizung verwendet wird, je nach Kontext gemessen entweder <ul style="list-style-type: none"> <li>• im Heizungskeller, d. h. die Heizenergie enthält die Verteilungsverluste im Gebäude oder</li> <li>• in der beheizten Wohnung.</li> </ul>
Heizwärmebedarf	<b>DIN V 18599:</b> Rechnerisch ermittelter Bedarf an Wärme zur Aufrechterhaltung der festgelegten thermischen Raumbedingungen innerhalb einer Gebäudezone während der Heizzeit.
Warmwasser	Energieinhalt des bereitgestellten Warmwassers, je nach Kontext gemessen entweder <ul style="list-style-type: none"> <li>• im Heizungskeller, d. h. die Warmwasserenergie enthält die Verteilungsverluste im Gebäude, oder</li> <li>• in der beheizten Wohnung.</li> </ul>
Warmwasserbedarf	<b>DIN V 18599: Nutzenergiebedarf für Trinkwarmwasser</b> Rechnerisch ermittelter Energiebedarf, der sich ergibt, wenn die Gebäudezone mit der im Nutzungsprofil festgelegten Menge an Trinkwarmwasser entsprechender Zulauftemperatur versorgt wird.



## Vorwort zur Schriftenreihe

Die Energieeffizienz im Gebäudesektor ist ein zentrales Thema der Energiepolitik der Bundesregierung. Seit vielen Jahren flankiert das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) im Rahmen seiner Energieforschung Anstrengungen in diesem Bereich und fördert gezielt Maßnahmen zur Entwicklung und Erprobung neuer Technologien und Verfahren für energieoptimierte Gebäude und Quartiere. In diesem Zeitraum wurden viele Innovationen entwickelt, deren breite Umsetzung am Markt wichtige Beiträge zur Erreichung der energiepolitischen Ziele leisten kann. Um die Effizienz der Forschungsförderung zu erhöhen und den Ergebnistransfer in die Praxis zu beschleunigen, hat das BMWi das Forschungsnetzwerk Energie in Gebäuden und Quartieren gegründet. Im Mittelpunkt steht die strategische Vernetzung der Akteure: Vertreter aus Wirtschaft und Wissenschaft sowie wichtige Multiplikatoren wirken mit, um den Austausch an den Schnittstellen der Forschung zur Praxis und zur Politik zu intensivieren. Neben Technologieunternehmen, Energie- und Wohnungswirtschaft spielen auch Städte und Kommunen eine wichtige Rolle auf der Anwenderseite. Sie entscheiden über Versorgungsstrukturen, Bebauungspläne und energetische Standards in öffentlichen Gebäuden und können Investitionsentscheidungen und Verbraucherverhalten positiv beeinflussen. Der Einsatz neuer Technologien und moderner Planungsinstrumente kann diesen Gestaltungsspielraum deutlich erweitern.

Die Forschungsinitiativen „EnEff:Stadt“ und „EnEff:Wärme“ der Energieforschung des BMWi sind integraler Bestandteil des Forschungsnetzwerks Energie in Gebäuden und Quartieren. Sie bündeln langjährige praxisnahe Forschungsaktivitäten für mehr Energieeffizienz und Integration erneuerbarer Energien im kommunalen Bereich und fördern die Vernetzung und integrale Zusammenführung der Bereiche „energetische Gebäudesanierung“ und „effiziente dezentrale Versorgungstechnologien“. Mit Blick auf die Ausweitung des Umsetzungspotenzials werden vor allem wirtschaftlich machbare Innovationen auf Quartiersebene in den Mittelpunkt gestellt. Beide Initiativen können inzwischen Erfolge in zahlreichen ambitionierten Projekten vorweisen. Die praktischen Erfahrungen zeigen aber auch Schwachstellen auf bzw. Felder, in denen noch Entwicklungsbedarf besteht. Es ist daher wichtig, diese Ergebnisse einer breiten Fachöffentlichkeit zugänglich zu machen. Dies ist ein großes Anliegen der öffentlich geförderten Energieforschung und eine der zentralen Aufgaben im Rahmen des Forschungsnetzwerks.

Die wichtigsten Ergebnisse werden in unregelmäßigen Abständen innerhalb der Schriftenreihe veröffentlicht. Initiator und Herausgeber ist die Begleitforschung der Forschungsinitiative „EnEff:Stadt“, die sowohl Erfahrungsberichte ausgewählter Einzelprojekte als auch übergreifende Broschüren zu praxisrelevanten Themen publiziert. Praktiker aus Kommunen, Versorgungsunternehmen, Wohnungsunternehmen, aber auch Planer, Ingenieure, Handwerker

sowie Studierende der einschlägigen Fachrichtungen, finden hier umfangreiche Hilfestellungen und Anregungen für ihre eigenen Vorhaben sowie besonders interessante Praxisbeispiele aus Einzelprojekten, die im Rahmen der Forschungsinitiativen EnEff:Stadt und EnEff:Wärme des BMWi entstanden sind.

Dr. Rodoula Tryfonidou  
Bundesministerium für Wirtschaft und Energie

## Vorwort

Im Zuge der Energiewende<sup>2</sup> soll für den Gebäudebestand in Deutschland langfristig nahezu „CO<sub>2</sub>-Neutralität“ erreicht werden<sup>3</sup>. Dies wird große Investitionen erfordern. Während die erforderlichen Techniken bereits (größtenteils) vorhanden sind, wird dieses Ziel dennoch nur realistisch sein, wenn die resultierenden Kosten so gestaltet werden können, dass sie im Ergebnis für Gebäudeeigentümer und Mieter akzeptabel sind. Dies zeigt die aktuelle Diskussion um die Energiewende: Laut Meinungsumfragen gibt es hierfür in der Bevölkerung breiteste Zustimmung, jedoch wird der resultierende Strompreisanstieg ebenso breit abgelehnt. Der Umbau des Gebäudebestandes und seiner Energieversorgung wird jedoch noch höhere Belastungen mit sich bringen.

Es bestehen jedoch durchaus Spielräume, diese Kostenbelastung zu reduzieren. Ein Ansatz ist dabei, eine Optimierung der Kosten nicht für einzelne Gebäude, sondern für ganze Quartiere oder Stadtteile anzustreben und auf dieser Ebene zusätzliche Potenziale für eine Erhöhung der Kosteneffizienz zu suchen. Im Rahmen der Initiative EnEff:Stadt<sup>4</sup> soll genau das in konkreten Projekten erreicht werden. Wenn es gelingt, wird dies der Energiewende insgesamt einen deutlichen Schub verleihen.

Das zu EnEff:Stadt gehörende Forschungsprojekt „Integrales Quartiers-Energiekonzept Karlsruhe-Rintheim“ ist Teil eines umfassenden Konzepts für das Wohnquartier „Rintheimer Feld“, das von 2008 bis 2015 mit einem Kostenaufwand von rund 70 Mio. Euro von der VOLKSWOHNUNG GmbH in Karlsruhe realisiert wird. Dieses Konzept verknüpft die „integrale“ Sanierung von Bestandsgebäuden aus den 50er und 60er Jahren so mit einem übergreifenden Konzept zur Verbesserung der Wohnqualität im Wohnquartier, dass auch langfristig mit der Nachfrage von Mietern gerechnet werden kann. Den Bedarf an Heizungsenergie und Warmwasser langfristig wirtschaftlich decken zu können, ist dabei ein wichtiger Faktor. Wegen der auf diese Weise erhöhten Attraktivität des Standortes sind der Rückfluss der investierten Mittel gesichert und das Investitionsrisiko verringert.

Die Ausarbeitung und der Einstieg in die Umsetzung eines Quartiers-Energiekonzeptes waren Gegenstand dieses Forschungsprojektes, gefördert mit einem Umfang von rund 3 Mio.

<sup>2</sup> Oberziel der Energiepolitik ist der Klimaschutz. Daraus folgt das Ziel einer Reduzierung des Verbrauchs an fossilen Energieträgern. Wegen des Ausstiegs aus der CO<sub>2</sub>-freien Kernenergie ist aus Klimaschutz-Gründen gleichzeitig ein möglichst weitgehender Ersatz von CO<sub>2</sub>-intensiver Kohle durch Nutzung CO<sub>2</sub>-ärmerer Brennstoffe und erneuerbarer Energien notwendig. Das Ziel der Kosteneffizienz erfordert die weitgehende Reduzierung des Endenergieverbrauchs vor dessen Deckung durch erneuerbare Energien.

<sup>3</sup> Gemeint ist eigentlich „Klimaneutralität“. Im Fall der Energieversorgung von Gebäuden läuft dies darauf hinaus, dass Gebäude bis 2050 (fast) keine „CO<sub>2</sub>-Äquivalent“-Emissionen mehr verursachen sollen.

<sup>4</sup> Die Forschungsinitiative EnEff:Stadt ist Teil des Energieforschungsprogramms des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie. Detaillierte Informationen über EnEff:Stadt-Projekte sind zu finden unter [www.eneff-stadt.info](http://www.eneff-stadt.info).

Euro aus dem Energieforschungsprogramm des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi). Im Rahmen dieses Forschungsprojektes wurden

- das integrale Quartiers-Energiekonzept entwickelt und umgesetzt,
- ein Monitoring-System als Grundlage zur Berechnung der Quartiers-Energiebilanz installiert,
- zwei typgleiche Gebäude mit einer Reihe von technischen Innovationen energetisch saniert und
- ein umfassendes messtechnisches Begleitprogramm von der Hochschule Karlsruhe installiert, das bis 2015 von der RWTH Aachen/Inst. E.ON Energy Research Center ERC als Forschungsbegleiter der VOLKSWOHNUNG ausgewertet wird.

Die vorliegende Publikation beschreibt die Ausgangslage in Rintheim, die Vorgehensweise bei der „integralen Quartierssanierung“ und die bis 2013 erzielten Ergebnisse. Im Anhang wird auf methodische Fragen der energetischen Bilanzierung und Optimierung von Wohnquartieren eingegangen, die auch für andere Quartiersprojekte von Interesse sind.

## I

## Einleitung: Das Quartier „Rintheimer Feld“



**Abb. I-1:** Luftbild des Wohnquartiers aus nördlicher Richtung: im Norden begrenzt von der Haid-und-Neu-Straße (unten rechts) und dem Hirtenweg (Abgang von der Kreuzung nach links), im Süden zwei Schul- und ein Kirchengebäude; Quartiersfläche: 0,25 km<sup>2</sup>, GFZ ≈ 0,38 (Foto: VOLKSWOHNUNG 2013)

Das Forschungsprojekt „Integrales Quartiers-Energiekonzept Karlsruhe-Rintheim“ ist das erste Projekt der Förderinitiative „Energieeffiziente Stadt“ (EnEff:Stadt) des BMWi, bei dem die Quartiersplanung – mit Investitionen von rund 70 Mio. Euro – in die Praxis umgesetzt wurde. Konzepterstellung und Realisierung erfolgten durch die VOLKSWOHNUNG im Zeitraum von 2009 bis 2015<sup>5</sup>.

Das Forschungsprojekt bezweckte die Entwicklung eines „Integralen Energiekonzeptes“ als Teil eines Gesamt-Quartiersentwicklungskonzeptes: Ziel des Energiekonzeptes war die Kombination aus einer wirtschaftlich optimalen energetischen Sanierung der Gebäude mit einer Neuausrichtung der Wärmeversorgung des Quartiers. Als Teil des Forschungsprojek-

<sup>5</sup> Die VOLKSWOHNUNG GmbH ist die Wohnungsgesellschaft der Stadt Karlsruhe mit rund 13.000 vermieteten Wohnungen im Stadtgebiet: [www.volkswohnung.com](http://www.volkswohnung.com).

tes wurden ferner für zwei der Wohngebäude im Rinheimer Feld<sup>6</sup> aus den 50er Jahren mit zusammen 60 Wohneinheiten unkonventionelle Konzepte realisiert: Unter der wissenschaftlichen Begleitung der RWTH Aachen<sup>7</sup> sollten in zwei „Forschungsgebäuden“ technische Innovationen zur Sanierung von Mehrfamilienhäusern erprobt werden. Zur Auswertung der hier gemachten Betriebserfahrungen wurde eine umfangreiche messtechnische Begleitung installiert, deren Auswertung durch die RWTH noch bis Sommer 2015 läuft.

Zweck des Energiekonzeptes war, für das Quartier bereits heute die langfristigen Energieziele der Bundesregierung im Wohnungssektor zu erreichen: Deutschland strebt aus Klimaschutzgründen bis 2050 eine Reduzierung des Verbrauchs an fossilen Energieträgern um rund 80 % an. Aus dieser Vorgabe folgt ein maximal zulässiger Primärenergieverbrauch für die Bereitstellung von Heizenergie und Warmwasser in Wohngebäuden, wie er heute für Passivhäuser erreicht wird, nämlich ca. 40 bis 45 kWhPE pro m<sup>2</sup> Wfl. Für einzelne Bestands-Wohngebäude ist dieses Ziel – zumal mit finanzieller Förderung, etwa im Rahmen eines Pilotprojektes – mit anspruchsvoller Planung und innovativer Technik gut erreichbar. Im vorliegenden Projekt sollten die Maßnahmen zur Erreichung dieses Ziels jedoch für ein ganzes Quartier umsetzbar sein. Damit kamen – abgesehen von den beiden Forschungsgebäuden – nur Maßnahmen in Frage, die als langfristig wirtschaftlich gelten konnten, da nur diese allgemein und ohne zusätzliche Fördermaßnahmen realisierbar sind.

Da ein Wohnungsunternehmen kaum Möglichkeiten hat, den Stromverbrauch in den Haushalten seiner Mieter zu beeinflussen, wurde hinsichtlich des Gesamt-Endenergieverbrauchs im Quartier (also inklusive Stromverbrauch der Haushalte) in Absprache mit dem Träger des Forschungsprogramms, PtJ, eine Reduzierung „um mindestens 30 %“ vorgegeben.<sup>8</sup> Von den EnEff:Stadt-Projekten wird erwartet, dass die erzielten Praxiserfahrungen Aufschluss darüber geben werden, welche Energieeinsparziele in Quartiersprojekten künftig als sinnvoll (d. h. anspruchsvoll und zugleich realistisch im Hinblick auf die technische Realisierbarkeit und die ökonomische Sinnhaftigkeit) betrachtet werden können.

## I.1 Das Wohnquartier

Im Wohnquartier „Rinheimer Feld“ befinden sich derzeit 45 Gebäude: 35 Mehrfamilienhäuser mit 1.188 Wohneinheiten, 4 Schulgebäude, 2 Gebäude der „Nahversorgung“ (Geschäfte,

<sup>6</sup> Rintheim ist der Name eines älteren Stadtteils von Karlsruhe, überwiegend mit 1- und 2-Familien-Wohnhäusern. Das zugehörige „Rinheimer Feld“ wurde nach dem 2. Weltkrieg von der VOLKSWOHNUNG als Wohngebiet zur Errichtung von MFH erschlossen.

<sup>7</sup> Zur Erklärung von Abkürzungen, Formelzeichen und Einheiten siehe Tabelle der Abkürzungen am Anfang dieser Publikation.

<sup>8</sup> Ein erheblicher Beitrag zur Verringerung des Verbrauchs an fossiler Primärenergie im Strombereich wird sich künftig aus dem zunehmenden Anteil erneuerbarer Energien an der Stromerzeugung ergeben. Dies kann aber nicht dem jeweiligen Quartiersprojekt zugerechnet werden.

Büros). Vier Wohngebäude mit 120 Wohnungen werden bis 2015 noch neu errichtet (→ Abb. I-1 und Tab. I-1). Die Bestandsgebäude sind zwischen 37 und 56 Jahren alt.

Das Quartier ist im nördlichen Bereich eine typische Großwohnsiedlung der Nachkriegszeit, gedacht als rasch verfügbarer und kostengünstiger Wohnraum für die Ansprüche und mit den technischen Mitteln der damaligen Zeit. Der südliche Teil des Quartiers stammt aus den 60er und 70er Jahren, mit anderer Architektur (Wohn-Hochhäuser mit bis zu 17 Etagen) und modernerer Heizungstechnik (Erdgas-Zentralheizungen). Gemessen am Heizenergieverbrauch sind diese Gebäude aber keineswegs energetisch besser als die älteren Gebäude.

Als Teil der Umsetzung des Quartiers-Energiekonzeptes wurde durch die VOLKSWOHNUNG von 2009 bis 2011 ein Nahwärmenetz errichtet, das die Nutzwärme aus dem zentralen Fernwärmenetz der Stadtwerke Karlsruhe bezieht. Um die Anlaufverluste aus dieser Investition möglichst gering zu halten, war es notwendig, entgegen der ursprünglich längerfristig angelegten Planung der VOLKSWOHNUNG alle Gebäude im Quartier innerhalb möglichst kurzer Zeit an das Netz anzuschließen. Sofern diese Gebäude noch nicht saniert waren, mussten sie vor der Anbindung an die Nahwärme umfassend modernisiert werden.

**Tab. I-1:** Gebäudestruktur  
Quartier Rintheimer Feld

Gebäude-Eigentümer	Anzahl Gebäude	Anzahl Wohnungen	Nutzfläche (m <sup>2</sup> ) Wfl. <sup>9</sup>	sonst.
VOLKSWOHNUNG: Bestands-MFH	30	981	67.880	
Eigentumswohnungen Mannheimer Str. 27	1	39	3.353	
Bestands-MFH, andere Eigentümer (WOGE)	3	70	4.730	
Seniorenwohnsitz („Heinz-Schuchmann-Haus“ / Karl-Friedrich-Leopold-Stiftung)	1	98	3.630	
<b>Sonstige Gebäude</b>				
Grund- und Hauptschule (Stadt Karlsruhe)	4			7.810
„Nahversorgungszentrum“ (verpachtet)	2			1.200
	<b>41</b>	<b>1.188</b>	<b>79.593</b>	<b>9.010</b>
neu zu errichtende MFH: VOLKSWOHNUNG (2015)	4 (Forststr.)	120	8.460	
<b>Gesamt nach Umsetzung</b>	<b>45</b>	<b>1.308</b>	<b>ca. 87.000</b>	<b>9.010</b>

<sup>9</sup> In der Wohnungswirtschaft wird unter Nutzfläche üblicherweise die Wohnfläche verstanden, und nicht die in der EnEV definierte Nutzfläche AN = 0,32·V<sub>e</sub>.

Gleichzeitig wurde ein Konzept für die Aufwertung des Wohnumfeldes entwickelt, um die städtebauliche Qualität zu verbessern und den Wohnwert des Quartiers dauerhaft zu steigern. Dazu wurde von der VOLKSWOHNUNG parallel zur Entwicklung des Energiekonzepts eine Bewohnerbeteiligung organisiert, die ein Gesamtkonzept mit möglichst breiter Akzeptanz zum Ziel hatte. Die dabei entwickelten Ideen sollen das Wohnquartier zukünftig attraktiver gestalten. Zusammen mit weiteren Teilkonzepten, um die Energie- und Verkehrsstruktur, das Wohnumfeld und seine Grünanlagen sowie die örtlichen Nahversorgungseinrichtungen zu verbessern, sollen diese eine nachhaltige und zukunftssichere Entwicklung des Quartiers ermöglichen.

Das Projekt wurde im Herbst 2008 mit einer Quartiersanalyse, einer energetischen Zustandsbeschreibung der bestehenden Wohngebäude und mit einer Vorstudie über die Kosten und Wirtschaftlichkeit einer Nahwärme-Versorgung aus dem nahegelegenen Fernwärmennetz der Stadtwerke Karlsruhe begonnen. Auf der Basis dieser Ergebnisse wurde von der VOLKSWOHNUNG ein integrales Quartiers-Energiekonzept entwickelt, mit dem eine möglichst kosteneffiziente Kombination von Maßnahmen im Bereich der Gebäude und der Energieversorgung angestrebt wird.

Die Tabelle auf der vorigen Seite gibt eine Übersicht über die Gebäude im Quartier, die sich im Eigentum der VOLKSWOHNUNG oder Dritter befinden.

## I.2 Ergebnisse der Quartiersanalyse

Die wohnungswirtschaftliche Analyse (F+B 2009) umfasste eine allgemeine Betrachtung des Wohnungsmarktes in Karlsruhe und eine Quartiersanalyse, die Probleme und Potenziale im Quartier Rintheimer Feld in den Blick nimmt. Ferner wurden eine Mieterbefragung und ein „Quartiers-Workshop“ mit Mitarbeitern der VOLKSWOHNUNG durchgeführt, deren Ergebnisse in den „Maßnahmenempfehlungen“ des Abschlussberichts wiedergegeben werden.

Die wesentlichen **Schwachstellen** des Quartiers, Stand 2008, wurden von F+B in folgenden Bereichen gesehen:

### Mieterstruktur:

- Im nördlichen Teil des Quartiers leben überdurchschnittlich viele ältere Mieter, z. T. schon seit der Errichtung dieser Gebäude in den 50er Jahren: Etwa 50 % der Bewohner sind mehr als 60 Jahre alt. Daraus ergibt sich, dass in diesem Bereich einerseits gezielt auf die Bedürfnisse älterer Mieter geachtet werden sollte, und andererseits verstärkt mit Mieterwechseln zu rechnen sein wird.
- Im südlichen Teil wohnen überdurchschnittlich viele Mieter mit Migrationshintergrund. Hier gibt es mehr Familien mit Kindern bzw. Jugendlichen als im nördlichen Bereich. Die Anwohner unterhalten nur wenige Kontakte zu der eingesessenen Bevölkerung im Wohn-

bereich Alt-Rintheim östlich der Mannheimer Straße (in Abb. I-1 oben links). Ein Austausch findet nur über die Grund- und Hauptschule an der Forststraße statt, die von Kindern aus beiden Bereichen besucht werden.

#### **Gebäudebestand:**

- Die Wohn-Hochhäuser (9 bis 17 Geschosse) im südlichen Bereich verleihen dem Quartier einen Ghetto-Charakter, der aber von den Bewohnern laut Mieterbefragung so nicht wahrgenommen wird.
- Mehr als die Hälfte der Gebäude sind sanierungs- bzw. modernisierungsbedürftig (in Bezug auf energetische Qualität, Sanitär/Elektro, Schallschutz, Aufzüge, Kommunikationstechnik).

#### **Wohnumfeld im Quartier:**

- Es gibt großzügige Grünflächen, die jedoch nicht attraktiv sind („Abstandsgrün“).
- Spielflächen: zu wenige und zu alte Spielgeräte, wenig einladend, keine Aufenthaltsqualität.
- Keine Freiraumangebote für Jugendliche und Senioren.

#### **Nahversorgung:**

- Es gibt ein „Nahversorgungszentrum“ am Staudenplatz, mitten im Quartier, das von F+B als unzureichend eingestuft wird. Das Angebot ist gering, Kinderarzt und Apotheke fehlen. Das Ensemble ist optisch wenig attraktiv. Diese Mängel werden von den Bewohnern im Quartier jedoch nicht problematisiert.

#### **Von den Miethaltern gesehene Probleme:**

- hohe Heizkosten
- Lärmbelastung in den Gebäuden (mangelnder Schallschutz)
- Lärmbelästigung außerhalb durch Jugendliche
- Sauberkeitsproblem in den Hauseingängen (südlicher Teil) und an den Müllecken
- zu geringe Anzahl an Stellplätzen für PKW

#### **Als besondere Vorteile/Stärken des Quartiers werden angesehen:**

- die günstigen Mieten (Kaltmiete 4,00 bis 5,20 €/m<sup>2</sup>)
- die Nähe zur Innenstadt Karlsruhe
- die sehr günstige Verkehrsanbindung (insbesondere ÖPNV)
- Verfügbarkeit von Schülernachhilfe-Angebot
- im nördlichen Bereich auch die Verwurzelung der Bewohner im Quartier

Im F+B-Quartiers-Entwicklungskonzept wurde eine Reihe von Vorschlägen zur Sicherung der langfristigen Attraktivität des Quartiers vorgelegt, die auch das Ergebnis des Mitarbeiter-Workshops der VOLKSWOHNUNG im Dezember 2008 widerspiegeln. Ziel ist eine Verbesserung der Attraktivität des Quartiers insgesamt, um die zukünftige Nachfrage zu sichern und den Wohnwert des Quartiers zu erhöhen.

### **Gebäudekonzept:**

- zügig Modernisierungsprogramm für alle noch nicht sanierten Gebäude der VOLKSWOHNUNG durchführen
- Schallschutz in den Gebäuden verbessern
- eine Mindestanzahl von Wohnungen mit Einbauküchen versehen
- Quartier an Nahwärme anschließen, um die Mieter von den Gaspreisen unabhängig zu machen<sup>10</sup>
- Konzept für altersgerechte Wohnungen in einer sinnvollen Anzahl entwickeln und im Rahmen der anstehenden Modernisierungen umsetzen
- Angebot an familiengerechten Wohnungen verbessern
- Hauseingänge und Außenwände attraktiver gestalten, damit die Gebäude optisch besser unterscheidbar werden
- Mietergärten anbieten
- zukunftssicheres Konzept für die Bebauung der vier Bauflächen an der Forststraße entwickeln (z. B. höherwertige Wohnungen, Studentenwohnheim etc.)

### **Wohnumfeld-Konzept:**

- Vor-Ort-Hauswart oder „Pförtnermodell“: zuständig für Mieterbeschwerden, Störungsbe seitigung, Sauberkeit insbesondere der Müllecken und auch als soziale Präventionsmaß nahme gegen Vandalismus<sup>11</sup>
- Konzept für den gesamten Außenraum im Quartier:
  - Kinder: neue Spielplätze mit Fantasie-Spielgeräten, Abenteuerspielplatz (Kletter wand, Rutschen), Tischtennis etc., Sitzmöglichkeiten und Pavillons für Kinderbetreuer
  - Jugendliche: Multifunktions- und Allwetter-Ballspielplatz mit Zuschauer-Ecke und Unterstand; Halfpipe
  - Ältere Bewohner: Freiraumangebot mit Sitzmöglichkeiten, Pavillon mit Grillecke, al tersgerechte Bewegungsmöglichkeiten (Schachplatz, Boule-Bahn, Trimm-Möglich keiten für Senioren)
- Fahrradwege
- neues Parkraum- und Garagenkonzept
- qualitative und optische Verbesserung des Nahversorgungszentrums am Staudenplatz: Supermarkt, medizinische Versorgung (Apotheke, Kinderarzt), Friseur, Café bzw. Internetcafé, Gaststätte, Fahrradwerkstatt etc.
- Müllecken und Fahrradstellplätze verbessern
- verbesserte Außenbeleuchtung der Wege und Gebäude; z. B. durch moderne LED-Leuch ten
- Landschafts-/Öko-Konzept für das Wohnumfeld, zum Beispiel mit kleinteiligen Grünflä chen, neuer Bepflanzung, angelegten Hügeln, evtl. Wasserflächen etc.

<sup>10</sup> Zum Zeitpunkt der Konzepterstellung (2008) hatte gerade ein drastischer Sprung der Erdgas- und HEL-Preise statt gefunden.

<sup>11</sup> Wurde durch Einrichtung eines permanenten Mieterservice-Büros am Staudenplatz umgesetzt.

**Sozialkonzept:**

- Seniorenwohnsitz Heinz-Schuchmann-Haus in das Quartiersleben einbinden:  
allg. medizinische Betreuung (Einsatz moderner Kommunikationstechniken), Mittagstisch im Heinz-Schuchmann-Haus auch für interessierte Bewohner, Freizeitangebot (Kultur, Sprachen, VHS, sonstige Veranstaltungen), TV-Ecke, Seniorentreff
- Freizeitangebote für Jugendliche:  
Jugendtreff im Erdgeschoss eines der Hochhäuser, Angebote für Hobbys wie etwa Musik, Video, TV, Computer, Internet, Werkstatt, Labor (eventuell Sponsoring durch Firmen), auch Schulaufgabenbetreuung, evtl. in Zusammenarbeit mit Schulen oder der Pädagogischen Hochschule Karlsruhe

Von F+B wurde vorgeschlagen, zunächst einen Rahmen für das langfristige Quartierskonzept intern vom Team der VOLKSWOHNUNG ausarbeiten zu lassen und dann unter Beteiligung der Mieter zu konkretisieren. Die Umsetzung des Konzeptes soll möglichst zügig als „Projekt“ erfolgen, bei dem Zeitpläne, verfügbare finanzielle Mittel und Verantwortung konkret definiert sind und durch ein Projekt-Controlling begleitet werden. Eine – bereits eingeleitete – Einbindung in laufende Förderprogramme (Bund-Länder-Programm „Soziale Stadt“, Entwicklung von Großwohnsiedlungen, „Energieeffiziente Quartiere“, Energiekonzept Karlsruhe, KfW-Programme, EU-Projekt) soll dabei helfen, Mittel zur Konzeptumsetzung bereitzustellen. Ferner soll die öffentliche Aufmerksamkeit – lokal und überregional – verstärkt werden, was auch zur Image-Entwicklung des Quartiers und nicht zuletzt der VOLKSWOHNUNG beiträgt.

Ein Teil der Konzeptvorschläge von F+B wurde durch die VOLKSWOHNUNG bereits umgesetzt bzw. befindet sich noch in der Umsetzung, jedoch werden voraussichtlich nicht alle Maßnahmen realisierbar sein.

## II

## Quartiers-Energiebilanz – Ausgangsdaten 2008

Mit den Gebäude-Energieverbrauchsdaten (Gas, Strom) der Stadtwerke Karlsruhe von 2005 bis 2007 und der Gebäudeanalyse von IGK – diese Daten standen nur für die Gebäude der VOLKSWOHNUNG zur Verfügung – wurde zunächst eine Übersicht über die Eckdaten dieser Gebäude im Rinheimer Feld erstellt. Zur Berechnung der Energiekennzahlen mit Hilfe der Gasverbrauchsdaten wurde angenommen, dass seit dem Gasanschluss des Gebiets Ende der 60er Jahre alle Gebäude aus den 50er Jahren (nördlicher Teil des Quartiers), die ursprünglich Kohle-Einzelöfen gehabt hatten, auf Wohnungs-Gasöfen bzw. Gas-Warmwasser-Durchlauferhitzer im Bad umgerüstet wurden (die neueren Mehrfamilienhäuser hatten von Anfang an Erdgas-Heizzentralen).

Ein Maßstab für die energetische Qualität des jeweiligen Gebäudes ist dessen spezifischer Heizenergieverbrauch  $q_{\text{Hz}}$  ( $\text{kWh}/\text{m}^2$ ). Dieser Maßstab wird im Projekt verwendet. Da eine Messung des Jahresverbrauchs von Heizenergie und Warmwasser vor der Sanierung nicht vorliegt, sondern nur des Erdgasverbrauchs, ist es zur Ermittlung von  $q_{\text{Hz}}$  erforderlich, Annahmen über den Wirkungsgrad der Wärmeerzeuger sowie über den Warmwasser-Verbrauch zu treffen. Hier muss zwischen Gebäuden mit Zentralheizung und Gebäuden mit Einzelheizung unterschieden werden. Während im ersten Fall Verluste der Wärmeverteilung innerhalb des Gebäudes entstehen, treten diese Verluste im zweiten Fall nicht auf. Ein Vergleich mit anderen Mehrfamilienhäusern der VOLKSWOHNUNG zeigt, dass der Energieverbrauch zur Warmwasserbereitung für Mehrfamilienhäuser mit Zentralheizung im Durchschnitt bei  $27 \text{ kWh}/\text{m}^2$  liegt, während der durch Heißwasserzähler in den Wohnungen gemessene Warmwasser-Verbrauch durchschnittlich  $15 \text{ kWh}/\text{m}^2$  beträgt.<sup>12</sup> Die Verteilungsverluste der Warmwasserbereitstellung von der Heizzentrale in die Wohnungen,  $q_{\text{Vert}}$ , liegen also bei den nicht sanierten Wohnungen, sofern sie über eine zentrale Warmwasserbereitung verfügen, im Mittel bei etwa  $12 \text{ kWh}/\text{m}^2$ .

Folgende Annahmen über die Jahres-Wirkungsgrade der Wärmeerzeugung (bezogen auf den unteren Brennwert  $H_u$ )<sup>13</sup> wurden zur Berechnung der Gebäude-Energiebilanz getroffen:

Gas-Durchlauferhitzer:  $\eta_{\text{DL}} = 0,87$

Gas-Einzelheizung:  $\eta_{\text{EH}} = 0,88$

Gas-Zentralheizung:  $\eta_{\text{ZH}} = 0,84$  (enthält auch die Verteilungsverluste der Heizenergie in der Heizzentrale).

<sup>12</sup> Wenn nicht anders angegeben, beziehen sich spezifische Zahlen auf die beheizte Wohnfläche.

<sup>13</sup> Der Jahreswirkungsgrad eines Heizkessels  $\eta_{\text{Ks}}$  ist definiert als der Quotient aus der jährlich vom Kessel erzeugten Wärmeenergie  $Q_N$  ( $\text{kWh}/\text{a}$ ) und der eingesetzten Endenergie EE ( $\text{kWhHu}/\text{a}$ ), berechnet mit dem gemessenen Brennstoffvolumen  $V_{\text{BS}}$  aus EE =  $V_{\text{BS}} \times H_u$ ; Hu ist der untere Heizwert des eingesetzten Brennstoffes:  $\eta_{\text{Ks}} = Q_N/\text{EE}$ ; Erdgas in Karlsruhe: Hu =  $10 \text{ kWh}/\text{m}^3$  (bei  $0^\circ\text{C}$ ); heute wird der untere Heizwert Hu als  $H_i$  (internal heating value) bezeichnet.

Da der Gasverbrauch pro Gebäude von den Stadtwerken mit dem oberen Heizwert  $q_{Ho}$  (kWh/Ho) abgerechnet wird, muss er zur Berechnung der Energiekennzahl auf den unteren Heizwert  $q_{Hu}$  umgerechnet werden:  $q_{Hu} = 0,90 \cdot q_{Ho}$  (kWh/Hu).

Für Gebäude mit Einzelheizung und Gas-Durchlauferhitzer ergibt sich der spezifische Heizenergieverbrauch  $q_{Hz}$  aus

$$q_{Hz} = (q_{Hu} - q_{WW}/\eta_{DL}) \cdot \eta_{EH} \text{ (kWhth/m}^2\text{)}.$$

Für Gebäude mit Gas-Zentralheizung erfolgt die Rechnung analog. Für die Energiebilanz müssen hier jedoch noch die Verteilungsverluste  $q_{Verl}$  vom Kessel bis zu den Wohnungen berücksichtigt werden. Daher ergibt sich für die mit dem Gaskessel erzeugte Wärme  $q_{Ks}$

$$q_{Ks} = q_{Hu} \cdot \eta_{ZH} = q_{Hz} + q_{WW} + q_{Verl}$$

und damit

$$q_{Hz} = q_{Hu} \cdot \eta_{ZH} - (q_{WW} + q_{Verl}) \text{ (kWhth/m}^2\text{)}.$$

An vier der in 1998/99 sanierten Gebäude wurden Solarkollektoranlagen zur Unterstützung der Warmwasser-Bereitstellung installiert (insgesamt 386 m<sup>2</sup>). Die Solarerträge werden (bisher) nur unregelmäßig gemessen. Die Ablesung zwecks Ermittlung der Verbrauchsausweise ergab in 2008 einen mittleren Ertrag von  $q_s = 9 \text{ kWh pro m}^2 \text{ Wfl}$ . Zur Berechnung von  $q_{Hz}$  wird für diese vier Gebäude der zusätzliche solare Energieeintrag  $q_s$  durch die Energiebilanz

$$q_{Hu} \cdot \eta_{ZH} + q_s = q_{Hz} + q_{WW} + q_{Verl}$$

berücksichtigt. Damit ergibt sich der spezifische Heizwärmeverbrauch von Gebäuden, die mit Solarkollektoren zur Warmwasser-Bereitstellung ausgestattet sind, aus

$$q_{Hz} = q_{Hu} \cdot \eta_{ZH} + q_s - (q_{WW} + q_{Verl}).$$

Dieser Wert für die Heizkennzahl  $q_{Hz}$  wurde witterungsbereinigt (langjähriges Mittel der HGt<sub>15</sub><sup>20</sup> in Karlsruhe: 2.053 Kd → Anhang A1-4). Der korrigierte Wert des Verbrauchs an Endenergie,  $q_{Hu}^{kor}$ , ergibt sich dann aus

$$q_{Hu}^{kor} = q_{Hu} + (q_{Hz}^{kor} - q_{Hz})/\eta_{ZH}.$$

Mit diesen Daten wurde der Mittelwert über die Jahre 2005 bis 2007 gebildet, um für jedes Gebäude die witterungsbereinigten Heizkennzahlen  $q_{Hz}$  (kWhth/m<sup>2</sup>) für die Verbrauchsausweise 2008 zu erstellen. Dies ergibt die in Abb. II-1 bzw. Tab. II-1 angegebenen Werte für die Gebäude der VOLKSWOHNUNG in Rintheim.<sup>14</sup>

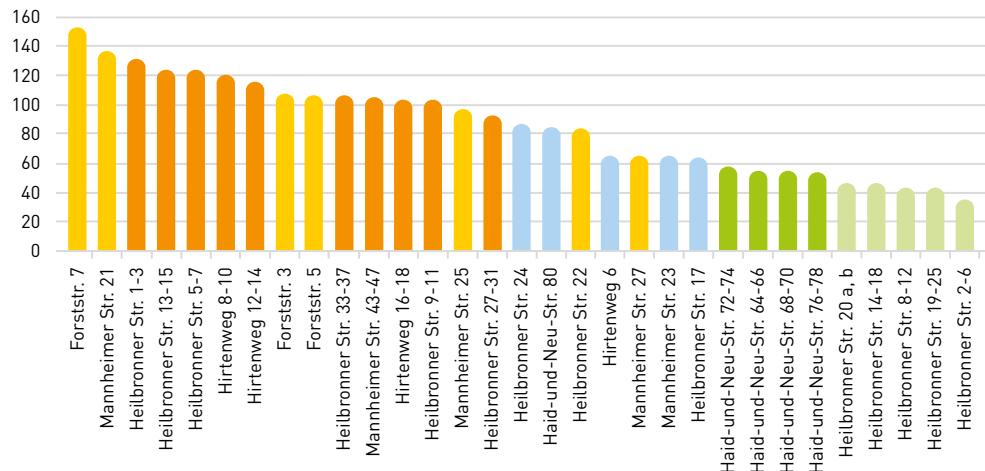
Diese Daten illustrieren den unterschiedlichen Sanierungsstandard der einzelnen Gebäude, Stand 2008, von nicht saniert über teilsaniert bis vollsaniert. Abb. II-1 demonstriert ferner

<sup>14</sup> Die Energiekennzahl im Verbrauchsausweis bezieht sich auf die in der EnEV definierte Gebäudenutzfläche  $A_N$  und nicht, wie hier angegeben, auf die beheizte Wohnfläche.

### Spez. Heizenergieverbrauch 2008 (kWh/m<sup>2</sup> Wfl.)

**Abb. II-1:** Spezifischer Heizenergieverbrauch laut Verbrauchsausweis 2008 der Gebäude der VOLKSWOHNUNG im Rintheimer Feld zu Vorhabensbeginn in 2008

- in 1999 saniert und mit Solarkollektoren
- 1998 saniert
- teilsaniert
- Riegel-MFH, nicht saniert
- Punkthochhaus-MFH, nicht saniert



direkt den Effekt der energetischen Sanierung durch Wärmedämmung der Hüllflächen, der in der Öffentlichkeit häufig in Zweifel gezogen wird (Arentz 2014; Becker 2014).

Die in der ersten Sanierungsphase vor 2000 durchgeführten Sanierungsmaßnahmen führten zu einer Verringerung des Heizenergieverbrauchs von  $q_{Hz} \approx 115$  bis  $150$  kWh/m<sup>2</sup> vor der Sanierung auf  $40$  bis  $55$  kWh/m<sup>2</sup> (vollsaniert). Im Vergleich zu den unsanierten Gebäuden hat sich demnach der Heizwärmeverbrauch durch die energetische Sanierung um deutlich über  $50\%$  reduziert.

Tabelle rechte Seite:

**Tab. II-1:** Übersicht (Stand 2008)  
über Eckdaten der Gebäude  
der VOLKSWOHNUNG im  
Rintheimer Feld mit Angabe des  
spezifischen Heizenergiever-  
brauchs  $q_{Hz}$  entsprechend den  
Verbrauchsdaten 2005–2007

<sup>15</sup> Die Summen der Haushalts-Stromverbräuche pro Gebäude wurden der VOLKSWOHNUNG ebenfalls von den Stadtwerken Karlsruhe zur Verfügung gestellt.

Adresse	Bau-jahr	Jahr der Sanierung	Anzahl Geschosse	Anzahl WE	beheizte Wfl. m <sup>2</sup>	HH Strom <sup>15</sup> (2008) kWh/m <sup>2</sup>	Gas Hu witt.-bereinigt (2008) MWhHu	q <sub>H2</sub> witt.-bereinigt kWh/m <sup>2</sup>
Haid-und-Neu-Str. 64-66	1954	1998	4	29	1.737	31,8	177,3	58,7
Haid-und-Neu-Str. 68-70	1954	1998	4	29	1.737	32,8	176,8	58,5
Haid-und-Neu-Str. 72-74	1954	1998	4	29	1.737	35,0	183,1	61,5
Haid-und-Neu-Str. 76-78	1954	1998	4	29	1.737	33,5	174,0	57,1
Heilbronner Str. 1-3	1954	2014	4	16	1.022	48,9	204,2	152,9
Heilbronner Str. 5-7	1954	2014	4	16	1.022	36,4	193,8	144,3
Heilbronner Str. 9-11	1954	2014	4	16	1.022	50,0	165,4	121,0
Heilbronner Str. 13-15	1954	2014	4	16	1.022	42,4	194,6	145,0
Heilbronner Str. 2-6	1954	1999	4	30	2.293	29,1	178,8	38,5
Heilbronner Str. 8-12	1954	1999	4	45	2.288	30,2	204,5	48,1
Heilbronner Str. 14-18	1955	2000	4	45	2.290	28,2	212,0	50,8
Heilbronner Str. 20 a, b	1955	2000	4	35	2.291	28,1	191,6	43,3
Forststr. 7	1974	2008	9	36	2.776	33,8	497,6	123,6
Forststr. 3	1974	2010	9	34	2.768	39,3	473,7	116,7
Forststr. 5	1974	2010	9	34	2.768	35,3	471,0	115,9
Mannheimer Str. 21	1974	2012	13	48	3.186	35,9	665,2	148,4
Mannheimer Str. 23	1974	2012	12	36	2.768	35,8	368,3	84,8
Mannheimer Str. 25	1974	2012	13	48	3.168	32,4	504,6	106,8
Heilbronner Str. 22	1974	2011	17	80	4.308	29,9	748,2	118,9
Heilbronner Str. 24	1974	2011	9	63	2.768	33,4	401,0	94,7
Heilbronner Str. 19-21	1955	2000	4	20	1.334	35,5	121,8	49,7
Heilbronner Str. 23-25	1955	2000	4	20	1.334	35,5	114,0	44,8
Heilbronner Str. 27-31	1956	2008	5	30	2.014	49,0	287,1	104,7
Heilbronner Str. 33-37	1956	2009	5	30	2.023	41,9	321,1	118,3
Mannheimer Str. 43-47	1956	2010	5	30	2.034	37,3	316,5	115,7
Hirtenweg 8-10	1956	2011	4	24	1.183	35,0	206,5	131,6
Hirtenweg 12-14	1956	2012	4	24	1.175	40,3	201,1	128,7
Hirtenweg 16-18	1956	2012	4	24	1.183	40,4	182,0	114,2
Heilbronner Str. 17	1956	2013	8	32	2.063	23,2	168,0	68,4
Haid-und-Neu-Str. 80	1956	2013	8	32	2.063	27,7	221,6	90,2
Hirtenweg 6	1956	2013	8	32	2.063	23,5	171,7	69,9
Mannheimer Str. 27	1974	2013	12	39	3.135	31,6	374,4	73,3
<b>Σ bzw. Mittelwert</b>				<b>1.051</b>	<b>66.310</b>		<b>9.071,6</b>	<b>93,7</b>

**III****Quartiers-Energiekonzept Karlsruhe-Rintheim****III.1 Einleitung**

Gegenstand des Konzeptes war die wirtschaftliche Optimierung der Maßnahmen zur energetischen Gebäudesanierung und der Versorgung mit Nutzwärme.<sup>16</sup> Vorgabe war es, die Energieziele der Bundesregierung so zu erreichen, dass sich für die Bewohner möglichst geringe Mehrkosten ergeben: Im Idealfall soll die Modernisierung „warmmietneutral“ erreicht werden.<sup>17</sup> Aus dem langfristigen Ziel eines „CO<sub>2</sub>-neutralen Gebäudebestandes“ ergibt sich die Aufgabe, in den nächsten 30 bis 40 Jahren alle Bestandsgebäude in Deutschland von einem derzeitigen mittleren Primärenergie-Verbrauch zur Deckung des Nutzwärmebedarfs von um die 200 kWhPE/m<sup>2</sup> auf etwa 40 bis 50 kWhPE/m<sup>2</sup> zu bringen, was dem Energiestandard eines Passivhauses entspricht.<sup>18</sup>

Wie in Anhang AII-1 für das dort betrachtete Vergleichsgebäude gezeigt, steigen die Kosten der energetischen Gebäudesanierung ab einem Wärmeschutz-Niveau, bei dem sich ein Heizenergiebedarf  $q_{Hz}$  von ca. 40 bis 50 kWh/m<sup>2</sup> ergibt (spezifischer Transmissionswärmeverlust  $H_T \approx 0,40 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ), stark an. In vielen Bestandsgebäuden, etwa den meisten Innenstadt-Gebäuden, ist ein Passivhaus-Niveau ausschließlich durch Einsparmaßnahmen am Gebäude aus Kostengründen kaum erreichbar. Ein großflächiger Einsatz erneuerbarer Energien zur Versorgung dieser Gebäude ist ebenfalls teuer, wobei in größeren Städten das erforderliche Potenzial an erneuerbaren Energien in der Stadt bzw. im Umland nicht annähernd vorhanden ist (UrbanReNet 2014). Um die genannten Ziele mit vertretbaren Kosten zu erreichen, muss daher die Gebäudesanierung mit einer Effizienzerhöhung der Energieversorgungssysteme verknüpft werden. In urbanen Quartieren mit hoher Energiedichte erhöht dies den Spielraum für eine wirtschaftliche Optimierung beträchtlich und bietet ferner Möglichkeiten, Quartierskonzepte mit den Anforderungen der „Energiewende“ hinsichtlich Nachfrage-Flexibilität und Speicherfähigkeit zu verbinden.

Dies ist der Ansatz der EnEff:Stadt-Initiative: von einer Maximierung der energetischen Qualität von Einzelgebäuden, die i. A. mit (zu) hohen Kosten verknüpft ist, zu einer kosteneffizienteren Lösung auf Quartiersebene zu kommen, um die zur Zielerreichung erforderliche Umsetzungsrate auch wirklich zu erreichen. Es ist die Zielsetzung dieser Initiative, aus Projekten wie dem „Quartiers-Energiekonzept Karlsruhe-Rintheim“ Schlussfolgerungen zu ziehen, wie dies

---

<sup>16</sup> Der Stromverbrauch in den Mieter-Haushalten war nicht Gegenstand des Konzeptes.

<sup>17</sup> Unter „warmmietneutral“ ist zu verstehen, dass die Erhöhung der Kaltmiete nach der Sanierung durch die Reduzierung der Energiekosten im Durchschnitt für alle Mieter eines MFH gerade kompensiert wird.

<sup>18</sup> Passivhaus-Gebäude haben per definitionem einen Heizenergiebedarf von ca. 15 kWh pro m<sup>2</sup> AN. Mit Warmwasser-Verbrauch und Verlusten bei Wärmeerzeugung und -verteilung ergibt sich ein Primärenergieverbrauch im Bereich von 40 bis 50 kWhPE pro m<sup>2</sup> Wfl.

umsetzbar ist, welche Kostenstrukturen bzw. welche Wirtschaftlichkeit sich in der Praxis ergeben und welche organisatorischen Rahmenbedingungen dafür gegeben sein müssen.

### III.2 Energiekonzept

In Rintheim bestand die günstige Ausgangslage, dass im Jahr 2008 zwischen den Stadtwerken Karlsruhe und der Raffinerie MiRO (am Rhein nördlich von Karlsruhe gelegen) eine Einspeisung von Industrieabwärme in das Fernwärmennetz der Stadtwerke (Transportentfernung zum Netzeinspeisepunkt ca. 2,5 km) vereinbart wurde. Um dieses Potenzial möglichst gut auszunutzen, muss das Fernwärmennetz in Karlsruhe verdichtet und ausgebaut werden. Das Quartier Rintheimer Feld liegt etwa 300 m von der nächsten möglichen Fernwärmee-Auskopplungsstelle (Technologiepark Karlsruhe) entfernt. Netzanschluss und Aufbau eines eigenen Nahwärmennetzes waren daher kurzfristig möglich.

Ziel des Energiekonzeptes war es, ein wirtschaftliches Gesamt-Optimum zu erreichen: Die Summe der Gesamt-Jahreskosten der energetischen Sanierung der Einzelgebäude und des Nahwärmennetzes sowie der Betriebskosten für den Bezug und die Verteilung der Nahwärme sollten ein Minimum sein.<sup>19</sup> Für die Berechnung dieser Kosten wurde eine „Life-Cycle-Analyse“ unter der Annahme konstanter Energiepreise des Jahres 2012 zugrunde gelegt.

Um die Nutzung der Industrieabwärme mit Temperaturen unter 100 °C langfristig zu optimieren, ist künftig eine Absenkung der Temperaturen im Fernwärmennetz der Stadtwerke Karlsruhe erforderlich. Deshalb wurde für das Nahwärmennetz Rintheim ein Betriebsregime von ca. 75/45 Vorlauf-/Rücklauf-Temperatur konzipiert. Da die Fernwärme heute noch mit 130/85 gefahren wird, muss sie für das Quartier Rintheimer Feld über eine Übergabestation am Hirtenweg 8 indirekt übergeben werden.

Die Transportleitung vom Technologiezentrum Karlsruhe bis zur Übergabestation in Rintheim/Hirtenweg (→ Abb. III-1, Seite 28) wurde 2008 von den Stadtwerken Karlsruhe errichtet, das Nahwärmennetz Rintheim 2009 bis 2012 von der VOLKSWOHNUNG. Es wird von der KES – Karlsruher Energie-Service GmbH, einer gemeinsamen Tochter der VOLKSWOHNUNG und der Stadtwerke Karlsruhe, auf Pachtbasis betrieben und von den Stadtwerken technisch betreut. Die KES verkauft die Nahwärme frei Hausübergabestation an die angeschlossenen Gebäude in Rintheim. Theoretisch besteht auch noch Lieferpotenzial für weitere Abnehmer in der Nachbarschaft des Quartiers.

Alle Gebäude in Rintheim, einschließlich der nicht der VOLKSWOHNUNG gehörenden Gebäude und der Gebäude der Grund- und Hauptschule, wurden bis 2014 an das Nahwärmennetz

<sup>19</sup> Die tatsächlichen Kosten stellen sich für Mieter, Vermieter und Netzbetreiber unterschiedlich dar. Sie ergeben sich aus deren individueller Kalkulation auf Basis der „optimalen“ Kostenstruktur.

**Abb. III-1:** Versorgungsstrasse (hellgrün) sowie Bauabschnitte zur Errichtung des Nahwärmenetzes Rintheim:

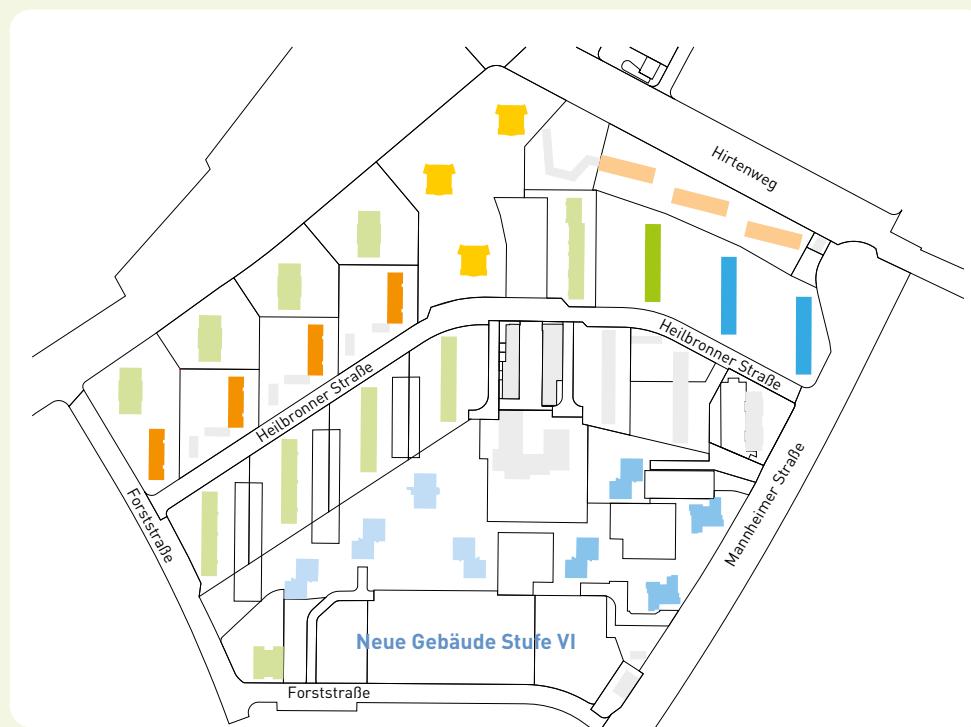
- 1. Bauabschnitt 2009
- 2. Bauabschnitt 2010
- 3. Bauabschnitt 2011/12
- späterer Ausbau 2014  
(Anschluss Schulen und neue Mehrfamilienhäuser im Süden)



angeschlossen. Es hat ab Übergabestation Hirtenweg eine Trassellänge von 2.790 Metern, die Nennweite liegt bei DN 200 ab Übergabestation, stufenweise fallend auf DN 65. Die Nennweite der Hausanschlüsse (1.470 m, in den o. g. 2.790 m enthalten) liegt bei DN 50. Der Anschlusswert des Netzes liegt bei ca. 5.000 kWth.

### III.3 Gebäudesanierungs-Zeitplan

Die Sanierung der bis 2008 noch nicht sanierten Gebäude erfolgte von 2008 bis 2014 in mehreren Stufen (Tab. III-1, Abb. III-1). Der Wärmeschutzstandard der vorzusehenden Sanierungsmaßnahmen wurde für jeden Gebäudetyp auf der Basis des Ausgangszustandes, der gegebenen technischen Möglichkeiten und ihrer Kostenstruktur bzw. des zu erwartenden Kosten/Nutzen-Verhältnisses festgelegt. Zielsetzung war es, den Verbrauch an Nutzwärme bei möglichst niedrigen Gesamtkosten so stark wie möglich zu senken. Nur die Sanierung der beiden Forschungsgebäude, die im Zeitraum 2009 bis 2011 erfolgte, wurde im Rahmen des EnEff:Stadt-Projektes gefördert (→ Kap. IV).



**Abb. III-2:** Sanierungsplan für die Gebäude der VOLKSWOHNUNG im Quartier Rinheimer Feld:

- Stufe I
- Stufe II
- Stufe III
- Stufe IV
- Stufe V
- Referenzgebäude
- Forschungsgebäude
- bereits bis 2008 saniert

Die hellgrauen Gebäude gehören nicht der VOLKSWOHNUNG.

Sanierungsmaßnahme	Zeitraum	Gebäude/Wohnungen
Referenzgebäude <sup>20</sup> (= Vergleichsobjekt: „Standardsanierung“)	2008	1 Gebäude, 30 Wohneinheiten
Forschungsgebäude <sup>21</sup> (→ Kap. IV)	2009/11	2 Gebäude, 60 Wohneinheiten
Stufe I	2012/13	3 Gebäude, 72 Wohneinheiten
Stufe II	2013/14	4 Gebäude, 64 Wohneinheiten
Stufe III	2011/12	4 Gebäude, 136 Wohneinheiten
Stufe IV	2014	3 Gebäude, 96 Wohneinheiten
Stufe V	2013/14	3 Gebäude, 125 Wohneinheiten
Stufe VI	2015	3 neue Gebäude, 114 Wohneinheiten

**Tab. III-1:** Zeitplan für die von 2008 bis 2014 durchgeführten Sanierungsmaßnahmen an Gebäuden der VOLKSWOHNUNG im Rinheimer Feld bzw. die neuen MFH (2015).

<sup>20</sup> Heilbronner Str. 27-31, gleicher Gebäudetyp wie die beiden Forschungsgebäude: Typ Zeilenbebauung/Riegel, 3 Eingänge, 5 Vollgeschosse, 30 WE, Baujahr 1954/55.

<sup>21</sup> Heilbronner Str. 33-37 und Mannheimer Str. 43-47; siehe Kap. IV.

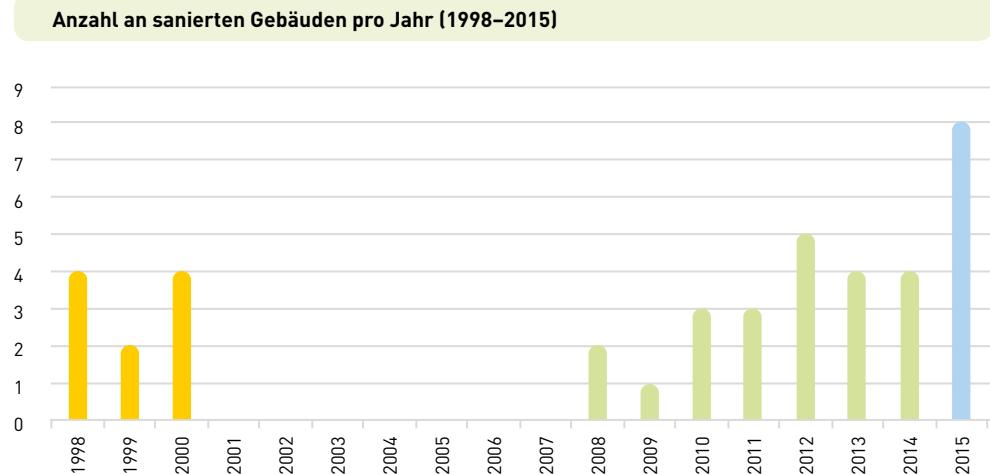
## III.4 Entwicklung der Quartiers-Energiebilanz 2008–2015

### III.4.1 Eckpunkte der Bilanzierung

Nach der ersten Sanierungsphase 1998–2000, in der zehn Gebäude saniert worden waren, folgten weitere erst im Rahmen der Umsetzung des Quartiers-Energiekonzeptes ab 2008. Der Sanierungszeitplan für die insgesamt 30 Bestandsgebäude der VOLKSWOHNUNG wurde 2014 abgeschlossen. Abb. III-3 stellt die jährliche Sanierungsrate grafisch dar.

**Abb. III-3:** Sanierungsrate  
Wohnquartier Rintheim 1998 –  
2014 (nur Gebäude der  
VOLKSWOHNUNG) bzw. Zubau  
von acht neuen MFH in 2015

- 1. Sanierungsphase
- 2. Sanierungsphase
- Neubau



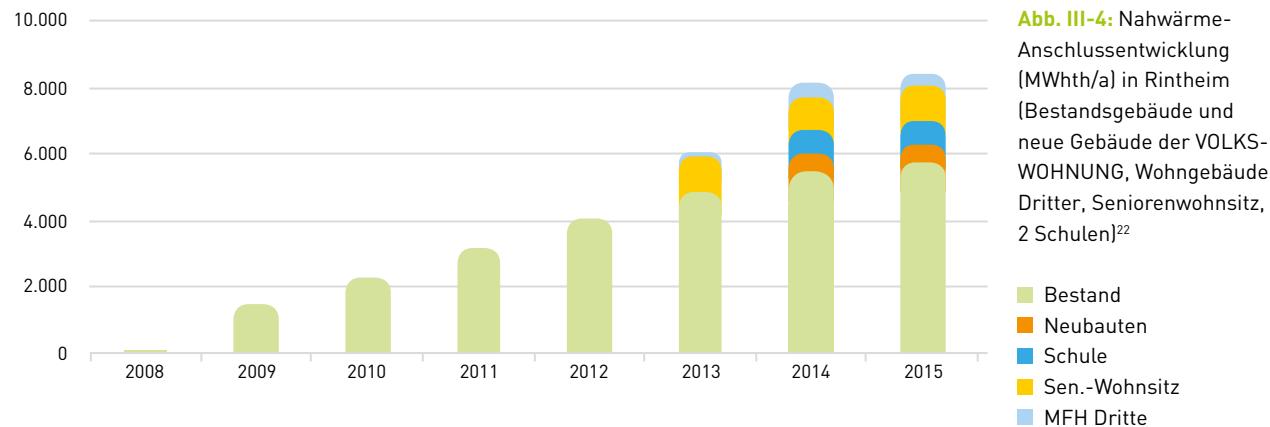
Der Nahwärme-Anschluss von Gebäuden in Rintheim, die nicht der VOLKSWOHNUNG gehören, erfolgte erst ab dem Jahr 2013. Die Entwicklung des Wärmebezugs (MWh/a) aus dem Nahwärmennetz zeigt Abb. III-4 auf der nächsten Seite; sie korrespondiert mit der steigenden Anzahl durchgeföhrter Sanierungen bzw. realisierter Anschlüsse bis zur vollständigen Umsetzung des Quartierskonzeptes.

Grundsätzlich liegen vollständige Messdaten des jährlichen Verbrauchs der Gebäude an Endenergie, Heizenergie und Warmwasser erst vor, nachdem die Sanierungsmaßnahmen umgesetzt wurden und der Anschluss an das Nahwärmennetz erfolgt ist. Zur Bilanzierung des Jahres-Energieverbrauchs der Gebäude vor ihrer Sanierung können nur die Gasverbrauchsdaten der Stadtwerke Karlsruhe aus den Jahren 2005–2007 benutzt werden, die auch als Grundlage für die Ermittlung der Verbrauchsausweise 2008 gedient haben (→ Kap. II).

Die energetische Bilanzierung erfolgt für vier verschiedene Zeitpunkte:

1. vor Beginn des Sanierungsprogramms (1998: „Ausgangszustand“)
2. nach der ersten Sanierungsphase, aber vor Beginn des Forschungsprojektes („Startbilanz 2008“)
3. nach Abschluss des Forschungsprojektes 2012: die meisten Gebäude der VOLKSWOHNUNG saniert und an die Nahwärme angeschlossen, Messungen liegen vor bzw. Verbräuche können berechnet werden
4. nach Abschluss aller Sanierungsmaßnahmen 2015: Fortschreibung aufgrund der Messdaten 2012 bzw. Rückgriff auf die Planungsdaten.

**NW Anschlussentwicklung in Rintheim 2008–2015 (MWh/a)**



### III.4.2 Gemessener Wärmeverbrauch 2012

2012 ist das erste Jahr, für das der gemessene Wärmeenergieverbrauch der an das Nahwärmenetz angeschlossenen Gebäude der VOLKSWOHNUNG nahezu vollständig vorliegt. Tab. III-2 auf Seite 32 zeigt eine Übersicht über die Wärmeabrechnung der KES – Karlsruher Energieservice GmbH für 2012.

<sup>22</sup> 2014 und 2015: Planzahlen.

**Tab. III-2:** Jahres-Fernwärmeverbrauchsdaten der bis 2012 an die Nahwärme angeschlossenen 25 Gebäude der VOLKSWOHNUNG (Summe: 4.020 MWhth); installierte Wärmeleistung der Gebäude nach Planungsdaten  
\*) Teilversorgung in 2012

NW-Anschluss	Gebäude der VOLKSWOHNUNG	Jahres-Wärmeabgabe 2012		Anschlusswert (Planung)	
		MWh/a	kWh/m <sup>2</sup>	kW	W/m <sup>2</sup>
10/10	Haid-und-Neu-Str. 64-66	152,9	88,0	100	57,6
10/10	Haid-und-Neu-Str. 68-70	156,8	90,3	100	57,6
10/10	Haid-und-Neu-Str. 72-74	161,5	93,0	110	63,3
10/10	Haid-und-Neu-Str. 76-78	147,8	85,1	90	51,8
9/10	Heilbronner Str. 2-6	152,7	66,6	90	39,2
9/10	Heilbronner Str. 8-12	171,0	74,7	100	43,7
10/10	Heilbronner Str. 14-18	171,6	74,9	100	43,7
7/09	Heilbronner Str. 20 a, b	183,3	80,0	100	43,6
9/10	Forststr. 7	187,8	67,7	120	43,2
11/10	Forststr. 3	215,7	77,9	180	65,0
11/10	Forststr. 5	239,1	86,4	180	65,0
2012	Mannheimer Str. 21	99,7	31,3	180	56,5
2012	Mannheimer Str. 23 *)	61,0	22,0	180	65,0
2012	Mannheimer Str. 25 *)	91,9	29,0	180	56,8
12/11	Heilbronner Str. 22	432,4	100,4	180	41,8
10/11	Heilbronner Str. 24	252,4	91,2	180	65,0
7/09	Heilbronner Str. 19-21	97,2	72,9	50	37,5
7/09	Heilbronner Str. 23-25	101,0	75,7	50	37,5
7/08	Heilbronner Str. 27-31	145,8	72,4	80	39,7
3/10	Heilbronner Str. 33-37	140,6	69,5	80	39,5
5/11	Hirtenweg 12-14	110,1	93,7	50	42,6
10/11	Hirtenweg 16-18	107,7	91,0	50	42,3
8/09	Heilbronner Str. 17	140,3	68,0	120	58,2
7/09	Haid-und-Neu-Str. 80	154,0	74,6	120	58,2
7/09	Hirtenweg 6	142,5	69,1	120	58,2

### III.4.3 Entwicklung des spezifischen Heizenergieverbrauchs bis 2015

Die Sanierung aller Gebäude der VOLKSWOHNUNG in Rintheim und deren Anschluss an die Nahwärme wurden im Lauf des Jahres 2014 abgeschlossen, d. h., dass die gemessenen Verbrauchswerte des Jahres 2015 erstmalig die erreichte Verringerung an Wärmeenergieverbrauch der Gebäude der VOLKSWOHNUNG im Quartier nach ihrer Sanierung ergeben werden. Den spezifischen Heizenergieverbrauch für die Jahre 1998 (vor Beginn der Sanierungsphase, „zurückgerechnet“), 2008 (Verbrauchsausweise 2005 bis 2007), 2012 (Messwerte) und 2015 (Prognose nach Abschluss der Sanierung) zeigt Tab. III-3 auf Seite 34. Für 1998 wurden die spezifischen Verbräuche von noch nicht sanierten Gebäuden gleichen Bautyps aus dem Energieverbrauchsausweis 2008 übernommen, unter der Annahme, dass diese Gebäude im Jahr 1998 (vor der Sanierung) denselben spezifischen Energieverbrauch aufwiesen wie die typgleichen nicht sanierten Gebäude in 2008. Die Energiekennzahlen 2012 der noch nicht an die Nahwärme angeschlossenen Gebäude, an denen zwischen 2008 und 2012 nichts verändert wurde, wurden vom Jahr 2008 übernommen. Für die sechs Gebäude, die erst im Lauf des Jahres 2012 an die Nahwärme angeschlossen wurden, liegen keine vollständigen Jahresverbrauchswerte 2012 vor. Hier wurden die Planzahlen übernommen. Alle Werte sind gradtagszahlbereinigt (→ Anhang A1-4), um einen jahresübergreifenden Vergleich zu ermöglichen. Für die „Prognose 2015“ wurden die Planwerte der sieben für 2013 und 2014 zur Sanierung anstehenden Gebäude angesetzt, bei allen übrigen Gebäuden wurden die Werte von 2012 für das Jahr 2015 fortgeschrieben.

Die Messwerte werden vom Energiemanagement der VOLKSWOHNUNG laufend weiter erfasst werden, um künftig ein belastbares Energiecontrolling der Liegenschaften der VOLKSWOHNUNG zu ermöglichen.

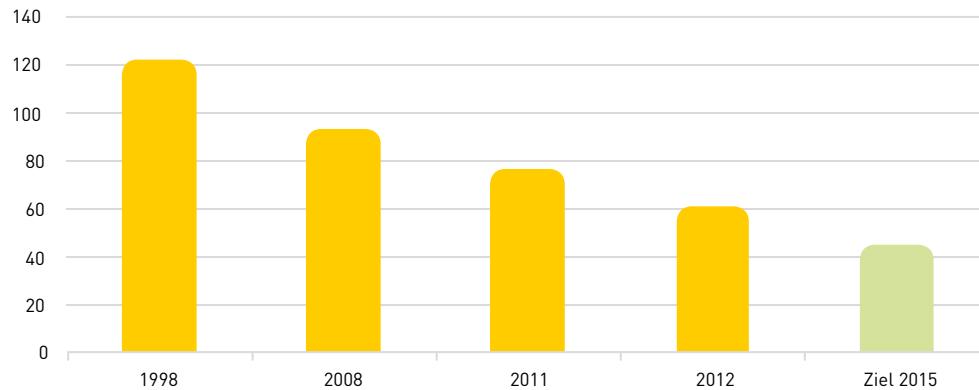
Die Entwicklung der Durchschnittswerte des spezifischen Heizenergieverbrauchs  $q_{Hz}$  aller Gebäude der VOLKSWOHNUNG von 1998 bis 2015 zeigt Abb. III-5<sup>23</sup> auf Seite 35. Der 2015 erreichte Mittelwert von  $q_{Hz}$  liegt bei 52 kWh pro  $m^2$  Wfl. Nach Abschluss der Gebäudesanierung wird sich somit der Heizenergieverbrauch im Vergleich zu den Werten vor Sanierungsbeginn um fast 60 % reduziert haben.

<sup>23</sup>  $q_{Hz}$  enthält hier die Verteilungsverluste der Heizwärme im Gebäude frei Heizzentrale, die bei ca. 3 kWh/ $m^2$  Wfl. liegen dürften (→ Anhang A1-2).

**Tab. III-3:** Entwicklung des spezifischen Heizenergieverbrauchs  $q_{Hz}$  (kWh/m<sup>2</sup> Wfl.) der Gebäude der VOLKSWOHNUNG in Rintheim, 1998 bis 2015. Die Werte in der Spalte für „2015“ sind entweder eine Fortschreibung der Werte von 2012 oder Planungswerte für Gebäude, die 2013 und 2014 noch zur Sanierung anstanden.

spezif. Heizverbrauch $q_{Hz}$ „Rintheimer Feld“ (VOLKSWOHNUNGS- Gebäude)	1998 Rückrech- nung kWhth/m <sup>2</sup>	2008 E-Verbrauchs- ausweis kWhth/m <sup>2</sup>	2012 gemessen, t-bereinigt kWhth/m <sup>2</sup>	2015 Prognose kWhth/m <sup>2</sup>
Haid-und-Neu-Str. 64-66	151	57	64	64
Haid-und-Neu-Str. 68-70	151	57	69	69
Haid-und-Neu-Str. 72-74	154	60	66	66
Haid-und-Neu-Str. 76-78	150	56	59	59
Heilbronner Str. 1-3	169	132	132	40
Heilbronner Str. 5-7	160	125	125	40
Heilbronner Str. 9-11	135	104	104	40
Heilbronner Str. 13-15	161	125	125	40
Heilbronner Str. 2-6	138	37	49	49
Heilbronner Str. 8-12	138	45	46	46
Heilbronner Str. 14-18	138	47	44	44
Heilbronner Str. 20 a, b	138	48	53	53
Forststr. 7	187	155	50	50
Forststr. 3	133	110	56	56
Forststr. 5	132	109	67	67
Mannheimer Str. 21	168	139	63	63
Mannheimer Str. 23	83	67	64	64
Mannheimer Str. 25	122	100	63	63
Heilbronner Str. 22	105	85	53	53
Heilbronner Str. 24	109	89	63	63
Heilbronner Str. 19-25	138	45	49	49
Heilbronner Str. 27-31	124	94	51	51
Heilbronner Str. 33-37	140	107	35	35
Mannheimer Str. 43-47	138	106	31	31
Hirtenweg 8-10	155	121	45	45
Hirtenweg 12-14	151	117	45	45
Hirtenweg 16-18	136	104	45	45
Heilbronner Str. 17	89	65	66	40
Haid-und-Neu-Str. 80	114	86	83	40
Hirtenweg 6	91	86	89	40
Mannheimer Str. 27	126	87	81	64

### Entwicklung des spezifischen Heizenergieverbrauchs Rintheim/VOLKSWOHNUNG (kWh/m<sup>2</sup>)



**Abb. III-5:** Entwicklung der Mittelwerte des temperaturbereinigten spezifischen Heizenergieverbrauchs der Gebäude der VOLKSWOHNUNG von 1998 bis 2012 (gemessen) bzw. bis 2015 (Ziel)

#### III.4.4 Primärenergie- und CO<sub>2</sub>-Bilanz Quartier Rintheimer Feld (VOLKSWOHNUNGS-Gebäude), 1997 bis 2015

Für eine vollständige Gebäude-Energiebilanz (Heizenergie, Warmwasser, Verteilungsverluste, aber ohne Stromverbrauch der Haushalte) muss auch der Hilfsstromverbrauch in der Heizzentrale bzw. der Stromverbrauch der Lüftungsanlagen berücksichtigt werden. Dieser Stromverbrauch wird jedoch üblicherweise nicht gesondert gemessen, sondern ist Teil des „Allgemeinstroms“, der im Rahmen der Nebenkostenabrechnung auf die Wohnungen umgelegt wird. Dieser kann für unterschiedliche Mehrfamilienhäuser unterschiedliche Komponenten enthalten (etwa Pumpen und Regelung, Ventilatoren, Beleuchtung Keller und Treppenhaus, Außenbeleuchtung, Aufzüge). Daher gibt es eine erhebliche Streuung in den Kennzahlen. Neben den in Abschnitt II genannten Kennwerten wurden für den Hilfsstromverbrauch in der Heizzentrale mangels konkret vorliegender Messungen folgende Werte für den Hilfsstromverbrauch der unterschiedlichen Heizsysteme angesetzt:

##### Ansätze für den Hilfsstrombedarf (kWhel/m<sup>2</sup>):

Gebäude alt, Einzelheizung	0,10
Gebäude alt, Zentralheizung	0,80
Gebäude saniert, Nahwärme	0,65
Gebäude saniert, Nahwärme, kontrollierte Lüftung	1,80
Gebäude saniert, Nahwärme, Lüftung mit WRG	3,50

Der restliche Teil des Allgemeinstroms (wie Beleuchtung, Aufzug) wird hier ignoriert, weil nicht zur Energieversorgung gehörig.

Für die Hausübergabestationen wurde ein mittlerer Wirkungsgrad von  $h_{HÜS} = 0,96$  angesetzt ( $\rightarrow$  III.4.5).

Für die Jahre 2011 und 2012 liegen für die Gebäude, die an die Nahwärme angeschlossen wurden, Messwerte für  $q_{NW}$ ,  $q_{Hz}$  und  $q_{WW}$  vor. Mit dem in Kap. II bzw. Anhang AI-3 beschriebenen Verfahren können mit diesen Daten für jedes Gebäude die Energiekennzahlen für unterschiedliche Sanierungszustände berechnet werden. Der resultierende spezifische Primärenergieverbrauch ergibt sich durch Multiplikation der  $q_{Hu}$ -Werte bzw. der Kennzahlen für den Hilfsstromverbrauch mit den zugehörigen Primärennergiefaktoren ( $\rightarrow$  Anhang AI-1).

Um die Quartiersbilanzierung zu vereinfachen, wurden sanierte Gebäude erst im Jahr nach Sanierung und Nahwärme-Anschluss als saniert angenommen, obwohl im Jahr der Sanierung bereits reduzierte Verbrauchswerte (für einige Monate) vorliegen. Da dieser „Mischzustand“ bezüglich der energetischen Qualität nichts aussagt, wurde für das Jahr der Sanierung bzw. des Nahwärme-Anschlusses der Energieverbrauch aus dem Vorjahr „fortgeschrieben“. Der zugehörige spezifische Primärenergieverbrauch  $pe_{th}$  ( $kWhPE/m^2$ ) wurde berechnet, wie in Anhang AI-3 angegeben. Mit dieser Berechnungsmethode ergibt sich die im Folgenden dargestellte Entwicklung der Energiekennzahlen von 1998 (vor Beginn der Sanierungsmaßnahmen) bis 2012, bzw. als Ziel des Projektes, bis 2015:

#### Entwicklung Energieverbrauch Rintheim: $q_{Hz}$ , PE, Strom

**Abb. III-6:** Entwicklung des mittleren spezifischen Heizenergieverbrauchs,  $q_{Hz}$ , und des Primärenergieverbrauchs,  $pe_{th}$ , (linke Skala, Balken) und des spezifischen Hilfsstromverbrauchs,  $e_{th}$ , (rechte Skala, Linie) zur Deckung des Nutzwärmebedarfs (Heizung, Warmwasser) aller Gebäude der VOLKSWOHNUNG im Wohnquartier Rinheimer Feld, bezogen auf die beheizte Wohnfläche, von 1998 bis 2012 (gemessen) bzw. Ziel bis 2015

- $q_{Hz}$
- $pe_{th}$
- $e_{th}$

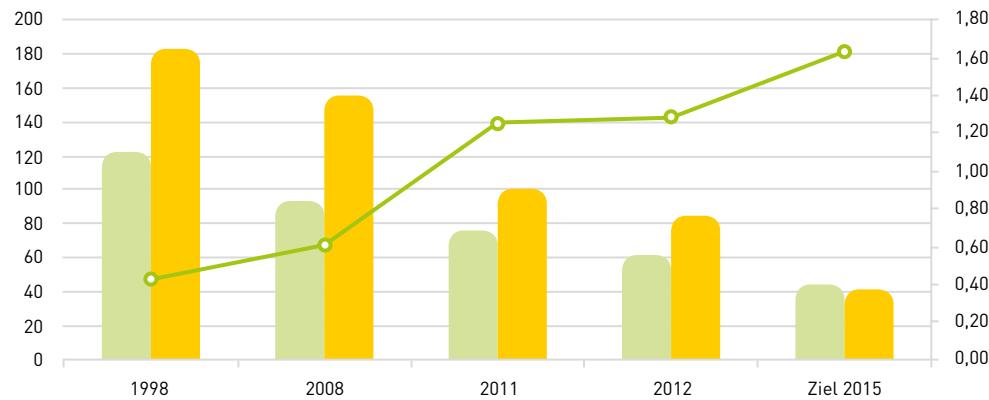


Abb. III-6 zeigt neben der Reduzierung des Heizenergieverbrauchs auch den deutlichen Anstieg des Hilfsstromverbrauchs, hauptsächlich infolge des Einbaus der Entlüftungsanlagen. Der daraus resultierende Primärenergieverbrauch macht im Endausbauzustand jedoch nicht mehr als ca. 5 % aus. Erst bei einem verbreiteten Einsatz von Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung würde er sich deutlich erhöhen.

Die Entwicklung der Primärenergie- bzw. CO<sub>2</sub>-Bilanz 1998–2015 mit den oben beschriebenen Ansätzen zeigt Abb. III-7. Dabei werden nur die Gebäude der VOLKSWOHNUNG in Rintheim betrachtet.

Fossiler Energieverbrauch Rintheim (kWh/m<sup>2</sup>)

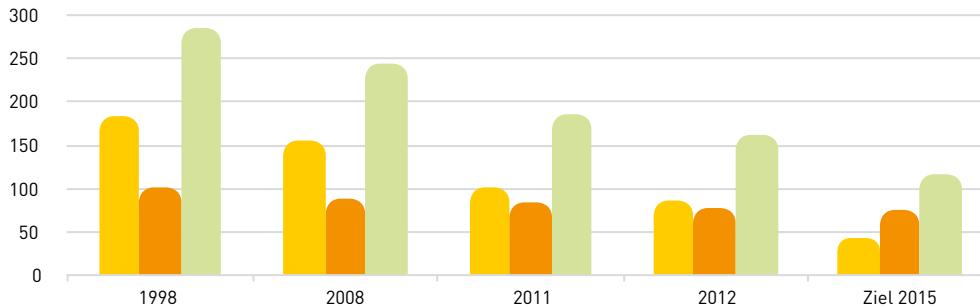


Abb. III-7 oben:

Entwicklung des spezifischen Primärenergie-Einsatzes

■ pe<sub>th</sub>: nur Wärmeversorgung

■ pe<sub>elfoss</sub>: fossiler Anteil des Primärenergie-Verbrauchs durch Stromeinsatz der Mieter-Haushalte

■ pe<sub>ges</sub>: Gesamt-Primärenergieverbrauch), jeweils in kWh/m<sup>2</sup>

CO<sub>2</sub>-Äquivalent-Emissionen (kg CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>)

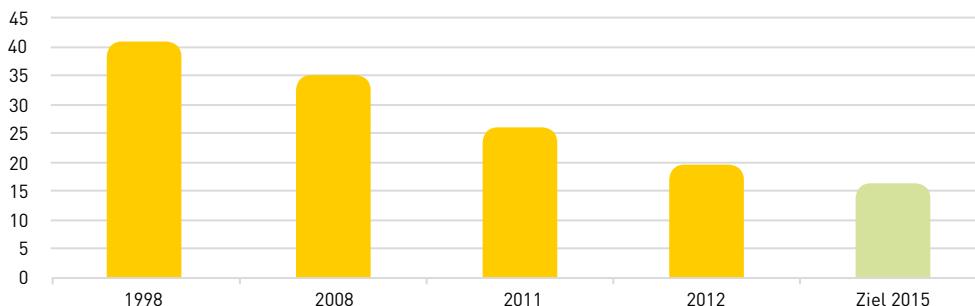


Abb. III-7 unten: CO<sub>2</sub>-Äquivalent-Emissionen der Wärmeversorgung der Gebäude der VOLKSWOHNUNG (jeweils in kg CO<sub>2</sub>-Äquivalent pro m<sup>2</sup> Wfl.) in Rintheim 1998 bis 2015 (2015 geschätzt)

Der starke Rückgang des Primärenergieverbrauchs von 2012 bis 2015 ist auf einen kombinierten Effekt zweier Faktoren zurückzuführen: den Anschluss der restlichen Gebäude der VOLKSWOHNUNG an die Nahwärme und den (erwarteten) Rückgang des Primärenergiefaktors im Strommix bis 2015 (für 2015 wurde ein PE-Faktor f<sub>el</sub><sup>foss</sup> = 2,20 kWhPE/kWhel angenommen).

Die im Rahmen der Antragstellung des Forschungsprojektes mit dem PtJ vereinbarte Zielsetzung war ein Primärenergieaufwand zur Deckung des Wärmebedarfs (Heizung und Warmwasser) in einer Größenordnung, wie er mit neuen Gebäuden in Passivhaus-Standard erreicht wird (ca. 40 bis 50 kWhPE/m<sup>2</sup>), bzw. eine Reduzierung des Gesamt-Primärenergieverbrauchs

einschließlich Haushaltsstrom um mindestens 30 %. Beide Ziele werden nach Abschluss aller Sanierungsmaßnahmen und Anschluss an das Nahwärmenetz erreicht bzw., was die Gesamt-Energiebilanz angeht, erheblich übertroffen: Die Veränderungen beim Primärenergieeinsatz im Quartier vor der Sanierung und nach Abschluss der Sanierung zeigt Tab. III-5.

**Tab. III-5:** Reduzierung des Primärenergieeinsatzes von 1998 bis 2015 (Gebäude der VOLKSWOHNUNG) für Wärmeversorgung, Haushaltsstromverbrauch und Gesamt-Primärenergieeinsatz (fossil) in Prozent

Reduzierung Primärenergieverbrauch um	
Wärmeversorgung	77,3 %
Haushaltsstromverbrauch	26,7 %
<b>Total</b>	<b>59,2 %</b>

Die Reduzierung des Primärenergieverbrauchs ist beim Strom im Vergleich zur Wärme gering: Die energetische Sanierung bewirkt eher einen Mehrverbrauch an Strom (vor allem durch Lüftungsanlagen, aber auch durch Umwälzpumpen beim Übergang von Einzelheizungen auf zentrale Systeme). Der Stromverbrauch wird jedoch dominiert durch den Haushaltsstrom (ca. 30 kWh<sub>el</sub>/m<sup>2</sup>, d. h. über 90 % des gesamten Stromverbrauchs), der tendenziell seit 1998 eher angestiegen ist. Daher erfolgt eine Primärenergie-Reduzierung im Strombereich fast nur durch Änderungen im Strommix, z. B. durch Zunahme der Nutzung von erneuerbaren Energien im Netz.<sup>24</sup>

### III.4.5 Wirkungsgrade der Hausübergabestationen (HÜS)

In 15 Gebäuden mit Nahwärme-Versorgung wurden die Nutzwärmeverbräuche (Heizung, Warmwasser) und die Nahwärme-Einspeisung (Nahwärme-Primärzähler) im Rahmen der messtechnischen Begleitung des Forschungsprojektes durch Wärmemengenzähler mit Datenfernübertragung (DFÜ) erfasst.<sup>25</sup> Damit können u. a. die Wirkungsgrade der Hausübergabestationen bestimmt werden, definiert als  $\eta_{\text{HÜS}} = (Q_{\text{Hz}} + Q_{\text{WW}})/Q_{\text{NW}}$ , z. B. über ein Jahr. Abb. III-8 zeigt die Ergebnisse der  $\eta_{\text{HÜS}}$ -Berechnungen (Mittelwerte 2012/2013).

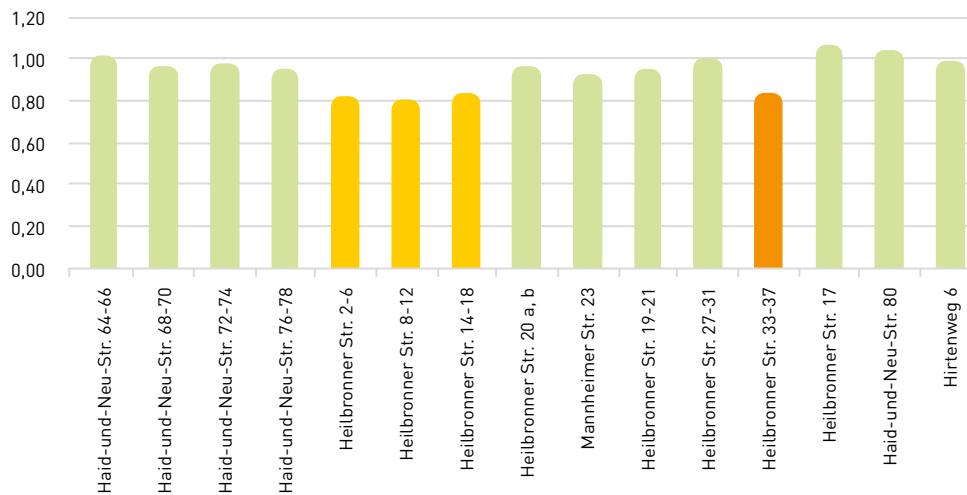
Der Mittelwert der HÜS-Wirkungsgrade lag im Jahr 2012 bei  $\eta_{\text{HÜS}} = 0,95$ , mit einer Standardabweichung von  $\pm 0,08$ . Vier der 15 Hausübergabestationen in Abb. III-8 weichen um deutlich mehr als diese Standard-Abweichung vom Mittelwert ab – ein Hinweis darauf, dass hier ein systematischer Fehler vorliegt (entweder an einem der drei jeweils beteiligten Wärmemengenzähler oder z. B. durch nicht berücksichtigte Transportverluste auf der Strecke zwischen

<sup>24</sup> Eine Reduzierung des CO<sub>2</sub>-Faktors nur dann, wenn Kernenergie nicht durch Kohle-Strom substituiert wird – anderenfalls ergibt sich eine Erhöhung.

<sup>25</sup> Laut HKV 2011 müssen bei neuen Gebäuden und bei der Sanierung von Bestandsgebäuden der Endenergieeinsatz sowie die Abgabe von Heizenergie und Warmwasser gesondert erfasst werden, um das Energiecontrolling von Mehrfamiliengebäuden zu ermöglichen.

Hausübergabestation und Sekundär-Wärmemengenzähler). Streicht man diese vier Hausübergabestationen aus der Stichprobe, so liegt der Mittelwert bei 0,99 mit einer Standardabweichung von  $\pm 0,06$ . Dieser Wirkungsgrad der Hausübergabestationen ist höher als der erwartete Wirkungsgrad von ca. 0,96. Bei den Hausübergabestationen in den drei in Abb. III-8 gelb markierten Gebäuden muss vor Ort geprüft werden, ob bzw. welcher Fehler hier vorliegt. Der niedrige Wirkungsgrad im Gebäude Heilbronner Str. 33-37, orange markiert, kann durch die Wärmeverluste der langen Transportstrecke zwischen dem Verteiler nach der Hausübergabestation und der Einbaustelle der Sekundär-Wärmemengenzähler für Heizung und Warmwasser erklärt werden.

**Verhältnis Sekundärzähler zu Primärzähler (Mittelwert 2012/13)**



**Abb. III-8:** Jahreswirkungsgrade  $\eta_{HÜS}$  der 15 an die Nahwärme angeschlossenen Hausübergabestationen in Rintheim, gemessen mit Wärmemengenzählern und erfasst durch die Ennovatis-SmartBox<sup>26</sup> (Mittelwerte der Jahre 2012 und 2013)

Generell haben sich Wärmemengenzähler als fehleranfällig erwiesen. Deshalb muss bereits bei der Konzeption und Installation der Zähler auf eine sachgerechte Planung und Abnahmemessung geachtet werden, um mögliche Fehlerquellen zu minimieren. Ferner müssen die Messwerte im Betrieb im Rahmen des Energiecontrollings regelmäßig auf Plausibilität überprüft werden, z. B. durch Vergleich redundanter Messungen.

<sup>26</sup> SmartBox ist die Herstellerbezeichnung für den Datenlogger der Firma Ennovatis, mit dem die Messwerte von Energiezählern und sonstigen, analogen Sensoren in der Heizzentrale erfasst, umgewandelt und gespeichert werden ([www.ennovatis.de](http://www.ennovatis.de)).

### III.4.6 Volllastbenutzungsdauern der installierten HÜS-Heizleistungen

Beim Anschluss an das Nahwärmenetz wird die Anschlussleistung jedes Gebäudes festgelegt. Diese kann nachträglich durch Einstellung der Durchflussmenge an der Hausübergabestation verändert werden. Da der Leistungspreis maßgeblich zu den Gesamtkosten der Nahwärme beiträgt, ist es wichtig, einen möglichst korrekten Wert zu benutzen, weil die Mieter ansonsten zu wenig oder zu viel bezahlen.

Ein Plausibilitätscheck des jeweiligen Anschlusswertes ist durch die Betrachtung der Jahresvolllaststunden,  $h_v$ , möglich. Die Volllaststunden nur für die Beheizung ergeben sich bei exakter Auslegung der Wärmeerzeugungsanlage rechnerisch aus  $h_v^{Hz} = 24 \cdot HGt/\Delta t_A$  ( $\Delta t_A$  ist die Auslegungs-Temperaturdifferenz zwischen Heizgrenztemperatur, z.B. 15 °C, und der Außentemperatur am kältesten Tag (-12 °C in Karlsruhe); HGt sind die Heizgradtage für den betrachteten Zeitraum (→ Anhang A1-4). Mit einem gemessenen  $HGt_{15}^{20}$ -Wert von 1.930 Kd im Jahr 2012 und  $\Delta t_A = 15 - (-12) = 27$  K sowie einem Aufheizzuschlag von 10 % auf die rechnerische Heizleistung ergibt sich für das Jahr 2012 eine Volllastbenutzungsstundenzahl der Heizleistung von  $h_v^{Hz} = 1.642$  h/a.

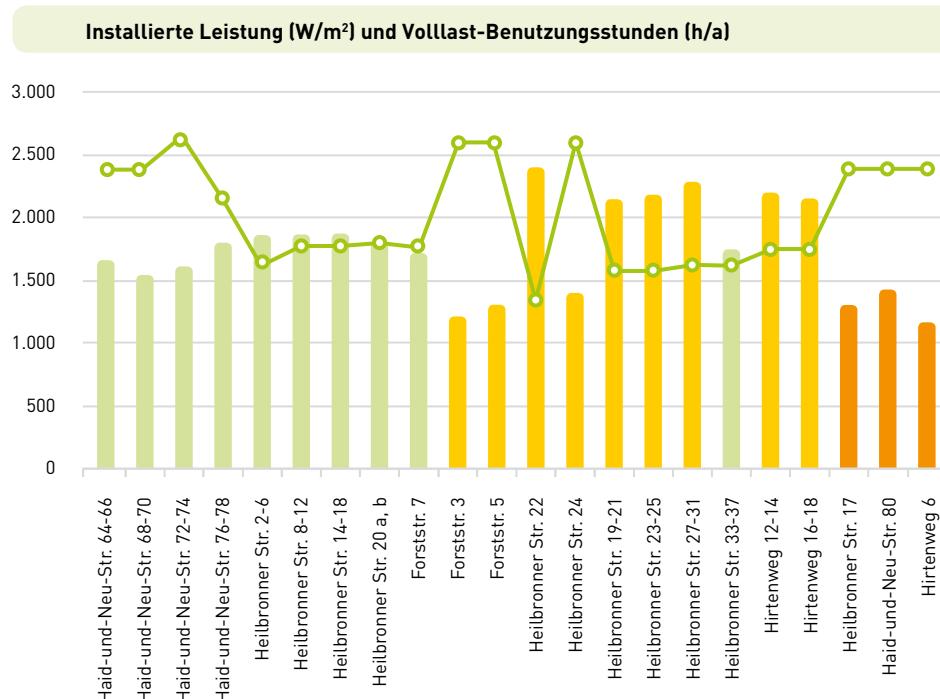
Der Leistungsbedarf der Warmwasser-Bereitstellung wird für Mehrfamilienhäuser bei der VOLKSWOHNUNG üblicherweise mit 15 W/m<sup>2</sup> angesetzt. Bei einem mittleren spezifischen Verbrauch an Warmwasser frei Heizzentrale von  $q_{WW} = 27$  kWh/m<sup>2</sup> ergeben sich daraus Volllaststunden für die Warmwasser-Bereitung von  $h_v^{WW} = q_{WW} \cdot 1.000 / 15 = 1.800$  h/a.

Mit dem Heizenergieverbrauch von ca.  $q_{Hz} = 50$  kWh/m<sup>2</sup> der hier betrachteten Gebäude erhält man mit diesen Daten gewichtete mittlere Volllaststunden von  $h_v = 1.700$  h/a. Die für jedes Gebäude festgestellten  $h_v$ -Werte sollten demnach annähernd in einem Bereich von ca. ± 10 % um diesen Wert liegen, d. h. zwischen 1.500 und 1.900 h/a, wenn die Auslegungs- bzw. Verbrauchswerte plausibel sein sollen. Ergeben sich für ein Gebäude Volllaststunden außerhalb dieses Intervalls, so deutet das auf einen systematischen Fehler hin, dem im Rahmen des Energiecontrollings nachgegangen werden sollte.

Die tatsächlichen Volllaststunden, berechnet aus  $h_v = Q_{NW}/P_{HÜS}$ , mit dem gemessenen Jahreswärmeverbrauch  $Q_{NW}$  2012 und der installierten Leistung  $P_{HÜS}$  entsprechend dem jeweiligen Anschlusswert der Hausübergabestation (Tab. III-1), zeigt Abb. III-9. Demnach liegen 10 der 19 Gebäude (53 %) mit ihren Anschlusswerten im erwarteten Bereich, 6 Gebäude liegen zu hoch, 3 Gebäude zu niedrig.

Bei Gebäuden mit deutlich zu niedrigen Benutzungsstunden dürfte die Leistungseinstellung der Hausübergabestationen zu hoch liegen: Hier wird ein zu hoher Leistungspreis bezahlt. Bei Gebäuden mit einer zu hohen Anzahl an Benutzungsstunden ist entweder die Leistungseinstellung zu knapp, dann könnte die Heizleistung an sehr kalten Tagen nicht ausreichend sein (Mieterbeschwerden!), oder es findet ein höherer als der erwartete Verbrauch an Warm-

wasser oder Heizenergie statt. Dies muss durch das Energiecontrolling überprüft werden, u. a. durch Betrachtung von Sommer- und Wintermonaten, um Heizenergie- und Warmwasser-Verbrauch getrennt analysieren zu können.



**Abb. III-9:** Volllaststunden der Wärmeversorgung 2012, Balken / linke Skala, und Vergleich mit der spezifischen installierten Leistung (W/m<sup>2</sup>) in jedem Gebäude, grüne Linie (jeweils mit Benutzung der Anschlusswerte von Tab. III-2, Spalte ganz rechts); die zehn grün dargestellten Balken liegen innerhalb des erwarteten Intervalls, die gelben Säulen geben deutliche Abweichungen vom erwarteten Intervall an. Die drei teilsanierteren Gebäude ganz rechts hatten 2012 nur eine Heizungsversorgung (Modernisierung mit Warmwasser-Anschluss erfolgte erst 2013/2014) und können daher so nicht verglichen werden.

Somit ergibt sich aus der Gegenüberstellung der Volllastbenutzungsstunden und der spezifischen installierten Leistungen,

- dass die angesetzten Anschlusswerte für drei Gebäude zu hoch (d. h. die Benutzungsstundenzahlen zu niedrig) liegen: die Anschlussleistung sollte auf ca. 45 W/m<sup>2</sup> reduziert werden, wodurch sich dort die Jahreskosten der Wärmeversorgung um ca. 10 % verringern,
- dass in sechs Gebäuden die Anzahl an Benutzungsstunden zu hoch ist und die Ursachen im Rahmen des Energiecontrollings analysiert werden müssen, und
- dass eine routinemäßige Überprüfung der Wärmeverbrauchsablesungen auf Plausibilität, wie oben ausgeführt, jedes Jahr durchgeführt werden sollte, um Ausreißer und Fehlerquellen festzustellen.

## IV Forschungsgebäude

Die Zielsetzung der innovativen Sanierung zweier Forschungsgebäude im Forschungsprojekt Rintheim war es, technische Innovationen in der Sanierungspraxis von zwei Mehrfamilienhäusern – Heilbronner Str. 33-37 und Mannheimer Str. 43-47 – zu erproben und das Verhalten der eingesetzten Systeme messtechnisch zu begleiten und mit den Berechnungsergebnissen von Simulationsmodellen zu vergleichen, die an der RWTH Aachen (Institut E.ON-Energy Research Center) entwickelt werden.

Unter „technischen Innovationen“ wurden hierbei Komponenten verstanden, die bei der Sanierung von Mehrfamilienhäusern heute noch unüblich sind. Das Konzept hierfür wurde von der Abteilung Planen/Bauen der VOLKSWOHNUNG zusammen mit der RWTH als wissenschaftlicher Begleiterin des Projektes und externen Planern (KW2 Ingenieure, Hersteller) entwickelt. Als Ergebnis wurden ein

- „3-Liter-Gebäude“<sup>27</sup> mit Anwendung marktnaher Innovationen (Heilbronner Str. 33-37) und
- ein „Experimentiergebäude“ (Mannheimer Str. 43-47) mit Komponenten, die deutlich über eine konventionelle Sanierung hinausgehen,

konzipiert. Diese beiden Gebäude werden mit einem dritten Gebäude gleichen Typs (Heilbronner Str. 27-31) verglichen, das 2008 nach dem üblichen Standard der VOLKSWOHNUNG saniert wurde (→ Anhang II-1).

Durch die vom BMWi mit 50 % geförderte detaillierte messtechnische Begleitung sollen Simulationsmodelle der RWTH verifiziert bzw. weiterentwickelt werden. Mit praxiserprobten Simulationsmodellen sollen der Planungsaufwand für innovative Systeme der TGA, die meist komplizierter sind als konventionelle Heizsysteme, reduziert werden und eine Systemoptimierung im laufenden Betrieb möglich sein.

Das Messkonzept wurde von der RWTH zusammen mit der Hochschule Karlsruhe (Prof. Klaus Wolfrum) entwickelt. Die Installation der Messtechnik erfolgte ebenfalls durch die Hochschule Karlsruhe bzw., soweit es den Einsatz marktgängiger Messgeräte wie Wärmemengen- und Stromzähler betrifft, durch die ausführenden Installationsfirmen unter der Aufsicht des begleitenden Ingenieurbüros. Die Auswertung der Daten erfolgt über drei unterschiedliche Kanäle:

- (1)** Die Messdaten aus den Wohnungen werden über Datenlogger ausgelesen<sup>28</sup>, in Messcomputern gespeichert und an einen Server der Hochschule Karlsruhe übertragen, von wo aus sie für die Auswertungen der RWTH zur Verfügung stehen.

<sup>27</sup> Ein 3-Liter-Gebäude ist ein Gebäude mit einem Heizenergiebedarf von 30 kWh/m<sup>2</sup> A<sub>N</sub> (entsprechend dem Energieinhalt von 3 Litern Heizöl) – ein in der populärwissenschaftlichen Diskussion oft benutztes Maß für den Heizenergiestandard eines Wohngebäudes.

<sup>28</sup> Die Messwertaufnehmer/Datenlogger wurden von Prof. Klaus Wolfrum, Hochschule Karlsruhe, speziell für diese Messaufgabe entwickelt.

- [2] Die Wärmemengen- und Stromzähler in den Heizzentralen werden auf einem Datenlogger des Energiecontrolling-Dienstleisters Ennovatis GmbH („SmartBox“) ausgelesen. Diese Daten sind für die VOLKSWOHNUNG und RWTH über die Internetseite von Ennovatis zugänglich.
- [3] Die Betriebsdaten der dezentralen „Geniax“-Umwälzpumpen im 3-Liter-Gebäude wurden bis 2012 über ein eigenes System von WILO erfasst und ausgewertet. Diese Daten wurden der RWTH zur Verfügung gestellt.

Während einige dieser Daten von der VOLKSWOHNUNG für Zwecke des Energiecontrollings benutzt werden, erfolgt die eigentliche Auswertung der Messdaten durch die RWTH im Rahmen zweier eigenständiger, ebenfalls vom BMWi geförderter Forschungsprojekte. Diese Auswertung läuft noch und wird Mitte 2015 abgeschlossen sein. Die Ergebnisse werden an-derenorts veröffentlicht und sind nicht Gegenstand der vorliegenden Publikation; hier werden nur die technischen Konzepte der beiden Forschungsgebäude und erste Praxiserfahrungen beschrieben.

Abb. III-2 zeigt die Lage der beiden Forschungsgebäude im Quartier. Sie wurden ebenso wie das Vergleichsgebäude 1955 errichtet, zunächst mit Kohle-Einzelöfen als Heizsystem, die nach dem Gasanschluss des Gebiets Ende der 60er Jahre von den Mietern durch Gasöfen ersetzt wurden. Die Warmwasserversorgung wurde dabei gleichzeitig auf Gasdurchlauferhitzer im Bad umgestellt.



**Abb. IV-1:** Forschungsgebäude, Heilbronner Str. 33-37 vor der Sanierung (links) und Mannheimer Str. 43-47 nach der Sanierung (Fotos: VOLKSWOHNUNG 2008 und 2010)

Abb. IV-1 zeigt Fotos der Forschungsgebäude: Heilbronner Str. 33-37 vor der Sanierung, Mannheimer Str. 43-47 (mit neuen Balkonen und Mietergärten) nach der Sanierung. Diese beiden Gebäude und das in Anhang All-1 im Detail beschriebene Vergleichsgebäude, Heilbronner Str. 27-31, waren vor den Sanierungsmaßnahmen nahezu identisch.

## IV.1 „Standardsanierung“: Vergleichsgebäude

Das Gebäude Heilbronner Str. 27-31 wurde 2008 mit dem energetischen Standard saniert, der bei der VOLKSWOHNUNG seit mehreren Jahren üblich ist. Nach Abschluss der Sanierung im Spätherbst 2008 wurde es als erstes Gebäude an das Nahwärmenetz angeschlossen. Damit steht eine Referenz zur Verfügung, mit der die beiden Forschungsgebäude verglichen werden können.

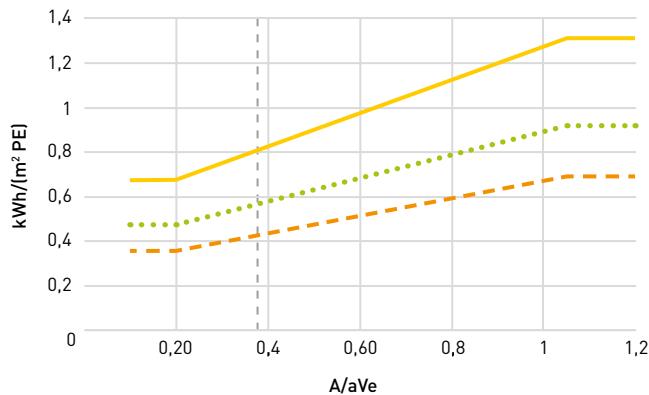
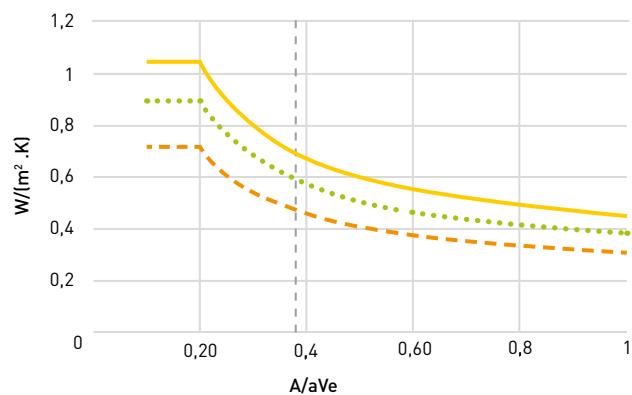
Der Sanierungsstandard ist in diesem Fall so definiert:

- Wärmedämmung Hüllflächen: Außenwand (WDVS) und oberste Geschossdecke: 14 cm EPS, Kellerdecke 8 cm;
- Einbau von Wärmeschutz-Fenstern:  $U_w = 1,30 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ; resultierender  $H_T$ -Wert des Vergleichsgebäudes:  $0,42 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  (vor Sanierung:  $1,61 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ );
- Einbau einer kontrollierten Entlüftung aus Küche/Bad mit feuchtegeregelter Zuluft über die Fensterrahmen der Wohn- bzw. Schlafzimmer;
- zentrale Warmwasser-Bereitstellung in der Hausübergabestation mit Pufferspeichern; horizontale Verteilung zu den anderen beiden Eingängen in den Kellern und von dort über Vertikalstränge zu den Wohnungen; Zirkulationsleitungen (durchgehend in Betrieb);
- Standardheizkörper mit automatischem Thermostatventil sowie elektronischen Heizkostenverteilern an den Heizkörpern;
- Wärmeversorgung durch Nahwärme-Anschluss, Hausübergabestation eingeregelt auf eine Leistung von 80 kWth (38 W pro  $\text{m}^2 \text{ Wfl.}$ ).

Der gemessene (temperaturbereinigte) Heizenergieverbrauch reduzierte sich von 125 auf 45 kWh/ $\text{m}^2$ , hingegen lag der nach EnEV berechnete Heizenergiebedarf bei 190 kWh/ $\text{m}^2$  vor der Sanierung und 41 kWh/ $\text{m}^2$  nach der Sanierung. Hier fällt auf, dass der vor Sanierung gemessene Heizenergieverbrauch viel niedriger liegt als der nach EnEV berechnete Heizenergiebedarf – anders als nach der Sanierung. Hier muss berücksichtigt werden, dass in diesem Gebäude, wie auch in den beiden Forschungsgebäuden, vor der Sanierung nur Einzelheizungen in den Wohnungen vorhanden waren. Es ist anzunehmen, dass Einzelheizungen tendenziell zu einem niedrigeren Heizenergieverbrauch im Vergleich zur komfortablen Zentralheizung führen, da sie eine Teilbeheizung der Wohnräume, verringerte Nutzungszeiten und durchschnittlich niedrigere Raumtemperaturen begünstigen können. Diese Tendenz wird noch verstärkt durch die seit 2006 stark gestiegenen Gaspreise. Dies könnte den Unterschied zwischen Berechnung und Messung teilweise erklären und ist ein Indiz für die Energieeinsparpotenziale durch energiebewusstes Nutzerverhalten.

Um die energetische Qualität der oben beschriebenen „Standardsanierung“ beurteilen zu können, wird diese mit den Anforderungen der zum Planungszeitpunkt geltenden EnEV2007 bzw. mit EnEV2009 und der neuesten EnEV2014 verglichen:

In der EnEV2009 wurde ein „Referenzgebäude“ eingeführt, mit bestimmten Anforderungen an den maximal erlaubten spezifischen Primärenergieverbrauch  $q_p$  des Referenzgebäudes und an die zugelassenen maximalen U-Werte der Hüllflächen. Dies erschwert den Vergleich

**Max. PE-Bed. MFH: Neubau EnEV2007, 2009, 2014****Maximaler mittlerer H<sub>T</sub>-Wert als Funktion von A/V<sub>e</sub>**

eines konkreten Gebäudes mit einem „allgemeinen Wärmeschutz-Standard“, anders als bei der EnEV 07, in der präzise Anforderungen an den spezifischen Primärenergie-Verbrauch  $q_p$  und an den spezifischen Transmissionsverlust  $H_T$ , jeweils als Funktion des  $A_H/V_e$ -Verhältnisses, vorgegeben wurden. Daher erfolgt zum Vergleich eine „Umrechnung“ der EnEV 07-Werte anhand der in EnEV 09 bzw. EnEV 14 angegebenen prozentualen Verschärfungen: Da  $q_p$  nach EnEV 09 etwa 30 % niedriger sein soll als der  $q_p$ -Wert in EnEV 07, wird in Abb. IV-2 (linkes Bild) der EnEV 07-Wert für  $q_p$  um 30 % reduziert, um einen Vergleich mit der EnEV 09 zu ermöglichen.<sup>29</sup> Ebenso wird mit der Verschärfung von  $q_p$  nach EnEV 14 um weitere 25 % (bezogen auf EnEV 09) verfahren, die ab 2016 gelten soll. Die maximal erlaubten Wärmedurchgangszahlen der Hüllflächen  $H_T$  [ $W/(m^2 \cdot K)$ ] werden in Abb. IV-2, rechtes Bild, für EnEV 07, EnEV 09 und EnEV 14 (von oben nach unten) angegeben.

Beim vorliegenden Gebäude dürfte der Primärenergieverbrauch  $q_p$  nach EnEV2009 somit 56 kWh pro  $m^2 A_N$  (EnEV2007: 80 kWh pro  $m^2 A_N$ ) nicht überschreiten, wenn es ein Neubau wäre. Ab 2016 wird dieser Wert durch die neue EnEV2014 weiter reduziert auf dann 42 kWh pro  $m^2 A_N$ . Weiter unten wird gezeigt, dass das Vergleichsgebäude diesen Anforderungen der EnEV2014 an ein neues Gebäude ziemlich genau entspricht.

**Abb. IV-2, links:** Maximaler spezif. Primärenergiebedarf  $q_p$  [ $kWhPE$  pro  $m^2 \cdot A_N$ ] nach EnEV für Wohngebäude (Heizung plus Warmwasser) in Abhängigkeit vom  $A_H/V_e$ -Verhältnis: Neubau nach EnEV2007 (obere Linie, gelb) bzw. minus 30 % (entspricht EnEV2009, mittlere Linie) und minus weitere 25 % (EnEV2014, untere Linie; entspricht EnEV2007 minus 53 %)<sup>30</sup>. Die vertikale gestrichelte Linie gibt den  $A_H/V_e$ -Wert [= 0,38  $m^{-1}$ ] des Gebäudes Heilbronner Str. 27-31 an.

**Abb. IV-2, rechts::** Maximaler  $H_T$ -Wert ( $W$  pro  $m^2 \cdot A_H$  bzw. pro  $K$ ) für neue Wohngebäude in Abhängigkeit vom  $A_H/V_e$ -Verhältnis; von oben: EnEV2007, EnEV2009 (Reduzierung um 15 %), EnEV2014 (Reduzierung um weitere 20 %, d. h. insgesamt um 32 % verglichen mit EnEV2007).

<sup>29</sup> Das Ziel der EnEV 09 war es, die Anforderungen an den Primärenergieverbrauch von neuen Wohngebäuden im Vergleich zur EnEV 07 um 30 % zu verschärfen, u. a. durch Einsatz von thermischer Solarenergie oder durch in der EnEV zugelassene „Ersatzmaßnahmen“.

<sup>30</sup> Die EnEV-Werte sind bezogen auf die Gebäudenutzfläche  $A_N = 0,32 \cdot V_e$ , mit  $V_e$  = äußereres oder beheiztes Gebäudevolumen: Laut EnEV ist  $V_e$  „das Volumen, das von der wärmeübertragenden Umfassungsfläche umschlossen wird“.

Die spezifische Wärmedurchgangszahl des Vergleichsgebäudes nach Sanierung,  $H_T = 0,42 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ , unterschreitet den für neue Gebäude geforderten  $H_T$ -Wert der EnEV 09 um knapp 30 %; die neue EnEV2014 fordert eine Reduzierung dieses  $H_T$ -Wertes um weitere 20 % (ab 2016) auf dann  $H_T \approx 0,48 \text{ W/(m}^2\text{K})^{31}$ , was durch die „Standardsanierung“ immer noch unterschritten wird.

Die real gemessenen Daten über die ersten drei Betriebsjahre dieses Gebäudes ergaben einen temperaturbereinigten jährlichen Heizenergieverbrauch von  $q_{Hz} = 45 \text{ kWh/m}^2$  und einen in den 30 Wohnungen gemessenen mittleren Warmwasser-Verbrauch von  $q_{WW} = 14,3 \text{ kWhth/m}^2$ . Ferner wurden Verluste bei der Wärmeverteilung im Gebäude von 9 bzw.  $3 \text{ kWh/m}^2$  für Warmwasser bzw. Heizung, also  $q_{Verl} = 12 \text{ kWh/m}^2$ , berechnet<sup>32</sup> (→ Anhang AII-2).

Der resultierende Wert für  $q_p$ , hier Primärenergie-Kennzahl  $pe$  (kWhPE pro  $\text{m}^2$  Wfl.) genannt, ergibt sich aus

$$pe = (q_{Hz} + q_{WW}) \cdot e_p \cdot f_{PE},$$

wobei die Aufwandszahl  $e_p$  ( $\text{kWhEE/kWhth}$ ) – zunächst ohne Hilfsstrom – aus

$$e_p = \frac{e_{EE}}{q_{Hz} + q_{WW}},$$

berechnet wird:  $e_{EE}$  ist der Einsatz an Endenergie ( $\text{kWhEE/kWhth}$ ), in diesem Fall Nutzwärme aus dem Nahwärmenetz, entweder gemessen oder berechnet aus

$$e_{EE} = \frac{(q_{Hz} + q_{WW} + q_{Verl})}{\eta_{HÜS}},$$

mit einem angesetzten Wirkungsgrad der Hausübergabestation von  $\eta_{HÜS} = 0,96$ . Mit den oben angegebenen Werten und dem Primärenergiefaktor der Nahwärme in Rintheim,  $f_{PE} = 0,48 \text{ kWhPE/kWhth}$  (→ Anhang AI-2), wird  $e_p = 1,24 \text{ kWhEE/kWhth}$  und  $pe = 38,2 \text{ kWhPE/m}^2$ .

Der Hilfsstromverbrauch im Vergleichsgebäude liegt bei  $0,65 + 1,25 = 1,90 \text{ kWhel/m}^2$  für Heizung und kontrollierte Lüftung, entsprechend einem Primärenergie-Verbrauch von  $1,90 \cdot 2,50 = 5,13 \text{ kWhPE/m}^2$ , die zum oben angegebenen Wert für  $pe$  hinzugezählt werden müssen. Daraus ergibt sich eine gemessene bzw. aus den Messungen berechnete Gesamt-Primärenergiekennzahl der „Standardsanierung“ von  $pe = 43 \text{ kWhPE pro m}^2 \text{ Wfl.}$  oder  $q_{P-neu} = 41,5 \text{ kWhPE pro m}^2 \text{ A}_N$ .

Die EnEV 09-Anforderung an neue Gebäude ( $57 \text{ kWhPE/m}^2 \text{ A}_N$ ) wird somit um 27 % unterschritten; die neue EnEV 14 fordert ab 2016 eine Verschärfung der EnEV 09 um weitere 25 % auf  $42,8 \text{ kWhPE/m}^2 \text{ A}_N$ . Dieser Wert wird ebenfalls unterschritten.

<sup>31</sup> Siehe zur ENEV2014 u. a. [www.bau-energieportal.de](http://www.bau-energieportal.de).

<sup>32</sup> Unter plausiblen Annahmen für die Medium- und Umgebungstemperaturen; diese Verteilungsverluste tragen zum Teil zur Beheizung des Gebäudes bei. Sie werden in der Aufwandszahl  $e_p$  berücksichtigt.

Da es sich um eine Sanierung handelt, könnte auch ein Faktor

$$q_{p-San} = q_{p-neu} \times 1,4 \cdot 0,9$$

angesetzt werden – der Faktor 0,9 resultiert aus der Anforderung des EEWärmeG Baden-Württemberg, in dem für sanierte Bestandsgebäude ein Einsatz von 10 % des Wärmebedarfs in Form von erneuerbarer Energie gefordert wird.<sup>33</sup> Daraus ergäbe sich eine Primärenergie-Anforderung der EnEV 14 an sanierte Bestandsgebäude von rund 53 kWhPE/m<sup>2</sup>, die durch die „Standardsanierung“ des Vergleichsgebäudes plus Nahwärme um über 20 % unterschritten wird.

Mit einer konventionellen Gas-Heizzentrale ( $h_{Gas} = 0,88$ ) würde sich hingegen mit den o. g. Messdaten ein Wert von  $pe \sim 100$  kWh/m<sup>2</sup> ergeben, der demnach weder dem EnEV2009 – Grenzwert für Neubauten noch der Vorgabe für sanierte Bestandsgebäude entspräche. Ohne die energetisch vorteilhafte Nahwärme müssten daher mit erweitertem Wärmeschutz, Passivhaus-Fenstern, Lüftung mit Wärmerückgewinnung und/oder einer Solaranlage bzw. Wärmepumpen, Mikro-BHKW, Biomasse o. dgl. Verbesserungen erreicht werden, um die Vorgaben der EnEV einzuhalten. Dies würde zu erheblichen Sanierungs-Mehrkosten führen.

## IV.2 Forschungsansatz für die beiden Forschungsgebäude

Die beiden Forschungsgebäude sollten mit Maßnahmen saniert werden, die in der energetischen Wirkung über die Standardsanierung des Referenzgebäudes hinausgehen und die Erprobung „marktnaher“ technischer Innovationen im Bereich der Bestandssanierung ermöglichen. Beide Gebäude haben je drei Eingänge mit jeweils zehn gleichen, insgesamt also 60 Wohnungen, die für verschiedene technische Varianten genutzt werden konnten.

Zwei Ansätze wurden mit den beiden Forschungsgebäuden verfolgt: Für das „3-Liter-Gebäude“ an der Heilbronner Straße (mit den Eingängen HB 33, HB 35 und HB 37) sollte der als „Standard“ festgelegte Sanierungsansatz des Vergleichsgebäudes durch „am Markt“ verfügbare neue Materialien bzw. Techniken erweitert werden. Beim „Experimentiergebäude“ in der Mannheimer Straße (mit den Eingängen MA 43, MA 45 und MA 47) wurden Komponenten verwendet, die zur Sanierung von Mehrfamilienhäusern heute normalerweise noch nicht eingesetzt werden, z. B. Vakuumdämmung oder diverse „LowEx“<sup>34</sup>-Techniken.

Die Beurteilung einzelner Komponenten eines Systems ist dadurch erschwert, dass diese sich gegenseitig beeinflussen. Daher soll durch das begleitende Messprogramm versucht werden, die energetischen Auswirkungen der realisierten Komponenten einzelnen Maßnah-

<sup>33</sup> Die Landesregierung hat für 2015 eine Novelle zur Erhöhung dieses Anteils für Bestandsgebäude auf 15 % vorgelegt.

<sup>34</sup> Mit „LowEx“ ist Low Energy gemeint, auf Deutsch Niedrig-Energie: Techniken, bei denen mit Nutztemperaturen (Heizung, Kühlung) operiert wird, die möglichst nahe an der Umgebungstemperatur liegen.

men zuzuordnen. Mit den Messdaten soll auch ein an der RWTH Aachen mit der Programmiersprache „Modelica“ entwickeltes Gebäudesimulationsmodell validiert werden, mit dem die einzelnen Maßnahmen vertieft untersucht werden können.<sup>35</sup>

Durch die detaillierten Messdaten zum zeitlichen Verhalten einzelner Komponenten können die Bausteine bzw. Parameter des Simulationsmodells so angepasst werden, dass das Verhalten der Komponenten mit den Ergebnissen der Simulation verglichen werden kann. Ziel ist es, mit diesem validierten Modell Maßnahmenkombinationen alleine durch Simulation untersuchen zu können, ohne sie tatsächlich realisieren zu müssen. Dies wird einen wichtigen und kostensparenden Fortschritt sowohl der Komponentenentwicklung als auch der Systemoptimierung ermöglichen und gehört zum begleitenden Forschungsprojekt der RWTH Aachen.

### IV.3 „3-Liter-Gebäude“: Heilbronner Straße 33-37

Im „3-Liter-Gebäude“, dessen Sanierung im Juni 2010 abgeschlossen wurde, wurden RESOL-Hartschaum-Isolierelemente für die Außenwände (16 cm Dicke) mit verbessertem Wärmeleitkoeffizienten eingesetzt: Dieser liegt mit  $l = 0,022 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  um fast 40 % niedriger als der derzeitige, bereits sehr gute Wert für EPS-Dämmungen ( $l = 0,035 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ), die an der Kellerdecke (8 cm) bzw. im obersten Dachgeschoss (16 cm) eingesetzt wurden. Die Kosten für RESOL liegen, bezogen auf gleichen U-Wert, um etwa 20 % höher als die Kosten der derzeit in Wärmedämmverbundsystemen üblicherweise eingesetzten EPS-Platten (→ Anhang All-1).

Als Fenster wurden in diesem Gebäude z. T. Passivhaus-Fenster ( $U_w = 0,8 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ , ohne Passivhaus-Zertifizierung), z. T. konventionelle Kunststoffrahmenfenster mit 2-Scheiben-Wärmeschutzverglasung ( $U_w = 1,3 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ), eingesetzt. Die Fenster wurden mit Außenjalousien ausgestattet, mit denen das Tageslicht aus dem oberen Teil der Jalousien auf die Zimmerdecke umgelenkt werden kann, um Blend-Effekte zu vermeiden und die Notwendigkeit künstlicher Beleuchtung zu reduzieren.

Im Eingang HB 37 wurden ferner die Zimmerdecken (Wohn-, Schlaf- und Kinderzimmer) mit PCM-Platten versehen, um die thermische Trägheit bzw. die Behaglichkeit an heißen Sommertagen zu erhöhen.

In den Wohnungen der HB 33 wird ein dezentrales Lüftungssystem (SCHÜCO KG) mit Wärmerückgewinnung erprobt; in den beiden anderen Eingängen kommt eine konventionelle kontrollierte bzw. feuchtegeregelte Entlüftung mit Zuluft-Elementen in den Fensterrahmen zum Einsatz.

---

<sup>35</sup> Die Messdaten sollen nach Abschluss des Vorhabens der RWTH nach einem noch zu definierenden Verfahren durch den Projektträger, PtJ, anderen Forschungseinrichtungen für weitere Analysen zur Verfügung gestellt werden.

Die zehn Wohnungen im Haus HB 33 erhielten dezentrale „Wohnungs-Frischwasserstationen“, bei denen das Warmwasser nach Bedarf in jeder Wohnung über einen Durchlauferhitzer ( $45^{\circ}\text{C}$  Zapf-Temperatur) erzeugt wird, um die Energieverluste der Wärmeverteil-Leitungen zu reduzieren. Die beiden anderen Eingänge wurden mit einer konventionellen (zentralen) Trinkwarmwassererwärmung mit Pufferspeicher (750 Liter Schichtspeicher für Heizung und Warmwasser) ausgestattet. In der HB 37 wurden darüber hinaus  $27\text{ m}^2$  Röhren-Solarkollektoren (Firma Paradigma, System „Aqua“) installiert, mit einem erwarteten Solarertrag von  $400\text{ kWh}$  pro  $\text{m}^2$  Kollektorfläche.

In HB 33 und HB 35 sind konventionelle Heizkörper verschiedener Fabrikate installiert, deren Verhalten im Rahmen des Messprogramms von der RWTH getrennt untersucht wird. In den zehn Wohnungen von Eingang HB 37 liegen Fußbodenheizungen zweier verschiedener Fabrikate. Die Heizkörper in der HB 33 bzw. HB 35 sowie die Fußbodenheizung in zwei Wohnungen der HB 37 werden mit insgesamt 120 dezentralen Heizungspumpen („Geniax“, Fa. WILO) betrieben, die den Mietern auch eine programmierbare Einzelraumregelung ermöglichen.

#### IV.4 „Experimentiergebäude“: Mannheimer Straße 43-47

Beim „Experimentiergebäude“ wurden neue Wege beschritten. Als einziges Gebäude im Rintheimer Feld wurde es nicht an die Nahwärme angeschlossen, sondern deckt seinen Bedarf mithilfe elektrischer Wärmepumpen, die Wärme aus  $\text{CO}_2$ -Erdsonden bzw. der Luft (Außenluft, Abluft) gewinnen. In die Außenwand wurden Vakuum-Verbunddämmplatten der Firma Variotec mit einer Dicke von 8 cm eingebaut, wobei die eigentliche Vakumschicht 4 cm dick ist. Dieses Element hat laut Herstellerangaben eine effektive Wärmeleitfähigkeit von  $\lambda = 0,11\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$  bezogen auf die Gesamtdicke, d. h. Vakumschicht plus Schutzkassette.<sup>36</sup> Im Eingang MA 47 wurden 2-Scheiben-Kunststofffenster eingebaut ( $U_w = 1,3\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ), sonst 3-Scheiben-Passivhaus-Fenster ohne Zertifizierung ( $U_w = 0,8\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ); Kellerdecke und oberste Geschossdecke wie beim „3-Liter-Gebäude“.

Aufgrund von Genehmigungsproblemen für erdgekoppelte Wärmepumpen am Standort wurden für 2 der 3 Eingänge  $\text{CO}_2$ -Erdsonden gewählt:

- eine Erdsonden-Wärmepumpe für den Eingang MA 43 (Leistung 6,33 kWel, entsprechend 9 Wel pro  $\text{m}^2$  Wfl., rechnerische Heizleistung bei einer vom Hersteller angegebenen Leistungszahl  $e = 4,5$ : ca. 28,5 kWth bzw. 40 Wth pro  $\text{m}^2$  Wfl.,
- zwei Erdsonden-Wärmepumpen-Module für den Eingang MA 45 mit  $2 \times 2,85\text{ kWel}$ .

Für den Eingang MA 47 wurde eine Wärmepumpe mit Außenluft als Wärmequelle, Nennleistung 9,6 kWel bzw. ca. 30 kWth, installiert, ergänzt durch eine Abluft-Wärmepumpe zur

<sup>36</sup> Der effektive  $\lambda$ -Wert ist demnach um einen Faktor von ca. 3 besser als der von PS. Die hier gewählte Dicke der VIP-Elemente entspricht demnach einer Dicke der konventionellen Wärmedämmung von ca. 25 cm.

Erzeugung von Warmwasser aus der zentralen Abluftanlage (1 kWel, Nenn-Wärmeleistung laut Hersteller 4 kWth).

Die Abluft-Wärmepumpe ist ein Gerät der Firma Lufttechnik Schmeißer, Berlin; die anderen vier Wärmepumpen-Module stammen von der Firma Heliotherm, Kufstein.

Die beiden Erdsonden-Wärmepumpen in MA 43 und MA 45 arbeiten mit jeweils sechs CO<sub>2</sub>-Erdsonden-Heat-Pipes mit je 100 m Länge (Dampfdruck ca. 30 bis 45 bar, je nach Temperatur; Auslegung und Befüllungsdruck nach „System Mittermayer“<sup>37</sup>). Der Vorteil der CO<sub>2</sub>-Erdsonden liegt darin, dass hier der Wärmeübergang effizienter ist als bei konventionellen Erdsonden, üblicherweise Kunststoff-U-Rohre, die mit einem Wasser/Glykol-Gemisch als Medium gefüllt sind. Das CO<sub>2</sub>-Wärmerohr arbeitet dagegen mit einem 2-Phasen-Gemisch flüssig/dampfförmig<sup>38</sup>, die Wärmeübertragung verläuft darin sowohl bei der Verdampfung in den Sonden als auch bei der Kondensation des CO<sub>2</sub> im Wärmepumpenverdampfer effizienter<sup>39</sup>. Außerdem ist für den CO<sub>2</sub>-Transport keine Pumpe erforderlich. Nachteile sind die höheren Materialkosten (hier: Kupferrohre) und die Tatsache, dass die Umkehrung des Erdsondenbetriebs auf Kältelieferung im Sommer nicht möglich ist, anders als bei der Luft/Wasser-Wärmepumpe in der MA 47, wo die Möglichkeit der Kühlung der dort installierten Deckenheizung im Sommer grundsätzlich besteht (aber bisher nicht umgesetzt wurde).

Im Gebäude Mannheimer Str. 43-47 wurden im Hinblick auf die hier eingesetzten Wärmepumpen „LowEx“-Systeme, also Systeme, die mit niedriger Temperatur auskommen, installiert: Großflächenheizungen (Fußbodenheizung und Lüftung mit dezentraler Wärmerückgewinnung in MA 43, Deckenheizung in MA 47) und, in Analogie zum Passivhaus-Ansatz, ein reines Luftheizungssystem mit zentraler Wärmerückgewinnung in MA 45. Ferner wurden in allen drei Eingängen dezentrale „Frischwasserstationen“ in jeder Wohnung installiert. Hierfür ist eine durchgehende Beschickung aller 30 Wohnungen mit Heißwasser von 47 bis 50 °C erforderlich, um dem Nutzer nach dem Durchlauferhitzer eine Zapftemperatur von ca. 45 °C liefern zu können.

Ursprünglich war geplant, Deckenheizungen der Hersteller KLINA und Joco parallel zu erproben. Da die Kunststoff-Kapillarröhren von KLINA jedoch nicht über eine Dampfbremse verfügen, hat sich der Einbau eines Mischnsystems als zu kostspielig herausgestellt, weil dadurch ein weiterer Wärmetauscher zwischengeschaltet werden müsste. Dieser reduziert das Heiztemperaturniveau und erfordert dadurch eine größere Heizfläche, die nicht in allen Räu-

<sup>37</sup> [www.m-tec.at](http://www.m-tec.at)

<sup>38</sup> Dem CO<sub>2</sub>-Dampf wird von der Wärmepumpe Wärme entzogen; dadurch wird er verflüssigt. In dieser Form fließt das CO<sub>2</sub> durch die Schwerkraft zurück in die Sonden und strömt nach unten. Dabei nimmt es über die Sonnenwand Wärme aus dem umgebenden Erdreich auf und verdampft. Der Dampf steigt durch den Unterdruck im Wärmetauscher der Wärmepumpe wieder nach oben.

<sup>39</sup> Durch den besseren Wärmeübergang wird eine geringere Grädigkeit und damit eine höhere Verdampfungstemperatur und dadurch eine bessere Leistungszahl erreicht.

men zur Verfügung steht, weshalb zusätzliche Heizkörper erforderlich wären. Somit würden sich durch den Einsatz von KLINA-Kapillarrohrmatten sowohl hinsichtlich der Kosten als auch hinsichtlich der Exergieverluste deutliche Nachteile ergeben. Aus diesem Grund wurde sowohl in der MA 43 als auch in der MA 47 eine „Joco-Klimaboden-Heizung“ eingesetzt, im letzteren Fall als Deckenheizung.

Im „Experimentiergebäude“ werden in den drei Hauseingängen drei Arten von Wärmerückgewinnungsanlagen für die Fortluft eingesetzt (alle mit Systemen von Lufttechnik Schmeißer, Berlin):

- (1) MA 43: Ein dezentrales System, bei dem mit möglichst gutem Rückgewinnungsgrad des Abluft/Zuluft-Wärmetauschers im Flur jeder Wohnung vorgewärmte Luft zugeführt wird. Durch möglichst kurze Leitungslängen und optimierte Querschnitte soll der Ventilator-Strombedarf minimiert werden. Die Grundheizung der Wohnräume erfolgt durch die bereits erwähnte JOCO-NT-Fußbodenheizung.
- (2) MA 45: Ein reines Luftheizungssystem mit zentralem Gerät zur Wärmerückgewinnung im Dachraum. Um hier eine ausreichende Wärmezufuhr an kalten Tagen zu ermöglichen, ist ein wesentlich größerer Zuluft-Volumenstrom erforderlich als bei (1). Ferner muss – je nach Außentemperatur – die zugeführte Luft aus Heizregistern in den Wohnungsfluren nachgeheizt werden, die aus der Heizzentrale mit Wärme versorgt werden. Auch hier wird der Ventilator-Strombedarf durch eine geeignete Regelung minimiert.
- (3) MA 47: Nutzung der Abluft aus allen zehn Wohnungen zur Erwärmung des Warmwassers: Durch den Wärmetauscher in der Abluft-Wärmepumpe in der Heizzentrale wird der aus den Wohnungen abgeföhrten Abluft (ca. 22 °C; Grädigkeit ca. 10 K) Wärme entzogen, die zur Bereitstellung von Warmwasser und – der ursprünglichen Planung entsprechend – auch zur Einspeisung in den Heizungspufferspeicher (850 Liter) genutzt wird.

Die Bereitstellung von Trinkwarmwasser erfolgt ebenfalls durch die Wärmepumpen, die in jedem der drei Eingänge je zwei Pufferspeicher mit je 850 Litern mit der erforderlichen Temperatur (ca. 50 °C) „laden“. Von dort werden die dezentralen Durchfluss-Wassererwärmer in den Wohnungen („Frischwasserstationen“) versorgt. Dadurch kann die für die Wärmepumpen-Arbeitszahl wichtige Kondensationstemperatur niedrig gehalten werden, ohne dass Legionellenprobleme auftreten.

Für die Frischwasserstationen werden zwei verschiedene Produkte eingesetzt, um den Nutzungsgrad verschiedener Anlagen und Betriebsweisen prüfen zu können: F+G/Samson und VARIO fresh nova (Firma Variotec). Hier war die Frage, ob der höhere Aufwand an Strom für die Wasserumwälzung durch verringerte Verteilungsverluste und eine bessere Wärmepumpen-Leistungszahl energetisch kompensiert werden kann.

## IV.5 Rechnerische Energiekennzahlen für das Experimentiergebäude

Das „Experimentiergebäude“ deckt seinen Wärmeenergiebedarf ausschließlich mit Strom als Endenergeträger. Das Ziel war u. a., in der Praxis zu klären, ob die energetischen Ziele auch mit rein strombasierten Systemen, also Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung und elektrischen Wärmepumpen, zu Kosten erreicht werden können, die mit der Nahwärme vergleichbar sind.

Eine Wärmepumpe mit der Leistungs- bzw. Arbeitszahl  $\epsilon$  benötigt zur Erzeugung einer Wärmemenge  $Q$  den Stromaufwand  $E = Q/\epsilon$ . Daraus ergibt sich der Primärenergiebedarf  $PE = E \cdot f_{el} = Q \cdot f_{el}/\epsilon$  (kWhPE) oder der spezifische Primärenergiebedarf zur Erzeugung einer kWh an Nutzwärme,  $pe = f_{el}/\epsilon$  (kWhPE/kWhth)<sup>40</sup> und daraus für gute Leistungszahlen der Wärmepumpe  $pe$ -Werte, die nur wenig schlechter sind als der spezifische Primärenergie-Aufwand von KWK-Anlagen einschließlich Spaltenkessel.

Bei einer gut funktionierenden Lüftung mit Wärmerückgewinnung ist der Primärenergie-Aufwand – durch den Antriebsstrom für den Ventilator – für die zurückgewonnene Wärme noch günstiger. Das technische Konzept des Experimentiergebäudes ist demnach im Hinblick auf die energetischen Ziele ein interessanter Ansatz für neue einzeln stehende Gebäude, die nicht zentral versorgt werden können.

Die Auswertung der realen Betriebserfahrungen und der Betriebsoptimierung des Experimentiergebäudes sind noch nicht abgeschlossen, daher können hier nur vorläufige Teil-Ergebnisse vorgelegt werden, etwa die Energiebilanz der Wärmepumpen:

Die (momentane) Leistungszahl  $\epsilon$  einer Elektro-Wärmepumpe ergibt sich rechnerisch aus

$$(IV-1) \quad \epsilon = \frac{T_K}{T_K - T_v} \cdot \eta_{WP}$$

mit

$T_K$  ... Kondensationstemperatur (in K)

$T_v$  ... Verdampfungstemperatur (in K)

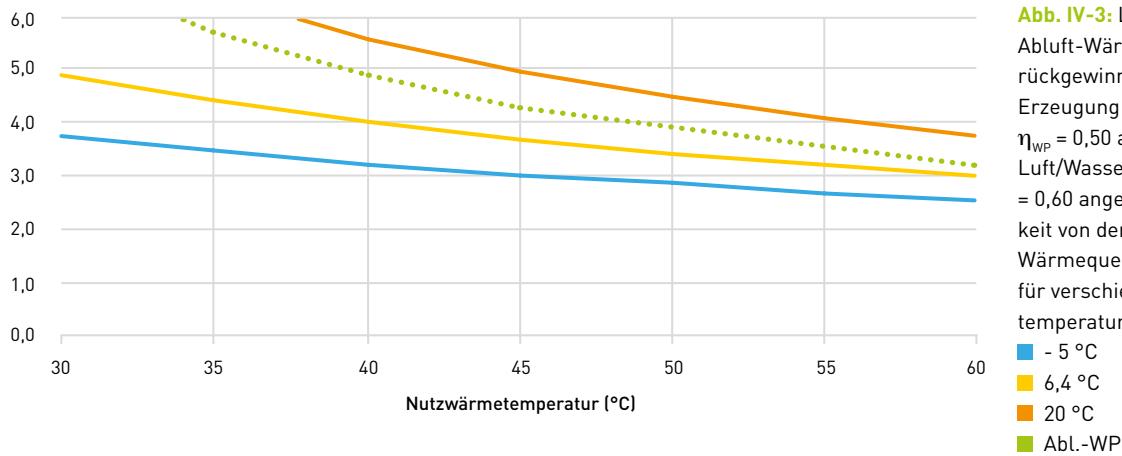
$\eta_{WP}$  ... Gütegrad der Wärmepumpe (i. A. im Bereich von 0,50 bis 0,60).

Bei der Nutzung dieser Formel ist zu berücksichtigen, dass zwischen Heiztemperatur und Kondensationstemperatur sowie zwischen Verdampfungstemperatur und Wärmequellen-temperatur eine „Grädigkeit“ besteht, die für den Wärmeübergang Wasser/Wasser (im Wärmetauscher) bei 4 bis 5 K liegt, für Luft/Wasser hingegen bei 8 bis 12 K.

<sup>40</sup> Die zugehörigen Primärenergie- bzw.  $CO_2$ -Faktoren der Wärmepumpe (Stand 2011) bei einer Leistungszahl von z. B.  $\epsilon = 3,80$  sind  $pe = 1/\epsilon \cdot f_{el} = 1/3,80 \cdot 2,70 = 0,71$  kWhPE/kWhth bzw.  $f_{CO2_WP} = 1/\epsilon \cdot f_{CO2_el} = 1/3,80 \cdot 0,559 = 0,15$  t  $CO_2$ /MWhth (→ Anhang A1-1).

Die bisherigen Erfahrungen mit den Wärmepumpen im Experimentiergebäude deuten darauf hin, dass die größeren Anlagen von Heliotherm (6 bis 10 kWel) einen Gütegrad im Bereich von  $\eta_{WP} \approx 0,60$  erreichen. Für die Wärmepumpe von Schmeißer (1 kWel), sofern sie bisher beurteilt werden kann, liegt  $\eta_{WP}$  eher zwischen 0,40 und 0,50. Mit diesen Daten wurde das folgende Diagramm erstellt, aus dem die zu erwartenden Leistungszahl für unterschiedliche Betriebszustände abgelesen werden kann:

**Leistungszahl Luft/Wasser WP als Funktion von  $t_{Hz}$**



**Abb. IV-3:** Leistungszahl für die Abluft-Wärmepumpe (Wärmerückgewinnung aus Abluft zur Erzeugung von Warmwasser,  $\eta_{WP} = 0,50$  angesetzt) bzw. die Luft/Wasser-Wärmepumpe  $\eta_{WP} = 0,60$  angesetzt) in Abhängigkeit von der Temperatur der Wärmequelle (siehe Legende) für verschiedene Nutzwärmetemperaturen

- -5 °C
- 6,4 °C
- 20 °C
- Abl.-WP

Die Abluft-Wärmepumpe dient hauptsächlich zur ganzjährigen Erzeugung von Warmwasser, d. h. sie muss eine Nutztemperatur von 50 °C bereitstellen: die Kondensationstemperatur beträgt ca. 54 °C. Die gemessene Ablufttemperatur beträgt im Mittel 21,5 °C, was bei einer Grädigkeit von 10 K eine Verdampfertemperatur von 11,5 °C ergibt. Abb. IV-3 ergibt somit für die Abluft-Wärmepumpe eine zu erwartende Leistungszahl von  $e = 3,6$ .

Die gelbe Linie in Abb. IV-3 zeigt die Leistungszahl der Luft/Wasser-Wärmepumpe bei einer mittleren Außentemperatur in Karlsruhe während der Heizperiode von 6,4 °C. Bei einer mittleren Heiztemperatur von 40–45 °C müsste demnach eine Leistungszahl von  $e \approx 3,8$  erreichbar sein, im Falle der Erdsonden (Durchschnittstemperatur der Wärmequelle ebenfalls ca. 6,5 °C, aber geringere Grädigkeit auf der Verdampferseite) sogar  $e \approx 4,0$  während der Heizperiode bzw.  $e \approx 3,6$  zur Warmwasser-Bereitung, wenn die Anlagen optimal betrieben werden.

Welche Primärenergiekennzahl der Wärmeversorgung der Gebäude ist mit dieser Technik zu erwarten? Für ein wirtschaftlich saniertes Gebäude, mit  $q_{Hz} \approx 42 \text{ kWh/m}^2$  (→ Anhang All-1), muss eine Nutzwärme von  $q_{th} = q_{Hz} + q_{WW} + q_{verl} = 70 \text{ kWh/m}^2$  erzeugt werden. Mit  $e = 3,80$  erhält man – ohne Berücksichtigung des Hilfsstromaufwandes –  $pe = q_{th} \cdot f_{el} / e = 52 \text{ kWhPE/m}^2$ .

Damit unterbietet man die EnEV 09 für neue Gebäude ( $q_p = 56 \text{ kWhPE/m}^2$ ), aber nicht die EnEV 2014 ab 2016:  $q_p = 43 \text{ kWhPE/m}^2$ . Für ein neues Gebäude müssten daher weitergehende Maßnahmen ergriffen werden, z. B. Lüftung mit Wärmerückgewinnung, die den Aufwand für die Beheizung weiter reduziert (und Mehrkosten erfordert).

Für die Berechnung der Primärenergie-Kennzahl nach der in Anhang A1-3 beschriebenen Methode erhält man, unter Annahme eines Strombedarfs für die Lüftung (Abluft) von  $e_{Lü} = 1,2 \text{ kWhel/m}^2$ , für den Zuluft-Bereich von  $e_{Lü\_WRG} = 1,5 \text{ kWhel/m}^2$  (WRG-Grad 80 %; optimistische Annahme) sowie eines Hilfsstrombedarfs für die Wärmeverteilung von  $e_H \approx 0,012 \text{ kWhel/kWhth}$  bzw.  $f_{el} = 2,70 \text{ kWhPE/kWhel}$ , folgenden Wert:

$$pe = [q_{th} - 14] \cdot (1/e + e_H) \cdot f_{el} + [e_{Lü} + e_{Lü\_WRG}] \cdot f_{el} = 48,6 \text{ kWhPE/m}^2 \text{ (bzw. } 9,4 \text{ kg CO}_2\text{-Äquiv./m}^2\text{)}$$

(unter der Annahme, dass die Wärmerückgewinnung aus der Abluft den Heizenergiebedarf um 14 kWhth/m<sup>2</sup> reduziert). Die EnEV2014-Vorgabe für neue Gebäude würde mit der „Standardsanierung“ somit noch knapp verfehlt. Schlechtere Anlagenwerte, z. B.  $e = 3,5$  und  $e_{Lü\_WRG} = 2,5 \text{ kWhel/m}^2$ , würden die Primärenergie-Kennzahl um ca. 10 % verschlechtern.

Mit den Daten des Experimentiergebäudes (erhöhter Wärmeschutz, Passivhaus-Fenster) würden sich 42,2 kWhPE/m<sup>2</sup> (bzw. 8,2 kg CO<sub>2</sub>-Äquiv./m<sup>2</sup>) ergeben, d. h. hier würden die Vorgaben der EnEV2014 unterboten – einen effizienten Betrieb der Wärmepumpen- bzw. Lüftungsanlagen vorausgesetzt.

Die Schlussfolgerung für das untersuchte Gebäude ist, dass bei Installation einer Lüftung mit Wärmerückgewinnung und einer Nutzwärmebereitstellung mit Elektro-Wärmepumpe bei wirtschaftlich optimierter Wärmedämmung (→ Anhang A11-1) und zusätzlich entweder

- erhöhter Dämmung (im Vergleich zu den wirtschaftlich optimalen Dämmstärken),
- oder Passivhaus-Fenstern,
- oder Solarkollektoren zur Warmwasserbereitung,

die Vorgaben der neuen EnEV2014 für ein neues Gebäude gerade eingehalten werden können, wenn die Anlagen energetisch optimal geplant und betrieben werden (wobei von diesen drei Optionen i. A. Passivhaus-Fenster zu favorisieren wären). Damit sind für (neue) Einzelgebäude mit sehr guter Anlagentechnik und erhöhtem Wärmeschutz ähnliche Primärenergie-Kennzahlen erreichbar wie für das Gebäude mit „Standardsanierung“ in einem Quartier mit sehr energieeffizienter Zentralversorgung, im letzteren Fall jedoch zu wesentlich geringeren Kosten<sup>41</sup>.

<sup>41</sup> Hinsichtlich Angaben zu Kosten und Wirtschaftlichkeit siehe Anhang A11-1.

## IV.6 Messtechnische Begleitung und Evaluierung: Stand 2013

Auf Wunsch der RWTH Aachen wurden die Forschungsgebäude sehr umfangreich mit Messtechnik ausgestattet, um das Verhalten der verschiedenen installierten Techniken im Detail analysieren und Erkenntnisse über Betriebsverhalten und Optimierungsmöglichkeiten sammeln zu können, insbesondere im Vergleich von Planung und Betrieb. Dies sollte – neben der Validierung der an der RWTH entwickelten Simulationsprogramme – auch eine Rückkopplung mit den Herstellern hinsichtlich notwendiger Verbesserungen ermöglichen. Und schließlich sollten auch Aussagen zur Wirtschaftlichkeit der einzelnen Komponenten und der eingesetzten Systeme insgesamt möglich sein, die für Planer bzw. Investoren wichtig sind.

Das von der Hochschule Karlsruhe gemeinsam mit der RWTH konzipierte Messsystem hatte, einschließlich der konventionellen Messtechnik, ein Kostenvolumen von ca. 950.000 €, das mit 50 % im Rahmen der EnEff:Stadt-Initiative gefördert wurde. Die Installation der Messsysteme und Betriebsbetreuung erfolgte – abgesehen von den konventionellen Energiezählern – durch die Hochschule Karlsruhe. Wegen der zeitlichen Verzögerungen bei der Inbetriebnahme verschiedener Systeme sowie wegen des großen Zeitaufwandes für die Anlagenoptimierung wurde der Zeitrahmen für die messtechnische Begleitung bzw. Auswertung durch die RWTH vom PtJ bis zum Sommer 2015 verlängert, sodass erst dann detaillierte Ergebnisse der Datenauswertung verfügbar sein werden.<sup>42</sup>

Folgende Ergebnisse der messtechnischen Begleitung bzw. Evaluierung werden von der VOLKSWOHNUNG erhofft:

- Vergleich zwischen Planungsdaten und praktischem Betrieb der installierten Systeme sowie Rückschlüsse auf die Anlagenwirtschaftlichkeit
- Energiebilanzen und energetische Kennzahlen der Teilsysteme (Wärmepumpen, Hausübergabestation, Solaranlage, Heizzentrale, Wärmerückgewinnung, Verteilungsverluste, Wohnungs-Übergabe): Leistungs- und Arbeitszahlen, Wirkungsgrade, Solarerträge, Rückwärmzahlen, Hilfsstromaufwand, Wärmeverluste, Betriebskosten
- Erkenntnisse über das Regelungsverhalten des Gesamtsystems und der Teilsysteme (Wärmepumpen, Pufferspeicher, drehzahlgeregelte Umwälzpumpen, Warmwasser-Versorgung / dezentrale Frischwasserstationen, Wärmeübergabe-Systeme (Heizkörper, Fußboden-, Decken- und Luftheizung) mit verschiedenen Regelungsphilosophien („Geniax“, konventionell)
- Entwicklung der Wärmekapazität der Erdsonden über mehrere Jahre
- Möglichkeiten der Systemoptimierung unter Einsatz von Simulationsmodellen
- Nutzeranalysen: Vergleich von Normverbrauchswerten bzw. Planungswerten mit gemessenen Verbräuchen (Heizung und Warmwasser)

<sup>42</sup> Forschungsprojekte der RWTH Aachen: „Quartierskonzept Energieeffizientes Rintheim – wissenschaftliche Begleitung“, FKZ 03Z7600G, und „Auswirkungen des Rebound-Effektes bei der Sanierung von Bestandsgebäuden“, FKZ 03ET1105A.

- Nutzerakzeptanz (Lüftungsanlagen, Flächenheizungen, Regelungssysteme) und Nutzer-Beeinflussbarkeit
- Rebound-Effekte

Die gesammelten Messdaten haben einen Umfang, der bisher für Gebäude im regulären Betrieb in Deutschland noch nicht realisiert wurde. Diese Daten können kaum zur Gänze von einem einzelnen Institut ausgewertet werden. Deshalb werden die Messdaten nach Ablauf des aktuellen Projektes der RWTH vom PtJ in Abstimmung mit der VOLKSWOHNUNG in einer noch näher zu definierenden Weise auch anderen Forschungseinrichtungen zur Verfügung gestellt werden.

## IV.7 Übersichtsauswertung Forschungsgebäude

### IV.7.1 Heizenergieverbrauch

Die messtechnische Begleitung lässt sehr detaillierte Auswertungen einzelner Komponenten der installierten Systeme sowie des Verhaltens des Systems insgesamt zu, aber auch des Nutzerverhaltens. Diese Auswertung wird durch die RWTH durchgeführt. Im Rahmen des vorliegenden Berichtes sollen nur zusammenfassende Ergebnisse zum Heizenergie- und Warmwasser-Verbrauch in den beiden Forschungsgebäuden dargestellt werden.

Die  $H_T$ -Werte ( $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ) der sechs Eingänge nach der Sanierung weisen folgende Werte auf:

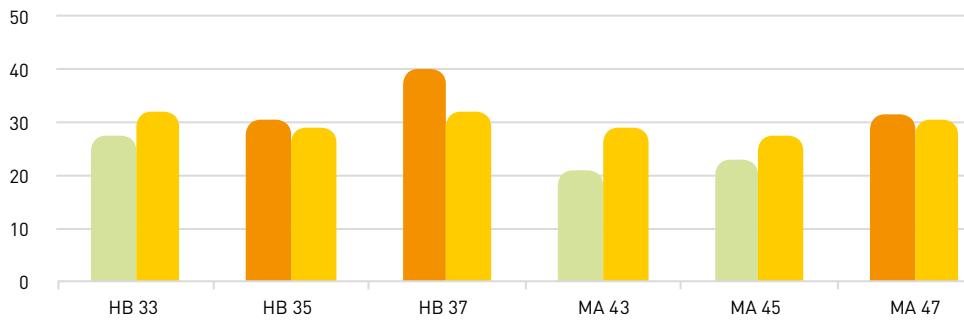
Eingang	HB 33	HB 35	HB 37	MA 43	MA 45	MA 47
$H_T$ -Wert	0,33	0,28	0,33	0,30	0,25	0,31

Abb. IV-4 auf Seite 57 vergleicht die gemessenen spezifischen Heizenergieverbräuche der sechs Eingänge der beiden Forschungsgebäude Heilbronner bzw. Mannheimer Straße, bezogen auf die beheizte Wohnfläche. Es handelt sich um Mittelwerte der Jahre 2011 und 2012:

Die rechten (gelben) Balken in Abb. IV-4 sind Rechenwerte; die grünen Balken gehören zu den drei Eingängen, bei denen Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung installiert wurden (HB 33 dezentral: in die Fenster integrierte Wärmerückgewinnung; MA 43: Wohnungs-Wärmerückgewinnungsanlagen im Flur; MA 45: zentrale Wärmerückgewinnung aus der Abluft im Dachgeschoss). Die orangefarbenen Balken gehören zu den Eingängen mit kontrollierter Entlüftung. Die durch die Wärmerückgewinnung mit der Zuluft zugeführte Wärme deckt einen Teil des Heizbedarfs ab, der bei einer Luftwechselrate von  $n_L = 0,5 \text{ h}^{-1}$  theoretisch bei ca. 14 kWh/m<sup>2</sup> liegen sollte. Deshalb muss in diesen drei Fällen der Heizungsbeitrag durch die erwärmte Zuluft zum gemessenen Heizenergieverbrauch (Abb. IV-4) hinzugaddiert werden. Dieser Anteil wird hier jedoch nicht direkt gemessen: Die Zuluftrate kann nur unter bestimmten Annahmen berechnet werden, mit entsprechenden Unsicherheiten, insbesondere im Fall der HB 33. Unter Berücksichtigung dieses Wärmerückgewinnungsanteils liegen die gemes-

senen Heizenergieverbrauchswerte von fünf der sechs Eingänge in den Heizperioden 2011/12 im Bereich von 10 % über den berechneten Werten; für Eingang HB 37 lag der gemessene Verbrauch deutlich (um ca. 20 %) höher als der gemessene Verbrauch.

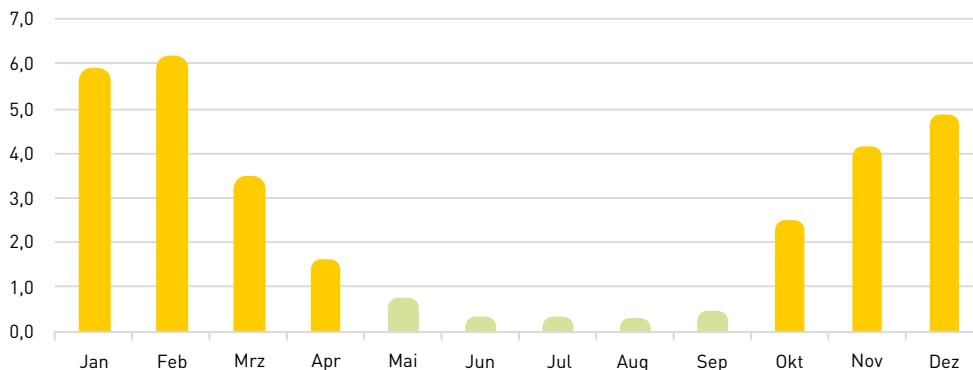
#### Spezifischer Heizenergieverbrauch, Mittelwert 2011/12 und berechnet ( $\text{kWh}/\text{m}^2$ )



Die Tatsache, dass die gemessenen Werte bei allen Eingängen über den berechneten Werten lagen, könnte ein Indiz für einen Rebound-Effekt im Bereich von etwa 10 % sein. Eine nähere Analyse dieses Effektes wird von der RWTH durchgeführt.

Abb. IV-5 zeigt die Verteilung der mittleren monatlichen Heizenergieverbräuche auf die Jahresmonate (Mittelwerte 2011 und 2012) in den beiden Forschungsgebäuden:

#### Spezif. monatl. Heizenergieverbrauch, Mittelwert Forschungsgebäude 2011/12 ( $\text{kWh}/\text{m}^2$ )



**Abb. IV-4:** Spezifischer Heizenergieverbrauch in den Forschungsgebäuden während der Heizperiode (Oktober bis April): Jahresmittelwerte für 2011 und 2012 witterungsbereinigt:  
█ kontrollierte Entlüftung ohne WRG  
█ mit Lüftung/Wärmerückgewinnung  
█ berechnete Werte nach Näherungsverfahren VOLKSWOHNUNG (Anhang AII-1).

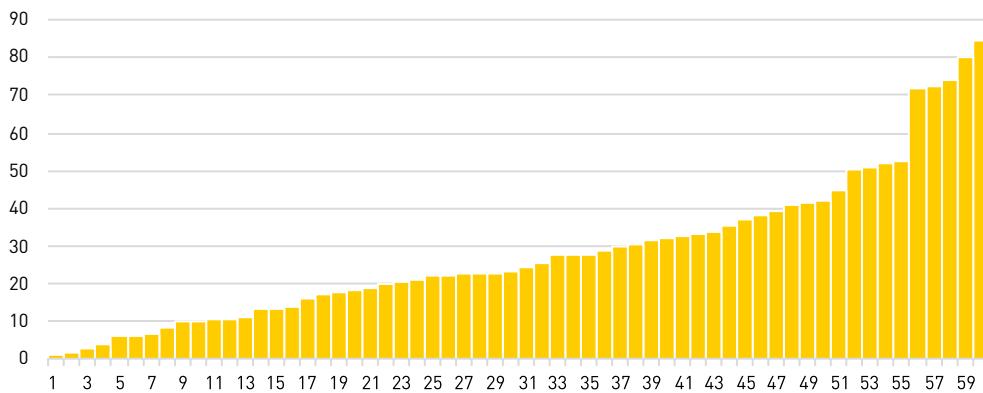
**Abb. IV-5:** Monatlicher spezifischer Heizenergieverbrauch (gemittelt über 2011 und 2012 sowie über alle 60 Wohnungen der beiden Forschungsgebäude); die Monate mit den grünen Balken, Mai bis September, sollten eigentlich einen Heizenergieverbrauch von nahezu null aufweisen.

Diese Grafik zeigt den üblichen Jahresgang des Heizbedarfs, mit Ausnahme des Monats Februar, dessen Werte von den extrem niedrigen Temperaturen im Februar 2011 beeinflusst sind. Abb. IV-5 zeigt auch die „Sommerheizung“ in den Monaten Mai bis September, obwohl in diesem Zeitraum bei dem sehr guten Wärmestandard der Forschungsgebäude keine Heiznotwendigkeit bestehen sollte. Dieser Anteil machte im Mittel über alle 60 Wohnungen 2,2 kWh/m<sup>2</sup> (ca. 6 % des Heizbedarfs) aus, der jedoch in den Werten von Abb. IV-4 nicht enthalten ist. Diese Wärme muss erzeugt und im Gebäude verteilt werden, wobei Verluste entstehen, die höher sind als die eigentliche „Nutzwärme“. Dadurch verursacht diese Sommerheizung einen Mehrbedarf an Endenergie, der im Bereich von ca. 10 % des Endenerieverbrauchs für die Beheizung liegt.

Auf die individuellen Heizenergieverbräuche pro Wohnung wird hier nicht eingegangen, lediglich auf die Streuung dieser Werte für die 60 Wohnungen der beiden Forschungsgebäude in Form eines geordneten Balkendiagramms:

**Spezif. Heizenergieverbrauch Forschungsgebäude, Mittelwert 2011/12 (kWh/m<sup>2</sup>)**

**Abb. IV-6:** Mittlerer spezifischer Jahres-Heizenergieverbrauch (kWh pro m<sup>2</sup> Wfl.) der 60 Wohnungen in den beiden Forschungsgebäuden 2011/2011, geordnet nach der Größe (ohne „Sommerheizung“)



Wenige Wohnungen waren nur zeitweise belegt. Dennoch weist eine größere Anzahl von Wohnungen einen sehr niedrigen Heizenergiebedarf von unter 20 kWh/m<sup>2</sup> auf. Erste Untersuchungen der RWTH haben gezeigt, dass dies u.a. auf Wärmeströme zwischen benachbarten Wohnungen zurückzuführen ist: Die Außenwände haben nach der Sanierung einen U-Wert unter 0,20 W/(m<sup>2</sup>.K), während die Wärmedurchgangswerte der Innenwände über 3 W/(m<sup>2</sup>.K) liegen. Es gibt jedoch noch andere Einflussgrößen auf den Heizenergieverbrauch der Wohnungen, wie Raumtemperaturen oder Lüftungsverhalten. Dadurch wird die Analyse erschwert und kann nur mittels Simulationsmodell (RWTH) im Einzelnen diskutiert werden.

Falls der Wärmestrom zwischen den Wohnungen eine maßgebliche Rolle für den Heizenergieverbrauch pro Wohnung spielen sollte, müsste die Alternative „Warmmiete“, ohne Erfas-

sung der individuellen Heizenergieverbräuche, ernsthaft diskutiert werden, weil eine verbrauchsabhängige Heizkostenabrechnung (von 2 bis 3 MWh pro Wohnung und Jahr) dann mit erheblichen Ungerechtigkeiten verbunden wäre. In diesem Fall hätte der Vermieter direktes Interesse daran, die bestmögliche Energieeffizienz bei der Bereitstellung der Nutzwärme und eine Minimierung überflüssiger Wärmeverbräuche zu erreichen.

Auffällig sind die fünf Ausreißer am oberen Ende der Skala in Abb. IV-6, primär verursacht durch ungünstiges Mieterverhalten und verstärkt durch „Mitheizen“ der benachbarten Wohnungen: Hier ist der Verbrauch an Heizenergie mehr als doppelt so hoch wie der Mittelwert des ganzen Gebäudes.

Dieses Ergebnis, d. h. eine große Spreizung zwischen Wenig- und Vielverbrauchern, kann allgemein beim Vergleich der Wohnungsverbräuche in energetisch modernisierten Mehrfamilienhäusern festgestellt werden: Der mittlere Heizenergieverbrauch liegt im Bereich des aufgrund der Bauphysik zu erwartenden Wertes, es gibt aber einzelne Wohnungen, die deutlich „zu viel“ verbrauchen. Die Erfahrung zeigt häufig, dass über mehrere Jahre immer in denselben Wohnungen ein zu hoher Wert auftritt. Daraus kann geschlossen werden, dass die Einrichtung eines „Feedback-Systems“ für alle Mieter, mit dem z. B. monatliche Verbrauchswerte angezeigt werden, etwa über das Internet, in der Praxis wenig erfolgversprechend ist. Wichtiger wäre eine Filterung der Vielverbraucher, z. B. im Rahmen der Erstellung der Heizkostenabrechnung, und eine direkte Kontaktaufnahme bzw. ein Beratungsangebot an diese Mieter durch das Wohnungsunternehmen, um Möglichkeiten zur Energieeinsparung zu finden.

#### IV.7.2 Verbrauch an Trinkwarmwasser

Der Warmwasser-Verbrauch wird in den 40 Wohnungen mit Frischwasserstationen ebenfalls – sekundärseitig – mit Wärmemengenzählern gemessen, siehe dazu die drei Abbildungen auf Seite 60. Abb. IV-7 zeigt die Ergebnisse für die Eingänge HB 33, MA 43, MA 45 und MA 47 für die Jahre 2011 und 2012. Demnach streut der spezifische Warmwasser-Verbrauch zwischen 10 und 17 kWh/m<sup>2</sup>, mit einem Mittelwert bei 13,4 kWh/(m<sup>2</sup>.a) für alle 40 Wohnungen über zwei Jahre. Der Monatsgang dieses Warmwasser-Verbrauchs wird in Abb. IV-8 dargestellt.

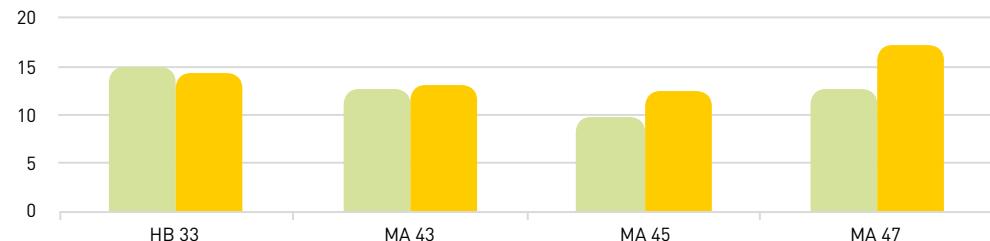
Hier ist der typische Rückgang an Warmwasser-Verbrauch im August/September (in Karlsruhe die Ferienmonate) zu sehen. Davon abgesehen, liegen die Monatswerte weitgehend konstant. Die Einzelverbräuche pro Wohnung sind hingegen stark unterschiedlich (Abb. IV-9).

Die Streubreite des Warmwasser-Verbrauchs liegt bei ca. 5 bis 30 kWh/(m<sup>2</sup>.a), ein Bereich, der auch sonst beim Warmwasser-Verbrauch in Mehrfamilienhäusern festgestellt wird. Im Gegensatz zum Verbrauch an Heizenergie, dessen Streuung bei „konventionell“ sanierten Wohnungen erfahrungsgemäß kleiner ist als die Streuung der Warmwasser-Verbräuche, ist hier umgekehrt die Streuung der Heizenergieverbräuche in den Forschungs-Gebäuden mit 10 bis 85 (kWh/(m<sup>2</sup>.a) größer – ein Hinweis auf die bekannte Tatsache, dass der Heizenergieverbrauch bei energetisch hochwertigen Gebäuden mit viel Technik stark vom Nutzerverhalten abhängt.

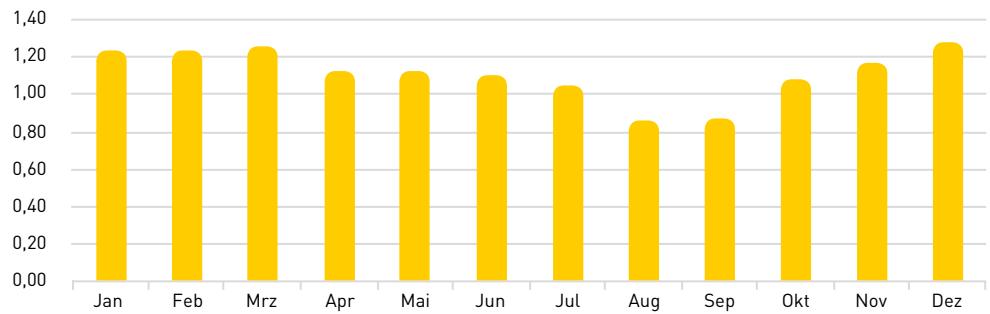
**Spezif. Warmwasser-Verbrauch, Mittelwert 2011/12, 40 WE (kWh/m<sup>2</sup>)**

**Abb. IV-7:** Spezifischer Warmwasser-Verbrauch (kWh/(m<sup>2</sup>.a)) der 40 Wohnungen mit FWE-Stationen, gemessen mit Wärmemengenzählern in den Wohnungen

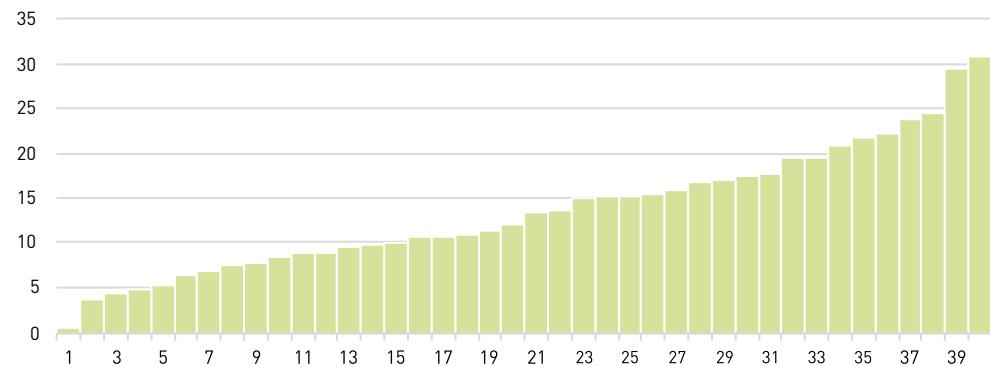
- WW 2011
- WW 2012

**Spezif. monatl. Warmwasser-Verbrauch, Mittelwert 2011/12, 40 WE (kWh/(m<sup>2</sup>.Monat))**

**Abb. IV-8:** Spezifischer monatlicher Warmwasser-Verbrauch der 40 Wohnungen mit FWE-Stationen (kWh/(m<sup>2</sup>.Monat)), Monatsmittelwerte über 40 Wohnungen

**Spezifischer Warmwasser-Verbrauch Forschungsgebäude, Mittelwert 2011/12 (kWh/m<sup>2</sup>)**

**Abb. IV-9:** Spezifischer Jahres-Warmwasser-Verbrauch (kWh/(m<sup>2</sup>.a)) pro Wohnung (Mittelwert der einzelnen Wohnungen über 2011 und 2012)



## V Zusammenfassung der Ergebnisse und Schlussfolgerungen

### V.1 Einleitung

Wie in allen der im Rahmen der Initiative EnEff:Stadt begonnenen Projekte wurde auch mit dem Quartiers-Energiekonzept Rintheim das Ziel verfolgt, den im Quartier für Heizenergie und Warmwasser anfallenden Primärenergieeinsatz (und die CO<sub>2</sub>-Emissionen) erheblich zu verringern und gleichzeitig die finanzielle Belastung der Mieter möglichst gering zu halten. Planung und erzielte Ergebnisse, wie Kosten und Energiebilanzen, sollen transparent dokumentiert werden, um Lerneffekte sowohl für die VOLKSWOHNUNG als Investor in Rintheim als auch für andere Akteure zu ermöglichen. Insbesondere sollte das Projekt nachweisen, dass der Quartiersansatz für Siedlungsbereiche mit ausreichender Dichte im Vergleich zur energetischen Ertüchtigung von Einzelgebäuden zusätzliche Möglichkeiten bietet, um die Kosten effizienter zu gestalten.<sup>43</sup> Dies ist eine wesentliche Voraussetzung dafür, dass die ambitionierten Energie- und CO<sub>2</sub>-Ziele im Gebäudesektor insgesamt erreicht werden können.

Um dies anhand des konkreten Projektes in Rintheim zu zeigen, ist es notwendig, Kosten und Nutzen verschiedener Ansätze zur energetischen Verbesserung zu vergleichen. Zur Ermittlung der erreichten Energie- und Kosteneffizienz dient die Messung des realen Verbrauchs an Endenergie vor und nach Durchführung der Maßnahmen, dessen rechnerischer Vergleich mit anderen Optionen sowie der Vergleich des Primärenergieeinsatzes vor und nach der Sanierung.

Zur Bewertung verschiedener technischer Optionen an der Gebäudehülle wurde von der VOLKSWOHNUNG ein empirisches Berechnungsverfahren entwickelt. Damit kann der Effekt verschiedener Einspar-Maßnahmen berechnet werden, ohne den für Gebäudesimulationsmodelle erforderlichen hohen Aufwand an Dateneingabe und Berechnungsumfang in Kauf zu nehmen. Unter Nutzung der Daten aus den Sanierungsmaßnahmen der Gebäude in Rintheim wurden damit Kosten und Nutzen verschiedener Maßnahmen verglichen und optimale Pfade der energetischen Sanierung abgeleitet. So ist auch der Vergleich zwischen Einzelgebäudestrategie und Quartiersansatz möglich.

Dieser Rechenansatz und dessen Ergebnisse werden in Anhang AII detailliert dargestellt. Dort wird auch gezeigt, dass es für Aussagen zur Wirtschaftlichkeit energetischer Sanierungsmaßnahmen in Bestandsgebäuden wichtig ist, für den Heizenergieverbrauch vor der Sanierung von gemessenen Werten auszugehen, da sich aus EnEV-Rechnungen i. A. zu hohe

<sup>43</sup> Diese Frage wird im EnEff:Stadt-Projekt „Modellstadt 25+“, FKZ 03ET111 der EnergyEffizienz GmbH Lampertheim und der RWTH Aachen, Inst. f. Hochspannungstechnik, sehr detailliert untersucht. Der Abschlussbericht dieses Vorhabens wird 2015 vorliegen.

Werte ergeben: Die Nutzung von EnEV-Werten für Bestandsgebäude führt häufig zu unrealistischen Erwartungen bei der Untersuchung der Wirtschaftlichkeit von Einsparmaßnahmen.

Das in Anhang AII beschriebene Modell der VOLKSWOHNUNG liefert eine direkte Beziehung zwischen dem spezifischen Transmissionswärmeverlust eines Gebäudes ( $H_T$ ) und dessen Jahres-Heizenergieverbrauch. Die Kostendaten verschiedener Maßnahmenpakete ermöglichen den gesuchten Vergleich von Kosten und Nutzen. Anhand eines Vergleichsgebäudes wird gezeigt, welche energetischen Maßnahmen in der Summe zu einem Minimum an Gesamtkosten (Kapitalkosten plus Energiekosten) führen und welcher Verbrauch an Endenergie in diesem Fall zu erwarten ist. Ferner werden das Kosten/Nutzen-Verhältnis weitergehender Maßnahmen untersucht, ein optimaler Pfad abgeleitet und ein Vergleich zwischen Maßnahmenkombinationen am Einzelgebäude und der integralen Sanierung eines ganzen Wohnquartiers angestellt.

Zum Forschungsprojekt Rintheim gehörte die Umsetzung einer Anzahl innovativer Maßnahmen an zwei vor der Sanierung identischen Mehrfamilien-Wohngebäuden. Diese Maßnahmen führen in der Theorie zu sehr weitgehenden Effizienzverbesserungen. Im Hinblick auf ambitionierte Energieziele, etwa den für die EU angekündigten „Niedrigst-Energie-Standard“ für neue Gebäude ab 2020, wird es erforderlich sein, solche innovativen Ansätze großflächig anzuwenden. Dazu müssen sie kostengünstiger werden und im realen Gebäudebetrieb eine robuste Performance erreichen.

## V.2 Ergebnisse der „konventionellen energetischen Sanierung“ von Mehrfamilienhäusern im Quartier<sup>44</sup>

- Für Mehrfamilienhäuser im Rinheimer Feld führt die mit dem o. g. Modell abgeleitete wirtschaftlich optimale Maßnahmenkombination zur energetischen Sanierung der Hüllflächen<sup>45</sup> auf einen  $H_T$ -Wert von rund 0,40 W/(m<sup>2</sup>.K). Daraus ergibt sich für das Klima von Karlsruhe ( $HGT_{15}^{20} = 2.053 \text{ Kd}$ ) ein Heizenergieverbrauch von  $q_{H_T} \gg 40 \text{ kWh}$  pro m<sup>2</sup> Wfl. Dies ermöglicht bei einem heutigem Energiepreis von 8,5 ct/kWhHu eine Reduzierung der Vollkosten der Heizenergiebedarfsdeckung nach Sanierung um rund 15 %, d. h. die Warmmiete ist – im Durchschnitt für alle Wohnungen des untersuchten Mehrfamilienhauses – nach der Sanierung niedriger als vorher. Diese optimale Maßnahmenkombination, hier als „Standardsanierung“ bezeichnet, umfasst den Einsatz konventioneller Dämmstoffe (z. B. EPS-Wärmedämm-Verbundsysteme für die Außenwand) mit einer „mäßigen“ Dicke von 13 bis 16 cm an Außenwand bzw. oberster Geschossdecke und 10 cm an der Kellerdecke, sowie den Austausch der vorhandenen Fenster gegen 2-Scheiben-Fenster ( $U_W = 1,30 \text{ W/(m}^2\text{.K)}$ ).

<sup>44</sup> Die folgenden Aussagen der Zusammenfassung basieren i. W. auf den Analysen in Anhang AII.

<sup>45</sup> Der Einbau einer kontrollierten Entlüftung zur Sicherung der Raumluftqualität bei zu sanierenden MFH in den Wohnungen ist i. A. notwendig und wird im Folgenden vorausgesetzt.

Die hiermit verbundenen Investitionskosten liegen bei 120 € pro m<sup>2</sup> Wfl. brutto. Der (gemessene) Heizenergieverbrauch des Vergleichsgebäudes konnte dadurch von 125 auf ca. 40 kWh pro m<sup>2</sup> Wfl. reduziert werden.

- Deutlich erhöhte Dämmstärken bis über 20 cm im Verbund mit „Passivhaus-Fenstern“ ( $UW = 0,80 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ) ermöglichen eine weitere Verringerung von  $q_{Hz}$  auf ca. 30 kWh/m<sup>2</sup>, verschlechtern aber die Wirtschaftlichkeit: Die Vollkosten liegen dann etwa auf dem Niveau der reinen Heizenergiokosten vor der Sanierung, die erforderliche Investition liegt bei ca. 150 €/m<sup>2</sup>. Erst bei einer Verdoppelung des heutigen Energiepreises käme eine solche Maßnahme in einen wirtschaftlich sinnvollen Bereich (Klimadaten von Karlsruhe).
- Der Austausch der vorhandenen Fenster, der in aller Regel bei der Sanierung erforderlich ist, durch Passivhaus-Fenster war im betrachteten Fall weniger kosteneffizient als der Austausch durch 2-Scheiben-Fenster.
- Die Kombination „Standardsanierung“ plus „Lüftung mit Wärmerückgewinnung“ ermöglicht eine Reduzierung des Heizenergieverbrauchs von 40 auf 25 bis 30 kWh/m<sup>2</sup> und kann kostengünstiger sein als das Paket „erhöhte Dämmung plus Passivhaus-Fenster“, wenn die in Anhang AII-1 getroffenen optimistischen Annahmen über Kosten, Rückwärmzahl und zusätzlichen Strombedarf der Lüftungsanlage im realen Betrieb realisiert werden können.<sup>46</sup>
- Eine vollständige „Passivhaus-Sanierung“<sup>47</sup> führt auf einen Heizenergieverbrauch von etwa 17 kWh pro m<sup>2</sup> Wfl., aber zu Vollkosten der Wärmebedarfsdeckung, die um mehr als 20 % höher liegen als bei der o. g. „Standardsanierung“.
- Die Kosten der energetischen Modernisierung stellen nur einen Teil (im vorliegenden Beispiel weniger als die Hälfte) der Kosten aller Gebäude-Modernisierungsmaßnahmen dar, die für Mehrfamilienhäuser im Falle einer umfassenden Sanierung erforderlich sind, denen aber, anders als bei der energetischen Sanierung, keine Einsparungen an Betriebskosten gegenüberstehen.
- Um als Wohnungsunternehmen die Gebäudesanierung sozialverträglich gestalten zu können, müssen die Modernisierungsmaßnahmen so kosteneffizient wie möglich erfolgen. Dies spricht für eine „kostenoptimale“ und gegen eine „energetisch maximale“ Sanierung, da bei wirtschaftlich optimaler Sanierung die übrigen Modernisierungskosten zumindest zum Teil „quersubventioniert“ werden können, was die Belastung der Mieter reduziert.

<sup>46</sup> Investitionskosten 35 €/m<sup>2</sup> Wfl., Rückwärmzahl 80 %, Stromaufwand 2,3 kWh/m<sup>2</sup> Wfl.-a; geringe W/I-Kosten.

<sup>47</sup> Dämmung der Hüllflächen auf U-Werte im Bereich 0,10 bis 0,15 W/(m<sup>2</sup> · K), Passivhaus-Fenster, Lüftung mit Wärmerückgewinnung.

### V.3 Sanierung von Mehrfamilienhäusern und Quartierskonzept – integraler Ansatz

Die Versorgung des Wohnquartiers Rintheimer Feld aus dem Fernwärmennetz der Stadtwerke Karlsruhe ermöglichte die Nutzung einer sehr energieeffizienten Wärmequelle mit einem Primärenergiefaktor frei Gebäude von  $f_{\text{NW}} = 0,48 \text{ kWhPE/kWhth}$  ( $\rightarrow$  Anhang A1-2). Bezogen auf die Nutzfläche der an die Nahwärme angeschlossenen Gebäude war die Errichtung eines Quartiers-Nahwärmennetzes mit Investitionen von ca. 30 € pro  $\text{m}^2$  Wfl. (2.100 € pro Wohneinheit) verbunden.

Die Wärmebereitstellungskosten des von der VOLKSWOHNUNG neu errichteten Nahwärmennetzes Rintheim liegen bei einer Abschreibungszeit von 20 Jahren im Bereich des Preises für Erdgas bzw. HEL, Stand 2013 (die o. g. Investition ist in diesem Wärmepreis enthalten).

Auch im Falle der Nahwärme-Versorgung bedeutet die „Standardsanierung“ das wirtschaftliche Optimum (abgesehen von der i. A. energetisch unsinnigen Variante „Nahwärme-Anschluss ohne Gebäudesanierung“). Eine weitergehende energetische Sanierung erhöht – zusätzlich zu den höheren Sanierungskosten – die spezifischen Kosten der Wärmeverteilung und bietet kaum weitere energetische Vorteile.

Das Paket „Nahwärme-Versorgung und Standardsanierung“ ermöglicht eine Reduzierung des Primärenergieverbrauchs zur Deckung des Heizungs- und Warmwasser-Bedarfs von über 200 kWhPE pro  $\text{m}^2$  Wfl. vor der Sanierung auf ca. 45 kWhPE/ $\text{m}^2$  im Durchschnitt für alle angeschlossenen Gebäude nach der Sanierung und erreicht damit den energetischen Standard einer Passivhaus-Sanierung – und dies mit Gesamt-Investitionskosten, die für die VOLKSWOHNUNG um mehr als 8 Mio. € niedriger liegen als eine Passivhaus-Sanierung aller Gebäude. Bei Umlegung dieser Mehrkosten auf die Mieter lägen die Vollkosten der Wärmebedarfsdeckung bei Passivhaus-Sanierung im Mittel um ca. 40 % (rund 340 €/a<sup>48</sup> oder 0,41 €/( $\text{m}^2$ .Monat)) höher als bei Standardsanierung und Nahwärme-Versorgung.

Um den Nahwärme-Anschluss wirtschaftlich zu gestalten, ist es erforderlich, alle Gebäude im Quartier innerhalb möglichst kurzer Zeit anzuschließen. Im konkreten Fall gelang dies innerhalb von 6 Jahren. Die Anlaufverluste lagen bei knapp 10 % des o. g. Nahwärme preises. Das Paket „Standardsanierung und Nahwärme-Anschluss“ ergibt eine Reduzierung des Primärenergie-Verbrauchs des Wohnquartiers um nahezu 80 % (CO<sub>2</sub>-Emissionen: minus 60 %; Fernwärmekennzahlen von 2013) und erfüllt damit bereits heute die langfristigen Energievorgaben der Bundesregierung.

<sup>48</sup> Mindestens, da die Kosten für Wartung/Instandhaltung auch zu noch höheren Betriebskosten führen können.

## V.4 Energiecontrolling

Als Teil des Forschungsprojekts wurde mit der messtechnischen Begleitung der beiden Forschungsgebäude auch ein Energiecontrolling-System für 17 der sanierten Gebäude in Rintheim eingeführt. Dieses System wird über das Forschungsprojekt hinaus fortgeführt und dazu in das vorhandene Energieverbrauchs-Erfassungssystem der VOLKSWOHNUNG eingebettet.

Neben den monatlichen Verbrauchsdaten der Wohnungen für Heizenergie und Warmwasser (und Kaltwasser), die für Abrechnungszwecke ohnehin per Fernablesung erfasst werden, können damit für diese Gebäude weitere Daten genutzt werden: die Abnahme von Nahwärme (= Endenergie), die Abgabe von Heizenergie und Warmwasser aus der Heizzentrale in die Gebäude (= Nutzwärme) und die zugehörigen Temperaturen der Wärmeversorgung. Sinnvoll wäre es, auch den Stromverbrauch in der Heizzentrale zu messen, was aber meist nicht gesondert erfolgt. Zusammen mit der laufend gemessenen Außentemperatur stehen hiermit die wichtigsten Daten zur Verfügung, die für das Energiecontrolling der einzelnen Gebäude notwendig sind.

Damit können folgende Informationen ausgewertet werden (was mit einer intelligenten Nutzung dieser Daten auch weitgehend automatisiert erfolgen könnte<sup>49</sup>):

- Soll/Ist-Vergleich des Gebäude-Heizenergieverbrauchs anhand der Plan-Daten und der gemessenen Daten über einen vorgegebenen Zeitraum mit bekannter Anzahl an Heizgradtagen. Daraus kann man schließen, ob sich das Gebäude energetisch plausibel verhält.
- Überwachung des Wirkungsgrades der Hausübergabestationen, eventuell auch Feststellung einer Verschlechterung des Wärmetauschers, z. B. aufgrund möglicher Verkalkung.
- Temperaturspreizung (Heizung, Warmwasser) und Pumpstromaufwand bzw. mögliche Einsparpotenziale.
- Gegebenenfalls Korrektur des Fernwärme-Anschlusswertes und der daraus folgenden Leistungskosten des angeschlossenen Wohngebäudes.
- Falls vorhanden, Nutzenergie-Ertrag und Funktionsnachweis von Solarkollektoren.
- Überflüssiger Heizenergieverbrauch oberhalb einer vorgegebenen Heizgrenztemperatur („Sommerheizung“: kann 10 % des Jahresheizenergieverbrauchs ausmachen).
- Wärmeverluste zwischen Heizzentrale und Wohnungen (Warmwasser; Heizung nur, wenn der Heizenergieverbrauch in den Wohnungen mit Wärmemengenzähler und nicht mit Verdunstungsmessern erfasst wird).
- Vergleich der Heizenergie- und Warmwasser-Verbräuche der einzelnen Wohnungen eines Mehrfamilienhauses (ermöglicht Feed-back für offensichtliche Energieverschwender im Rahmen der Nebenkostenabrechnung).
- Korrektur von Messfehlern bei der Heizenergie- bzw. Warmwasser-Messung.

<sup>49</sup> [www.ennovatis.de](http://www.ennovatis.de).

- Einfache Erstellung einer Zwischen-Heizkostenberechnung bei Mieterwechsel.
- Rasche Feststellung von Störungen der Wärmeversorgung und deren Dauer.
- Laufende jährliche Aktualisierung der Heizenergiekennzahl für den Verbrauchsausweis.

Die Erfahrungen in den ersten beiden Betriebsjahren haben gezeigt, dass das Einsparpotenzial durch Energiecontrolling in den sanierten Gebäuden im Bereich von 15 bis 25 kWh/m<sup>2</sup> liegt, also höher als das Einsparpotenzial von Maßnahmen, die über die „Standardsanierung“ hinausgehen. Somit stellt die Maßnahme „Gebäude-Energiecontrolling“, wenn sie sorgfältig umgesetzt wird, eine Alternative mit zusätzlichem Einsparpotenzial dar, die mit weniger Aufwand erreichbar ist und eher einen Beitrag zur Mieterzufriedenheit leistet als weitergehende technische Maßnahmen. Darüber hinaus sind die hierfür anfallenden laufenden Kosten laut Heizkostenverordnung im Rahmen der Heizkostenabrechnung umlegbar. Durch Einbindung dieser Kosten (Hardware, Ablesung, DFÜ) in die Organisation der Heizkostenabrechnung sowie weitgehende Automatisierung der Auswertung sollte es möglich sein, diese im Bereich von unter 5 % der abzurechnenden Energiekosten der Wohnungen zu halten. Damit wird ein intelligentes Energiecontrolling ein Win-Win-Modell für alle Beteiligten.

## V.5 Forschungsgebäude – Betriebserfahrungen

Die für die beiden Forschungsgebäude in Rintheim eingesetzten innovativen Maßnahmen wurden mit der wissenschaftlichen Begleiterin des Vorhabens, RWTH Aachen, Institut E.ON-Energy Research Center, konzipiert und sind in Kap. IV im Einzelnen beschrieben. Die Auswertung des umfangreichen messtechnischen Begleitprogramms durch die RWTH wird 2015 vorliegen. Erste Erfahrungen werden hier dargestellt.

Die einzelnen Techniken umfassten u. a. dezentrale Umwälzpumpen mit Einzelraumregelung von WILO („Geniax“), Erdsonden-Wärmepumpen sowie Luft/Wasser-Wärmepumpe von Heliotherm, Abluft-Wärmepumpe sowie Luftheizung und Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung von Schmeißer Lufttechnik, 40 dezentrale „Frischwasser-Stationen“ zur Bereitstellung von Warmwasser in den Wohnungen von Varmeco und F+G/Samson, Solarkollektoren der Firma Paradigma (27 m<sup>2</sup>), verschiedene Radiator-, Fußboden- und Deckenheizungen, sowie verschiedene Wärmedämmverbundsysteme mit den Dämmstoffen EPS, RESOL und VIP (VarioTec, Neumarkt/OPf.).

Planung und Einbau verliefen für den Bauherrn grundsätzlich unproblematisch, allerdings terminlich unzureichend mit dem Einbau der großen Anzahl an Wärmemengenzählern und deren DFÜ-Anschluss koordiniert. Die Installation von rund 200 Wärmemengenzählern unterschiedlicher Fabrikate mit M-Bus-Anschluss stellte sich als fehleranfällig heraus. Dadurch waren Abnahme-Messungen der einzelnen Komponenten unzureichend oder gar nicht verfügbar, was sich bei der Störungssuche oder späteren Optimierungsmaßnahmen nachteilig auswirkte. Dies ist ein organisatorisches Problem u. a. des Bauherrn. Lediglich das komplizierteste der installierten Messsysteme, nämlich dasjenige zur Auswertung des Verhaltens

der Wohnungen bzw. der Mieter (Datenlogger mit über 2.000 Sensoren in 300 Wohnräumen), das von der Hochschule Karlsruhe (Prof. Klaus Wolfrum) entwickelt und installiert wurde und für die noch laufende Messphase technisch betreut wird, funktionierte problemlos bzw. auftretende Probleme wurden rasch von der FH KA gelöst.

Abgesehen von den unkonventionellen Dämmstoffen RESOL und VIP, die die erwartete Dämmwirkung bestätigt, sich aber im Vergleich zu EPS als zu teuer herausgestellt haben, ergaben die Betriebserfahrungen mit den anderen Komponenten ein weites Spektrum an Bewertungen. Für ein so komplexes System unterschiedlicher Komponenten unterschiedlicher Hersteller waren Anfangsprobleme und die Notwendigkeit einer Optimierung im Betrieb erwartet worden. Die realen Betriebserfahrungen lagen insgesamt jedoch noch deutlich unter diesen Erwartungen, sowohl was Einzelkomponenten und deren Zusammenspiel innerhalb des „Systems Wärmebereitstellung“, als auch was die Energiebilanzen und die Wirtschaftlichkeit des Systems insgesamt angeht. Hierbei gibt es Abstufungen, von einigermaßen zufriedenstellend bis schlecht. Diese Erfahrungen sind im Folgenden zusammengefasst.

Die dezentralen „Geniax“-Pumpen, die von WILO für jeden Heizkörper im Eingang Heilbronner Str. 33 installiert wurden (Kosten ca. 2.800 € pro Wohnung mit 5 Räumen) funktionierten nach einem Kompletttausch aller Geräte durch WILO sehr gut, wobei die Rate der technischen Störungen an einzelnen Geräten derzeit noch zu hoch ist. Der Stromverbrauch für die Heizungsumwälzung lag in diesem Gebäude bei 0,13 kWh/m<sup>2</sup>, d. h. er wurde im Vergleich zu einer zentralen Heizungsumwälzpumpe um rund 70 % reduziert. Durch die resultierende Einsparung an Stromkosten können die Kosten jedoch bei Weitem nicht finanziert werden. Allerdings enthalten die „Geniax“-Pumpen für den Betrieb ein komplettes Einzelraum-Regelungssystem für jeden Raum, was ein Heizenergieeinsparungs-Potenzial im Bereich von 20 % ermöglicht (Gentemann 2012). Ferner können diese Geräte elektronische Heizkostenverteiler ersetzen und damit deren Kosten einsparen (ihre Einbindung in das vorhandene DFÜ-System vorausgesetzt). Wird dies berücksichtigt, kann diese Investition in den Bereich der Wirtschaftlichkeit kommen.

Darüber hinaus zeigten die Temperaturen der Heizkörper des sanierten Gebäudes (Heilbronner Str. 33-37), dass die „Geniax“-Pumpen auch an extrem kalten Tagen eine Heiztemperatur einregeln, die nicht höher liegt als die Vorlauftemperaturen der Fußbodenheizungen im selben Gebäude. Somit sind „Geniax“ besonders für den Betrieb mit Wärmepumpen geeignet, weil dadurch die hohen Mehrkosten der Fußboden- oder Deckenheizung (ca. 6.000 €/WE) ohne Einbußen an der Arbeitszahl der Wärmepumpe eingespart werden können.

Die Erfahrungen mit den vier unterschiedlichen eingesetzten Wärmepumpen in den drei Eingängen des Gebäudes Mannheimer Str. 43-47 waren heterogen. Energetisch am besten schnitt die Luft/Wasser-Split-Wärmepumpe in MA 47 ab (Nennlast 9,6 kWel, 480 W Luftregister), die sowohl Heizenergie (Deckenheizung, Vorlauftemperatur ≈ 38 °C) als auch Warmwasser ( $T_v \approx 50^\circ\text{C}$ ) bereitstellt. Die Arbeitszahl dieses Gerätes lag zwischen 3,15 und über 4,00, im Mittel bei  $\varepsilon \approx 3,70$ , was auf eine (sehr gute) Gütezahl von  $\eta_{WP} \rightarrow 0,60$  hinweist. Wegen

technischer Probleme (Kältekreis Außenluft-Wärmetauscher, Regelungstechnik) musste dieses Gerät im Lauf von drei Jahren zweimal ausgebaut und vom Hersteller (problemlos) durch ein neues Gerät ersetzt werden.

Negativ waren die Erfahrungen mit der Abluft-Wärmepumpe der Firma Schmeißer Lufttechnik Berlin, ebenfalls im Eingang MA 47. Laut Plan und Herstellerangaben hätte mit dieser Wärmepumpe (Kompressorleistung 1 kW, Lüfterleistung 250 W) aus der zentral abgeführten Abluft aus den 10 Wohnungen im Eingang MA 47 eine Leistung von über 4 kWth erzeugt werden sollen, die in Verbindung mit den beiden 750-Liter-Warmwasser-Pufferspeichern zur Deckung des Warmwasser-Bedarfs ausgereicht hätte. Aufgrund der hohen verfügbaren Temperaturen der Abluft und der niedrigen Heiztemperaturen (Deckenheizung) sollten also für die beiden hier installierten Wärmepumpen sehr gute Arbeitszahlen zur Deckung des Nutzenergiebedarfs im Bereich von  $\epsilon \approx 4,00$  möglich sein, mit einem resultierenden Primärenergie-Faktor der Wärmepumpe im Bereich von 0,70 kWhPE/kWhth. Tatsächlich erreichte die Abluft-Wärmepumpe Wärmeleistungen im Bereich von 2 bis 3 kW, mit Leistungszahlen von  $\epsilon \approx 1,5$  und darunter(!). Mehrfache Versuche des Herstellers, das System zu verbessern, erbrachten kein Ergebnis. Ein Problem war dabei das Zusammenwirken mit der Heliotherm-Wärmepumpe zur parallelen Erzeugung von Heizwärme und Warmwasser, was bisher von beiden Herstellern, weder von der Hydraulik noch von der Regelungstechnik her, verstanden wurde. Ein neuer Anlauf zur Systemoptimierung durch den Hersteller in Kooperation mit der RWTH wird Anfang 2015 unternommen werden.

In den beiden Eingängen MA 43 und 45 wurden Erdsonden-Wärmepumpen (Firma Heliotherm) eingebaut, jeweils mit sechs je 100 m tiefen CO<sub>2</sub>-Erdsonden, die im „Heat-Pipe“-Betrieb arbeiten: für MA 34 ein einzelnes Wärmepumpen-Modul (5,8 kWel Kompressorleistung), für MA 45 zwei Module mit je 2,60 kWel. Während das Modul in MA 43 gemessene Leistungszahlen von 3,3 bis 3,6 aufwies, lag in MA 45 ein Modul bei ca.  $\epsilon \approx 3,20$ ; das 2. Modul lag in der Regel unter 3,0. Die Wärmepumpe in MA 43 kann als energetisch (noch) akzeptabel angesehen werden, während die beiden Module in MA 45 inakzeptabel sind, wobei die schlechten Leistungszahlen möglicherweise auf zu hohe Temperaturen der Warmwasserbereitstellung durch das 2. Modul zurückzuführen sind. Dem Hersteller (Heliotec) sind die Gründe für die unterschiedliche Betriebsweise der beiden Module (bis heute) offenbar unklar. An einer Optimierung der Wärmepumpen in MA 45 wird gearbeitet.

Die gemessenen Erdreichtemperaturen nach dreijährigem Betrieb der CO<sub>2</sub>-Erdsonden zeigen bisher, dass die Abkühlung des Erdreichs während der Heizperiode im Sommer durch nachfließende Wärme kompensiert wird. Die Sonden-Gesamtlänge von 600 m je Hauseingang (beheizte Wohnfläche: 700 m<sup>2</sup>) hat sich demnach als ausreichend bzw. leicht überdimensioniert erwiesen. Dies muss jedoch über einen längeren Zeitraum untersucht werden (Institut KIT-EiFER).

Die in vier Eingängen für 40 Wohnungen eingebauten „Frischwasserstationen“ haben sich nicht bewährt: Während das Ziel einer Reduzierung der Wärmeverteilverluste im Gebäude

annähernd erreicht wurde, musste dies mit einem erheblichen Zuwachs an Stromverbrauch der Umwälzpumpen zur Verteilung des Warmwassers erkauft werden. Dies ergab beträchtliche Strom-Mehrkosten und einen deutlichen Mehrverbrauch an Primärenergie, verglichen mit der konventionellen Warmwasser-Bereitstellung aus der Heizzentrale. Bemühungen zur Verbesserung dieser Systeme, unter Berücksichtigung der Erfahrungen anderer Wohnungsunternehmen mit diesem System, laufen noch. In Anhang AII-2 wird gezeigt, dass eine zentrale Warmwasser-Versorgung mit einem intelligenten Konzept zur Verringerung der Rohr-Wärmeverluste energiesparender ist, und das bei deutlich geringeren Kosten.

Das Röhren-Solarkollektor-System „Aqua“ von Paradigma war nach der Inbetriebnahme im September 2010 nur wenige Wochen in Betrieb und ging dann auf Störung. Diese Störung wurde aber nur in der Heizzentrale angezeigt und daher von niemandem bemerkt. Die Besonderheit dieses Systems (und eigentlich sein Vorteil) liegt darin, dass kein Sole-Gemisch, sondern reines Wasser als Wärmeträger benutzt wird, was einen geringeren Pumpaufwand und bessere Wärmeübergänge in den Wärmetauschern ermöglicht – mit dem Risiko eines möglichen Einfrierens in kalten Nächten. Dieses Problem wird durch Einspeisung von erwärmten Wasser in der kritischen Zeit gelöst, was für die Energiebilanz vernachlässigbar ist. Der nicht bemerkte Ausfall der Regelung führte dazu, dass in den folgenden herbstlichen Frostnächten die nunmehr ungesicherten Glasröhren infolge Vereisung zu Bruch gingen. Erst nach langwierigen Gesprächen zwischen Bauherrn, Hersteller und Versicherung wurde die Anlage vollständig erneuert und ist seit Dezember 2013 wieder in Betrieb, wobei die Fernüberwachung zunächst durch Paradigma erfolgt. In der Planung wurden Solarerträge von deutlich über 400 kWh pro m<sup>2</sup> Kollektorfläche erwartet. Die Wärmemessung in 2014 ergab laut Messsystem Paradigma einen spezifischen Ertrag an Nutzwärme von 360 kWh/m<sup>2</sup>.<sup>50</sup> Auch hier besteht demnach Optimierungsbedarf, wenn die Herstellerangaben realisiert werden sollen.

Auch die übrigen installierten Komponenten wiesen technische Probleme auf, von belüfteten Flächenheizungen oder verkalkten Wärmetauschern (hartes Trinkwasser in Karlsruhe) über Mängel in der Regelung der Luftheizungen, etwa bei der Enteisung der Wärmerückgewinnungs-Wärmetauscher, bis zu Bedienungsfehlern der Mieter infolge nicht ausreichender Erklärung bzw. Mangel an technischem Verständnis oder zu komplizierter Bedienung der Regelungsgeräte. Diese Fehler oder Störungen wurden bzw. werden laufend im Zug der regulären Wartung (Austausch von Filtern und Batterien) oder durch individuelle Störungsbeseitigung bzw. durch zusätzliche Mieterinformationen behoben. Der Prozess des Sammelns von Erfahrungen, der Optimierung von Komponenten und Reglereinstellungen sowie des Beschwerdemanagements zwischen Mietern und VOLKSWOHNUNG läuft noch und wird hoffentlich zu einem akzeptablen Betrieb der Anlagen führen, der auch die gesetzten energetischen Ziele annähernd erfüllen kann.

Die Wirtschaftlichkeit der eingesetzten Komponenten war im Falle der Forschungsgebäude nur ein zweitrangiges Thema, weil die Kosten aufgrund der mangelnden Marktgängigkeit

<sup>50</sup> Carolin Hotz, VOLKSWOHNUNG

derzeit noch vergleichsweise hoch sind und zunächst die technischen Erfahrungen und Lerneffekte im Vordergrund standen. Generell stellt sich für innovative Techniken die Frage nach ihrer Wirtschaftlichkeit bei der Sanierung von Mehrfamilienhäusern. Für das Beispiel der Luft/Wasser-Split-Wärmepumpe sollen hier Zahlen genannt werden. Genauere Analysen sind erst nach der noch laufenden Messauswertung bzw. Anlagenoptimierung möglich.

Diese Wärmepumpe kostete 40.000 € (brutto) bzw. 1.430 €/kWth. Bei 25-jähriger Abschreibungszeit und einer Anzahl von 1.700 Volllaststunden pro Jahr ergeben sich daraus Festkosten von 5,4 ct/kWhth. Bei einem Strompreis von 22 ct/kWhel brutto (Wärmepumpen-Tarif der Stadtwerke Karlsruhe) erhält man mit einer Arbeitszahl von  $e = 3,70 \text{ kWhth/kWhel}$  Erzeugungskosten von 5,9 ct/kWhth, insgesamt also 11,3 ct/kWhth. Dies liegt beim HEL- oder Gas-Preis des Jahres 2013 um ca. 15 % höher als die Wärmeerzeugung mit einem konventionellen Heizkessel. Bei einem Strompreis von 15 ct/kWhel, wie er derzeit in Österreich gilt, wäre die Luft/Wasser-Wärmepumpe in Bezug auf die Wärmeerzeugungskosten gerade wirtschaftlich (unter günstigen Annahmen über Arbeitszahl und laufende Betriebskosten, sowie störungsfreiem Betrieb). Primärenergetisch und hinsichtlich der CO<sub>2</sub>-Emission ist diese Wärmepumpe deutlich besser als etwa ein System Gasheizung/Solarkollektor.

Die verschiedenen Anlagen zur Wärmerückgewinnung aus Abluft können energetisch, ähnlich wie Wärmepumpen, mit einer „Arbeitszahl“ bewertet werden: dem Stromeinsatz des Lüftungsventilators je zurückgewonnener kWh an Wärmeenergie. Da der Stromverbrauch bis 2014 nur für die Heizzentrale insgesamt gemessen wurde (erst seit Sommer 2014 wird er für Einzelverbraucher in der Heizzentrale erfasst), kann der Stromverbrauch der Ventilatoren vorerst nur plausibel aus der Gesamt-Strombilanz der Heizzentrale abgeschätzt werden. Unter den getroffenen Annahmen ergeben sich Werte für die unterschiedlichen Lüftungsanlagen in der Mannheimer Str. 43-47 von 5 bis 11 kWhth/kWhel. Während 11 ein sehr guter Wert ist, sind 5 kWhth/kWhel indiskutabel: Eine solche Anlage wäre schon wegen der resultierenden Stromkosten nicht wirtschaftlich! Diese Werte müssen im Rahmen der noch laufenden Analysen verifiziert und gegebenenfalls verbessert werden.

Die Mehrkosten der dezentralen Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung in MA 43 (unter Abzug der Kosten der kontrollierten Entlüftung von 28 €/m<sup>2</sup> brutto) lagen bei rund 70 €/m<sup>2</sup>. Ohne Berücksichtigung der Strom- und Wartungskosten lägen die Grenzkosten für eine solche Anlage bei unter 25 €/m<sup>2</sup> (Einsparung an Wärmeenergie durch Wärmerückgewinnung aus der Abluft von ca. 14 kWh/m<sup>2</sup> Wfl. vorausgesetzt). Die eingebauten Anlagen liegen demnach weitab von jeglicher Wirtschaftlichkeit, was in diesem Fall durch die Förderung des Projektes größtenteils kompensiert wurde.

Wenn das auch in Mehrfamilienhäusern vorhandene Energieeinsparpotenzial von Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung ausgeschöpft werden soll, müssen künftig Möglichkeiten gefunden werden, die Installationskosten dieser Anlagen erheblich zu reduzieren und einen energetisch optimalen Betrieb sicherzustellen.

## V.6 Schlussfolgerungen

Der Quartiersansatz, der im vorliegenden Projekt konzipiert und von der VOLKSWOHNUNG von 2008 bis 2014 mit einem Volumen von ca. 70 Mio. € umgesetzt wurde, hat die Erwartungen an die Vorteile dieser Herangehensweise im Allgemeinen bestätigt: Während durch ein übergeordnetes kommunales Klimaschutz- und Energiekonzept langfristige Strategien und Maßnahmen der kommunalen Energiepolitik vorgegeben werden, muss deren Umsetzung auf der Ebene der Quartiere erfolgen. Nur dort kann eine konkrete Planung als Basis konkreter Investitionsentscheidungen erfolgen, und nur dort ist die Komplexität einer auf die ganze Stadt bezogenen Strategie reduzierbar auf ein konkretes Projekt, für dessen Realisierung bestimmte Entscheidungsträger die Verantwortung übernehmen müssen. Auch hier sind immer noch viele Akteure involviert. Es ist daher ein wichtiger Erfolgsfaktor, einen Hauptverantwortlichen zu benennen, der die wichtigsten Entscheidungen zur Verwirklichung des Quartierskonzeptes unmittelbar beeinflussen kann. Im vorliegenden Fall des Quartiersprojekts Rinheimer Feld hat die VOLKSWOHNUNG diese Rolle übernommen.

Die wirtschaftlich optimale Kombination von Gebäudesanierungsmaßnahmen mit dem Aufbau eines Nahwärmenetzes zur Bereitstellung energetisch hocheffizienter Nutzwärme ermöglichte in Rintheim eine Reduzierung des Verbrauchs an fossiler Primärenergie um nahezu 80 %. Die resultierenden Investitionskosten einschließlich aller nicht-energetischen Modernisierungsmaßnahmen konnten nicht „warmmietneutral“ dargestellt werden. Den durchschnittlich etwa 15 % höheren Warmmieten steht aber auch ein Mehrwert an Wohnqualität und Standortattraktivität gegenüber.

Durch die Einsparmaßnahmen an den Gebäuden hat sich die Wärmedichte im Quartier von fast 40 MW/km<sup>2</sup> auf rund 15 MW/km<sup>2</sup> (oder eine Liniendichte von knapp 3,0 MWh pro Meter Trassenlänge) reduziert. Dies stellt auch annähernd eine untere Grenze der Wärmedichte dar, für die eine zentrale Wärmeversorgung noch wirtschaftlich ist.

Der hier umgesetzte Ansatz sollte auch für eine Vielzahl anderer urbaner Gebiete – gegebenenfalls mit anderen Wärmequellen – möglich sein. Er muss künftig eine wesentliche Säule der Energiewende darstellen, wobei eine stärkere Kopplung zwischen lokalen Maßnahmen und den aus der Energiewende folgenden Anforderungen an die örtlichen Energiesysteme (Speicherfähigkeit, Regelung, Versorgungssicherheit) angestrebt werden sollte.

Im Forschungsprojekt wurden auch innovative technische Ansätze in der Praxis erprobt und messtechnisch begleitet. Deren Auswertung ist noch nicht abgeschlossen. Aufgrund der bisherigen Erfahrungen ist jedoch klar, dass die hier eingesetzten Techniken zwar für sich genommen – mit Ausnahmen – technisch ausgereift sind, dass daraus für den Betrieb in einem komplexen Heizsystem aber nicht automatisch auch eine Performance folgt, wie sie im Stadium der Planung bzw. Investitionsentscheidung erwartet wurde. Damit entsteht das Problem der Zuständigkeit für Anlagenoptimierung und Mängelbeseitigung. Diese liegt faktisch

beim Bauherrn, hier dem Wohnungsunternehmen, der dafür in der Regel aber nicht qualifiziert ist.

Daraus folgt, dass

- für die Planung der Komponenten eines neuartigen Energiesystems mehr Sorgfalt und Abstimmung aufgewendet werden muss, als in konventionellen Systemen üblich,
- die Planungswerte für die einzelnen Komponenten (Betriebsparameter, energetische Daten) festgehalten werden müssen, da sie im späteren Betrieb als Vergleichswerte für die gemessenen Daten dienen,
- ein Monitoring-System installiert werden muss, mit dem die Funktionsweise der Komponenten des Systems überprüft und Soll/Ist-Vergleiche angestellt werden können, um auf deren Basis Maßnahmen zur betrieblichen Optimierung abzuleiten,
- dieses Monitoring-System möglichst früh in der Bauphase betriebsbereit sein muss, um bereits von der Abnahme der installierten Komponenten an zuverlässig über Daten zu verfügen, und dass
- der nachträgliche Optimierungsprozess, der – wie auch andere Projekte der Initiative EnEff:Stadt zeigen – immer erforderlich ist, zwei Jahre und mehr in Anspruch nehmen kann und einschließlich seiner Kosten bereits zu Projektbeginn eingeplant werden sollte.

Während also neue Techniken verfügbar und deren energetische Potenziale (und nach wie vor deren Kosten) hoch sind, ist die Komplexität der Gesamtsysteme viel höher als in konventionellen Anlagen: Die jeweils erreichte oder nicht erreichte System-Performance scheint eher zufällig. Wegen der den Wohnungsunternehmen bisher wenig vertrauten Komplexität neuartiger Energiesysteme – wie der hier erwähnten, aber auch anderer, wie z. B. BHKW, Einbindung von PV, Biomasse und dgl. – ergibt sich die Frage eines künftig erfolgversprechenderen Ansatzes zur Realisierung solcher Anlagen. So könnte z. B. ein Generalplaner oder Hersteller für die Planung, Realisierung und den nachfolgenden Betrieb über einen vorgegebenen Zeitraum verantwortlich zeichnen, ehe die Anlage auf den Bauherrn übergeht. Konsequenter wäre eine Contracting-Lösung (Pöschk 2008), die aber mit dem Mietrecht vereinbar sein müsste.

Hinsichtlich der künftigen technischen Anforderungen, etwa an „Niedrigst-Energie-Gebäude“, muss gewährleistet sein, dass die dazu erforderliche System-Performance in Tausenden von künftig zu realisierenden Anlagen, wie Lüftung mit Wärmerückgewinnung, Wärmepumpen, dezentralen Umwälzpumpen, Solarkollektoren usw. in der Praxis auch wirklich zuverlässig erreicht wird – ansonsten werden die energetischen Ziele im Gebäudesektor nicht erreichbar sein. Die Erfahrungen in diesem Projekt haben gezeigt, dass wir davon – zumindest im Bereich von Mehrfamiliengebäuden – noch weit entfernt sind. Eine zufriedenstellende Lösung dieses Problems wäre auch eine Voraussetzung für „Smart City“-Energiesysteme, deren „Smartness“ erst noch entwickelt werden muss – nicht nur in Form von intelligenten Netzen („Smart Grids“), sondern auch in Form von intelligenteren Gebäude-Energiesystemen.

## Literatur

- AGEB 2014 Arbeitsgemeinschaft für Energiebilanzen e. V., Energieverbrauch in Deutschland im Jahr 2013, [www.ag-energiebilanzen.de](http://www.ag-energiebilanzen.de)
- Annex 51 2013 IEA/ECB, Annex 51, Case Studies and Guidelines for Energy Efficient Communities – a Guidebook; Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart (2013)
- Arentz 2014 O. Arentz, Der zweifelhafte Nutzen der Klimaauflagen für Hausbesitzer, FAZ, 24.10.2014
- Becker 2014 S. Becker et al., Verdämmt in alle Ewigkeit, Der Spiegel, 49 (2014) 63-70
- Erhorn-Kluttig 2011 Erhorn-Kluttig, H. et al. Energetische Quartiersplanung, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart (2011)
- F+B 2009 Quartiersanalyse Rintheimer Feld, Endbericht der F+B Beratung für Wohnen, Immobilien und Umwelt GmbH Hamburg im Auftrag der VOLKSWOHNUNG, Hamburg (2009)
- FHBB 2003 Ökobilanz eines Vakuum-Isolations-Paneels, Schonhardt, U. et al., Inst. für Energie, FHBB (Fachhochschule beider Basel), Muttenz (2003); [www.empa-ren.ch](http://www.empa-ren.ch)
- Fischer 2008 Fischer, H.-M. et al., Lehrbuch der Bauphysik, Vieweg+Teubner, Wiesbaden (2008)
- Fritsche 2012 Fritsche, U. et al., Welche Rolle für Biokraftstoffe?, Studie im Auftrag von Shell Deutschland, Darmstadt (2012); [www.shell.de](http://www.shell.de) und U. Fritsche et al., Sustainability Criteria for Solid Bio-Energy from Forests, IINAS, Darmstadt (2012)
- Gentemann 2012 Gentemann, R.B. et al., Smart-Metering belegt Energieeinsparung, HLH 63 (2012) 83-87
- Gesamtstudie Fernwärme 1977 Gesamtstudie über die Möglichkeiten der Fernwärme-Versorgung aus HKW, Studie der AGFW im Auftrag des BM für Forschung und Technologie, Bonn (1977)
- Hegner 2002 Hegner H.-D. und I. Vogler, Energieeinsparverordnung EnEV – für die Praxis kommentiert; Verl. Ernst&Sohn, Berlin (2002)  
[www.iwu.de/downloads](http://www.iwu.de/downloads)
- IWU 2014 Kah, Feist 2005 Kah, O. und W. Feist, Wirtschaftlichkeit von Wärmedämm-Maßnahmen im Gebäudebestand, Studie des Gesamtverbandes der Dämmstoff-Industrie GDI, Darmstadt (2005)
- Lichtmeß 2010 Lichtmeß, M., Vereinfachungen für die energetische Bewertung von Gebäuden, Dissertation Univ. Wuppertal (2010)
- Loga 2008 Loga, T. et al., Querschnittsbericht Energieeffizienz im Wohngebäudebestand, Studie des Verbandes der Südwestdeutschen Wohnungs- wirtschaft, Institut Wohnen und Umwelt (IWU), Darmstadt (2008)

Pöschk 2008	Energie- und Umweltberatung Pöschk, Contracting in der Berliner Wohnungswirtschaft, Berlin (2008)
Sprengard 2013	Sprengard, Ch. et al., Technologien zur Verbesserung der Energieeffizienz von Gebäuden durch Wärmedämm-Stoffe, Studie des Forschungsinst. f. Wärmeschutz (FIW), gefördert durch Forschungsinitiative Zukunft Bau (Bundesinst. für Bau-, Stadt- und Raumforschung, BBSR) unter Mitarbeit des GdW Bundesverband deutscher Wohnungs- und Immobilienunternehmen, München (2013)
UBA 2013	Umweltbundesamt 15/2013, M. Memmler et al., Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger
UrbanReNet 2014	Hegger, M. und J. Dettmar, Energetische Stadtraumtypen, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart (2014)

## Anhänge



## Anhang I: Methoden der energetischen Bilanzierung

### Anhang AI-1: Primärenergie- und CO<sub>2</sub>-Emissions-Faktoren

Die Bilanzierung von Primärenergieverbrauch und CO<sub>2</sub>-Emission erfolgt mit geeigneten Primärenergie- oder CO<sub>2</sub>-Faktoren. Beim Einsatz von kombinierten Systemen (KWK, Biomasse/Holzenergie, Wärmepumpen etc.) oder Systemen mit großem Materialaufwand bei der Herstellung (Solarenergie) kann die Bestimmung dieser Faktoren aufwendig sein.

Zweck der Aufstellung der Energie- und CO<sub>2</sub>-Bilanz für ein Quartier ist es, ein realistisches Bild der energetischen Situation zu verschiedenen Zeitpunkten vor und nach den umzusetzenden Maßnahmen zu liefern. Der Aufwand zur Erfassung der dazu erforderlichen Informationen soll jedoch begrenzt sein. Deshalb sollte es für einfache Energiesysteme, wie etwa Heizkessel, ausreichen, die Primärenergie- bzw. CO<sub>2</sub>-Faktoren der jeweils eingesetzten Energieträger aus aktuellen Literaturdaten (oder den EnEV-Vorgaben) zu übernehmen. Damit kann die jeweilige Bilanzierung für ein Quartier in folgender Weise vorgenommen werden:

- (1) Der Einsatz an Endenergie frei Gebäude sowie der zugehörige Einsatz an Hilfsstrom werden gemessen oder mit Hilfe des jeweiligen System-Nutzungsgrades berechnet,
- (2) der so ermittelte Verbrauch an Endenergie (z. B. Gas, Fernwärme oder Strom) wird mit den zugehörigen Primärenergie-Faktoren (kWhPE/kWhEE) der jeweiligen Energieträger multipliziert und addiert, um den zugehörigen Gesamt-Primärenergieverbrauch zu ermitteln<sup>51</sup>,
- (3) um den Einsatz an „fossiler Energie“, PE<sub>foss</sub> (gemeint ist eigentlich „nicht-erneuerbare Energie“, die im Fall von Strom auch Kernenergie enthält) zu berechnen, wird der berechnete Primärenergie-Verbrauch mit dem „Fossil-Anteil“ des jeweiligen Energieträgers multipliziert,
- (4) um die durch den jeweils eingesetzten Endenergiträger verursachten Treibhausgas-Emissionen zu berechnen, wird der Endenergie-Verbrauch mit einem „CO<sub>2</sub>-Äquivalent-Faktor“ (t CO<sub>2</sub>-Äquivalent pro MWhEE) multipliziert, der neben CO<sub>2</sub> auch die anderen, mit dem jeweiligen Energieträger verknüpften Treibhausgase berücksichtigt.

Als Ergebnis erhält man den Gesamt-Primärenergieaufwand des betrachteten Energieversorgungssystems, den enthaltenen Verbrauch an fossilen Energien und die Summe der Emissionen an Treibhausgasen zur Erbringung der jeweiligen Energiedienstleistung, entweder als absolute Werte (MWhPE/a, t CO<sub>2</sub>-Äquivalent/a) oder als spezifische Werte, z. B. bezogen auf die Nutzfläche (kWhPE bzw. kg CO<sub>2</sub>-Äquivalent pro m<sup>2</sup> Nutzfläche).

<sup>51</sup> Die Primärenergie-Faktoren berücksichtigen auch vorgelagerte Verluste der Endenergieberbeitstellung von der Gewinnung bis zur Nutzung.

Für einfache Energiesysteme sollen Standardwerte (Tab. AI-1.1) sicherstellen, dass die Analyse mit anderen Projekten oder Quartierskonzepten vergleichbar ist. Bei einem kombinierten Energiesystem, wie im Falle der Fernwärme-Bereitstellung in Karlsruhe, müssen alle einzelnen Komponenten des Systems bilanziert werden (→ Anhang AI-2), um den korrekten Primärenergie- oder CO<sub>2</sub>-Faktor zu ermitteln, der dann wie die in Tab. AI-1.1 angegebenen PE/CO<sub>2</sub>-Faktoren benutzt werden kann. Anhang AI-3 beschreibt die Vorgehensweise zur energetischen Bilanzierung eines Quartiers.

Die umfangreichsten Arbeiten in Deutschland zur Bilanzierung von komplexeren Energiesystemen werden seit Langem im Rahmen der Fortschreibung des Modells GEMIS vom Öko-Institut bzw. neuerdings vom Internationalen Institut für Nachhaltigkeitsanalysen, IINAS, Darmstadt geleistet. GEMIS, meist nur als Datenbank angesehen, bietet auch ein Werkzeug, um die Energie- und CO<sub>2</sub>-Bilanz verschiedener Kombinationen von Energiesystemen berechnen zu können.<sup>52</sup>

Daneben gibt es weitere wissenschaftliche Veröffentlichungen zu diesem Thema, z. B. von der Forschungsstelle für Energiewirtschaft (FfE) München und vom Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER) der Universität Stuttgart.<sup>53</sup>

Die untenstehende Tabelle AI-1.1 gibt eine auf den Veröffentlichungen dieser Institute basierende Übersicht über die aktuellen PE/CO<sub>2</sub>-Faktoren, über die derzeit Konsens zu bestehen scheint. Biogas und Bio-Brennstoffe (mit Ausnahme von Holz) sind in Tab. AI-1.1 nicht enthalten, weil die zugehörigen Faktoren stark von den jeweiligen Berechnungs-Annahmen abhängen, aus der Literatur derzeit kein allgemein akzeptierter PE/CO<sub>2</sub>-Faktor erkennbar ist und diese Brennstoffe im Projekt Rintheim keine Rolle spielen (siehe hierzu jedoch Fritzsche 2012).

---

<sup>52</sup> Letzte Fassung GEMIS 4.81, Gesamtemissionsmodell Integrierter Systeme, vom September 2012 (U. Fritzsche, Öko-Institut Darmstadt/IINAS), [www.iinas.org](http://www.iinas.org) oder [www.gemis.de](http://www.gemis.de).

<sup>53</sup> Das Thema wird ausführlich behandelt u. a. in:

- VDI Richtlinie 4600 (2012) – Kumulierter Energieaufwand
- UBA 8/2008: Bestimmung spezifischer Treibhausgas-Emissionsfaktoren für die Fernwärme (U. Fritzsche et al.)
- Univ. Stuttgart/IER, Lebenszyklusanalyse ausgewählter Stromerzeugungstechniken, O. Mayer-Spohn et al. (2007)
- Forschungsstelle für Energiewirtschaft (FfE), Ganzheitliche energetische Bilanzierung der Energiebereitstellung (U. Wagner et al., München, 1996)

	Primärenergie-Faktoren			CO <sub>2</sub> -Äquivalent t CO <sub>2</sub> -Äquiv./MWhEE
	kWhPE / kWhEE	fossiler PE-Anteil	Vorgabe EnEV <sup>54</sup>	
Braunkohle	1,21	1,21	1,20	0,440
Steinkohle	1,08	1,08	1,10	0,410
Gas	1,12	1,12	1,10	0,247
Leichtes Heizöl	1,11	1,11	1,10	0,319
Flüssiggas	1,11	1,11	1,10	0,267
Holzhackschnitzel	1,07	0,06	0,20	0,023
Holzpellets	1,16	0,14	0,20	0,027
Brennholz	1,01	0,01		0,017
Solarthermie	0,15	0,15		0,060
PV <sup>55</sup>	0,61	0,61		0,155
Wind	0,06	0,06		0,015
Strommix 2002	2,97	2,80	3,00	0,635 <sup>56</sup>
Strommix 2009	2,80	2,55	2,55	0,573
Strommix 2010	2,70	2,53 <sup>57</sup>		0,559
Strommix 2011		2,46		0,564
Strommix 2012		2,27		0,586
Strommix 2013	2,70	2,30		0,595
Strommix 2014			2,40	
Strommix 2016			1,80	

**Tab. AI-1:** Brennstoffspezifische Faktoren zur Ermittlung des Primärenergieeinsatzes (bzw. des fossilen Anteils an Primärenergie) und der CO<sub>2</sub>-Äquivalent-Emissionen von Energiesystemen<sup>58</sup>; die Faktoren beziehen sich auf die jeweils betrachtete Endenergie EE, d. h. entweder auf den jeweiligen Brennstoff, oder auf die erzeugte Menge an Strom, bzw. im Falle der thermischen Solarenergie auf die erzeugte Nutzwärme.

<sup>54</sup> Vorgabe in der Verordnung für EnEV-Berechnungen.

<sup>55</sup> Aufgrund technischer Weiterentwicklungen sollte hier jeweils eine projektbezogene Bilanzierung stattfinden.

<sup>56</sup> P. Ich, UBA, Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix 1990-2013, [www.uba.de](http://www.uba.de)

<sup>57</sup> AGEB 2014 und UBA 2013; eigene Berechnung für die Jahre 2010 bis 2013 unter Benutzung dieser Quellen.

<sup>58</sup> Auf der CO<sub>2</sub>-Seite wird dieser Effekt durch die Verringerung des Kernenergieanteils reduziert; die wahren Primärenergie-Faktoren der erneuerbaren Energien sind – anders als es die EnEV vorgibt – nicht null, siehe Tab. AI-1.1, was die Auswirkung auf der Primärenergieseite ebenfalls vermindert.

## Anhang AI-2: Nahwärmenetz Rintheim: Primärenergie- und CO<sub>2</sub>-Emissions-Faktoren

Für Fernwärme-Systeme sind in der EnEV pauschale Primärenergiefaktoren von  $f_{FW} = 1,30$  kWhPE/kWh für Fernwärme-Erzeugung ohne KWK und  $f_{FW} = 0,70$  kWhPE/kWh für Netze mit KWK vorgegeben. Fernwärme-Systeme weisen jedoch in der Regel eine Struktur des Primärenergieeinsatzes auf, die es erforderlich macht, die zugehörigen PE- und CO<sub>2</sub>-Faktoren jeweils einzelfallbezogen – möglicherweise sogar jährlich neu – zu berechnen. Dies ist laut EnEV zulässig, wenn die Ermittlung des Primärenergie-Faktors durch einen zertifizierten Gutachter nach den „Regeln der Technik“ erfolgt, wie sie von der AGFW im Arbeitsblatt FW 309 festgelegt sind.

Das Nahwärmenetz Rintheim ist an das Fernwärmenetz der Stadtwerke Karlsruhe angeschlossen. Dieses verfügt seit September 2010 über eine Transportleitung zur Raffinerie MiRO im Norden von Karlsruhe, von wo in einem ersten Schritt eine Leistung von 38 MWth an industrieller Abwärme, die bisher an die Umgebung (Rhein, Luft) abgegeben wurde, in das Fernwärmenetz der Stadtwerke eingespeist werden. Die Raffinerie wird durchgehend Tag und Nacht betrieben, d. h. die Abwärme ist als reine Grundlast das ganze Jahr über verfügbar. Insbesondere im Sommer, wenn das Rheinhafen-Dampfkraftwerk (EnBW) mangels Stromnachfrage zurückgefahren wird, weshalb früher Frischwärme erzeugt werden musste, steht die Abwärme von MiRO durchgehend zur Verfügung.

Ferner wird (Stand 2013) das Fernwärmenetz Karlsruhe (Anschlusswert ca. 300 MWth) durch einen mit Steinkohle betriebenen KWK-Block der EnBW (Rheinhafendampfkraftwerk, Block 7, 536 MWel, 155 MWth), ein kleines Erdgas-Gegendruck-Kraftwerk (ca. 10 MWth) der Stadtwerke sowie durch einen Spitzenkessel (Erdgas) versorgt.

Im Jahr 2013 gaben die Stadtwerke Karlsruhe die in Tab. AI-2.1 genannte jährliche Wärmeeinspeisung von  $Q_{Erz} = 806.370$  MWh in das Fernwärmenetz ab; die Nutzwärmeabgabe frei Gebäude lag bei  $Q_N = 722.336$  MWhth.

Das Fernwärmenetz der Stadtwerke Karlsruhe hatte 2013 einen Pumpstromaufwand von  $E_p = 11.568$  MWhel/a oder 17 kWhel/MWhth. Die Netzverluste lagen bei  $v = 10,4\%$ . Der Primärenergie-Faktor des Stroomblocks in Deutschland lag in 2013 bei  $f_{el} = 2,70$  kWhPE/kWhel, der CO<sub>2</sub>-Faktor bei 0,595 t CO<sub>2</sub>/MWhel. Mit diesen Daten und den übrigen PE-Faktoren  $f_{Bi}$  nach Tab. AI-1.1 sowie den Angaben aus Tab. AI-2.1 kann der Primärenergie- bzw. CO<sub>2</sub>-Faktor der Fernwärme in Karlsruhe für 2013 berechnet werden. Dies erfolgte durch den Gutachter der Stadtwerke Karlsruhe, GEF Ingenieur AG Leimen, nach AGFW Arbeitsblatt 309-1 mit folgender Formel:

$$(AI-2.1) \quad f_{FW} = \frac{\sum_k (B_i \cdot f_{Bi}) - \left[ \sum_i (E_{KWK\_k} - E_{EV\_k}) \right] \cdot E_p}{Q_{Erz} \cdot (1-v)} \text{ kWhPE/kWhth.}$$

	Energie-träger	Wärmeein-speisung	Anteil an $Q_{Erz}$	Brennstoff-einsatz $B_i$	Strom-erz. netto $E_i$	$f_{PE}$	$PE_i$	$f_{CO_2\text{-Äqu.}}$	t CO <sub>2</sub> -Äquiv.
		MWhth/a	%	MWhEE/a	MWhel/a	kWhPE/kWhEE	MWhPE/a	t CO <sub>2</sub> /MWhPE	
HKW West + Frischwärme	Gas	68.456	8,5	84.001	-4.340	1,10	83.125	0,247	22.922
RDK 7 Steinkohle Entn.-Kond.	Steinkohle	465.705	57,8	881.255	271.865	1,10	178.833	0,438	234.017
Abwärme MiRO	Abwärme	272.168	33,8	0	0	0	0	0	0
<b>Gesamt-Einspeisung <math>Q_{Erz}</math></b>		<b>806.329</b>	100,0	<b>173.624</b>	<b>267.525</b>		<b>294.160</b>		<b>256.939</b>

Der Ausdruck in der eckigen Klammer von Formel (AI-2.1) bildet die „Stromgutschrift“, die aus der Netto-Stromerzeugung der KWK-Anlagen resultiert (Stromerzeugung der KWK-Anlage k abzüglich Eigenstrombedarf, aufsummiert über die im System betriebenen KWK-Anlagen, und hiervon der Pumpstromaufwand  $E_p$  für die Wasserumwälzung des Fernwärmennetzes abgezogen). Diese Stromgutschrift wird vom Gesamt-Primärenergieverbrauch zur Erzeugung von  $Q_{Erz}$  subtrahiert und durch die Nutzwärmeabgabe  $Q_N = Q_{Erz} \cdot (1-v)$  dividiert; daraus ergibt sich der Primärenergie-Faktor  $f_{FW}$  des untersuchten Fernwärmesystems.

**Tab. AI-2.1:** Fernwärmennetz Karlsruhe – Daten 2013 (Stadtwerke Karlsruhe bzw. GEF Ingenieur AG Leimen); in der Netto-Stromerzeugung sind Eigenstrombedarf und Pumpstrom abgezogen.

Der CO<sub>2</sub>-Faktor des Fernwärmennetzes (t CO<sub>2</sub>/MWhth) wird analog berechnet, indem die Primärenergie-Faktoren durch die entsprechenden CO<sub>2</sub>-Äquivalent-Faktoren ersetzt werden.

Mit den Daten aus Tab. AI-2.1 erhält man  $f_{FW} = 0,43$  MWhPE/MWhth und  $f_{CO_2} = 0,16$  t CO<sub>2</sub>-Äquiv./MWhth. Diese Werte gelten für die Fernwärme der Stadtwerke Karlsruhe und damit für die Wärmeabgabe frei Überabestation Nahwärmennetz Rintheim.

Um den entsprechenden Faktor  $f_{NW}$  des Nahwärmennetzes Rintheim zu berechnen, müssen die zusätzlichen Wärmeverluste im Nahwärmennetz,  $v_{NW} = 7,2\%$ , sowie der zusätzliche Pumpstromaufwand  $p_{NW} \sim 6$  kWhel/MWhth berücksichtigt werden:

$$(AI-2.2) \quad f_{NW} = f_{FW} \cdot (1+v_{NW}) + p_{NW} \cdot f_{el} = 0,48 \text{ kWhPE/MWhth}$$

bzw. für den CO<sub>2</sub>-Faktor analog:  $f_{CO_2\text{-}NW} = 0,18$  t CO<sub>2</sub>-Äquiv./MWhth.

Diese Zahlen zeigen, dass die Fernwärme in Karlsruhe hinsichtlich Primärenergieverbrauch wesentlich besser abschneidet als etwa eine konventionelle Erdgas-Kesselheizung ( $f_{Ks} \approx 1,27 \text{ MWhPE/MWhth}$ ), weil die Nutzwärme überwiegend entweder ganz ohne Primärenergie-Einsatz (industrielle Abwärme) oder gekoppelt mit Stromerzeugung bereitgestellt wird, so dass eine beträchtliche Stromgutschrift vom Primärenergie-Einsatz im Heizkraftwerk abgezogen werden kann.

Im Kraftwerkspark von EnBW und den Stadtwerken in Karlsruhe stehen in den nächsten Jahren wesentliche Änderungen an. So wird der Block RDK-6 zu einem GuD-Kraftwerk (465 MWel brutto) mit einem Netto-Wirkungsgrad von  $\eta_{el} = 58\%$  umgebaut. Ferner wird ein neuer Steinkohleblock RDK-8 (912 MWel brutto) errichtet, der einen Wirkungsgrad von  $\eta_{el} = 46\%$  haben wird. Aus diesem Block sollen künftig 220 MWth an Fernwärme ausgekoppelt werden können. Im Zusammenhang mit einer weiter ausbaufähigen Abwärmenutzung von MiRO ist daher mittelfristig ein erheblicher Ausbau der Fernwärme in Karlsruhe notwendig, um diese Potenziale nutzen zu können. Dadurch werden sich die Primärenergie- bzw. CO<sub>2</sub>-Faktoren gegenüber den für 2013 berechneten Werten weiter verbessern – und damit auch die Energiebilanz der Stadt Karlsruhe.

Der CO<sub>2</sub>-Vorteil der Nahwärme in Rintheim (Stand 2013) ist kleiner als der Primärenergie-Vorteil verglichen mit Wärmeerzeugung aus einem Gaskessel ( $f_{CO2-Gas} \sim 0,30 \text{ t CO}_2\text{-Äquiv/MWhth}$ ). Dies röhrt vom Einsatz an Steinkohle im RDK der EnBW her: Steinkohle weist einen viel höheren CO<sub>2</sub>-Faktor auf als Erdgas.

In einer realistischen Primärenergie-Bilanz muss berücksichtigt werden, dass mittlerweile ein wesentlicher (und wachsender) Teil des Primärenergie-Einsatzes zur Strombereitstellung in Deutschland „erneuerbar“ ist. Mit zunehmendem Anteil an erneuerbaren Energien im Strommix reduziert sich die KWK-Stromgutschrift, d. h. der Primärenergie-Faktor von Wärme aus KWK wird größer bzw. der energetische Vorteil der KWK geringer.<sup>59</sup> Daher muss die Wärmeerzeugung aus KWK damit rechnen, dass deren derzeit großer energetischer Vorteil künftig abschmelzen wird. Dies sollte bei der Erstellung von kommunalen Energiekonzepten berücksichtigt werden.

### Anhang AI-3: Energiebilanz auf Quartiersebene

Das wichtigste Ergebnis der Quartiers-Energiebilanz ist der Nachweis, inwieweit das Ziel der energetischen Verbesserung nach Durchführung des Projektes erreicht wurde bzw. sich in den Folgejahren entwickelt (Monitoring). Die Kriterien dieses Nachweises sind

<sup>59</sup> Auf der CO<sub>2</sub>-Seite wird dieser Effekt durch die Verringerung des Kernenergieanteils reduziert; die wahren Primärenergie-Faktoren der erneuerbaren Energien sind – anders als es die EnEV vorgibt – nicht Null, siehe Tab. AI-1.1, was die Auswirkung auf der Primärenergieseite ebenfalls vermindert.

- der spezifische Heizenergiebedarf (kWhth pro m<sup>2</sup> Nutzfläche) als Kriterium der energetischen Gebäudequalität vor und nach der Sanierung,
- der spezifische (fossile) Primärenergieverbrauch (kWhPE pro m<sup>2</sup> Nutzfläche) zur Bereitstellung der Nutzenergie für die Verbraucher im Quartier (Heizung, Warmwasser und Strom für verschiedene Anwendungen, Kühlung) nach Umsetzung des Energiekonzeptes im Vergleich zum Zustand vor der Sanierung sowie
- die spezifische CO<sub>2</sub>-Äquivalent-Emission (kg CO<sub>2</sub>-Äquivalent pro m<sup>2</sup>).

Dabei geht es jeweils um die spezifischen Zahlen, weil die absoluten Zahlen durch Zubau, Abriss oder Nutzungsänderungen beeinflusst werden, die nicht direkt mit der energetischen Qualität zusammenhängen.

In „Energetische Quartiersplanung“ (Erhorn-Kluttig 2011) werden die drei Größen

$$\begin{aligned} q_{th} &= q_{Hz} + q_{WW} && \dots \text{Heizungs- und Warmwasser-Bedarf (kWh/m}^2\text{)} \\ e_{EE} & && \dots \text{Aufwandszahl bezogen auf den Endenergieeinsatz (kWhEE/kWhth)} \\ f_{PE} & && \dots \text{Primärenergiefaktor (kWhPE/kWhEE)} \end{aligned}$$

als aussagefähige Energie-Kennzahlen für ein Quartier angegeben. Dabei erfasst der Primärenergie-Faktor  $f_{PE}$  gelagerten Verluste der Endenergiebereitstellung, die in  $e_{EE}$  nicht enthalten sind.

Um ein Gebäude energetisch zu optimieren, soll das Produkt dieser drei Kennzahlen, pe, ein Minimum sein:<sup>60</sup>

$$(AI-3.1) \quad pe = (q_{Hz} + q_{WW}) \cdot e_{EE} \cdot f_{PE} \text{ (kWhPE/m}^2\text{).}$$

Diese Primärenergiekennzahl pe ist – neben der analog zu berechnenden CO<sub>2</sub>-Kennzahl – das maßgebliche Kriterium der energetischen Qualität eines Gebäudes oder Quartiers. Formel (AI-3.1) zeigt, dass erst die energetische Qualität des Gebäudes, die Energieeffizienz der installierten energietechnischen Einrichtungen (TGA) und die Art und Weise der Bereitstellung der Endenergie (z. B. mit Solarkollektoren, Wärmepumpe, Nahwärmenetz etc.) zusammen eine Aussage zur energetischen Qualität eines Quartiers ergeben.

Die o. g. Formel kann in der konkreten Anwendung nicht unmittelbar umgesetzt werden, weil die Verluste der Wärmeverteilung im Gebäude und die elektrische Hilfsenergie nicht in (AI-3.1) enthalten sind. Sie kann aber so verallgemeinert werden, dass damit unterschiedlichste Systeme, einschließlich zentral versorger Systeme, behandelt werden können: Mit der Berechnung der zur Deckung des Bedarfs an Heizenergie und Warmwasser erforderlichen Wärmeerzeugung,  $q_{th}$ , aus

<sup>60</sup> Unter der Nebenbedingung möglichst niedriger Gesamtkosten.

$$(AI-3.2) \quad q_{th} = q_{Hz} + q_{WW} + q_{Verl} \quad (\text{kWhth}/\text{m}^2),$$

mit

$q_{Hz}$  ... spezifischer Heizenergiebedarf (berechnet) oder Heizenergieverbrauch (in den Wohnungen gemessen) in kWhth/m<sup>2</sup> (z. B. 40 kWh/m<sup>2</sup>)

$q_{WW}$  ... spezifischer Warmwasser-Verbrauch in kWhth/m<sup>2</sup>, in EnEV vorgegeben (12,5 kWh/m<sup>2</sup> A<sub>N</sub>) oder in den Wohnungen gemessen (z. B. 15 kWh/m<sup>2</sup> Wfl.)

$q_{Verl}$  ... Verluste bei der gebäudeinternen Verteilung der Heizungs- und Warmwasser-Energie, z. B.

$$q_{Verl} = q_{Verl}^{Hz} + q_{Verl}^{WW} = 3 + 7 = 10 \text{ kWh}/\text{m}^2,$$

kann man die gesuchte Primärenergiekennzahl pe berechnen aus

$$(AI-3.3) \quad pe = q_{th} \cdot (e_{EE} \cdot f_{EE} + e_H \cdot f_{el}) \quad (\text{kWhPE}/\text{m}^2).$$

Hierbei sind

$pe$  ... spezifischer Primärenergieverbrauch zur Bereitstellung der Nutzwärme des betrachteten Gebäudes in kWhPE/m<sup>2</sup>

$e_{EE}$  ... Aufwandszahl der Bereitstellung bzw. Erzeugung der Nutzwärme, bezogen auf die eingesetzte Endenergie in kWhEE/kWhth

$f_{EE}$  ... Primärenergiefaktor der eingesetzten Endenergie in kWhPE/kWhEE

$e_H$  ... Hilfsenergieverbrauch (Umwälzpumpen, Lüftungsanlagen) in kWhel/kWhth<sup>61</sup>

$f_{el}$  ... Primärenergiefaktor des eingesetzten Stroms in kWhPE/kWhel.

Bei bekannten Werten für  $e_{EE}$ ,  $e_H$  und  $f_{EE}$  ist Formel (AI-3.3) für alle Wärmeversorgungs-Systeme anwendbar.

Mit den o. g. beispielhaften Angaben zur Berechnung von  $q_{th}$ , die reale Werte in sanierten Gebäuden in Rintheim darstellen, erhält man  $q_{th} = 65 \text{ kWhth}/\text{m}^2$ , die Wärme, die zur Deckung des Bedarfs an Heizenergie und Warmwasser,  $q_{Hz} + q_{WW} = 40 + 15 = 55 \text{ kWhth}/\text{m}^2$ , erzeugt werden muss.

Nimmt man beispielsweise als Wärmequelle einen Gaskessel mit dem Jahreswirkungsgrad  $h_{Ks} = 0,87$  an, so ist  $e_{Ks} = 1/h_{Ks} = 1,136 \text{ kWhHu}/\text{kWhth}$ . Der Primärenergiefaktor von Gas ist  $f_{Gas} = 1,10 \text{ kWhPE}/\text{kWhHu}$ . Diese beiden Werte müssen in Formel (AI-3.3) für  $e_{EE}$  und  $f_{EE}$  eingesetzt werden. Nimmt man ferner einen Hilfsstromverbrauch von  $e_{el} = 1,85 \text{ kWhel}/\text{m}^2$  (Heizung, kontrollierte Lüftung) und einen Primärenergie-Faktor für Strom von  $f_{el} = 2,27 \text{ kWhPE}/\text{kWhel}$  an (fossiler Anteil des Strommix in Deutschland 2012), so erhält man  $pe = 86 \text{ kWhPE}/\text{m}^2$ , wobei der Hilfsstrom ca. 5 % des Primärenergieverbrauchs verursacht.

<sup>61</sup> Wenn der spezifische Hilfsstromverbrauch bekannt ist, z. B.  $e_{el} = 0,65 \text{ kWh}/\text{m}^2$  für Heizung und Warmwasser, so erhält man  $e_H$  aus  $e_H = e_{el}/q_{th}$ ; für  $q_{th} = q_{Hz} + q_{WW} + q_{Verl} = 65 \text{ kWhth}/\text{m}^2$  (z. B.) wird  $e_H = 0,65/65 = 0,01 \text{ kWhel}/\text{kWhth}$  oder  $10 \text{ kWhel}/\text{MWhth}$ .

Hingegen muss für das Nahwärmennetz Rintheim für  $e_{EE} = e_{HÜS} = 1/0,96 = 1,04 \text{ kWhth/kWhth}$  (die Aufwandszahl der Hausübergabestation ohne Hilfsstrom) eingesetzt werden, für  $f_{EE}$  der Primärenergiefaktor der Nahwärme Rintheim (Anhang AI-2) von  $f_{NW} = 0,48 \text{ kWhPE/kWhth}$ . Damit erhält man eine Primärenergiekennzahl, mit sonst gleichen Werten für das betrachtete Gebäude, von  $pe_{NW} = 37,2 \text{ kWhPE/m}^2$ .

Auch für andere Energiesysteme, wie etwa Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung, solare Warmwasser-Anlagen oder Wärmepumpen, kann Formel (AI.3-3) – mit geeigneter Wahl von  $e_{EE}$  bzw.  $f_{EE}$  – zur Ermittlung der Primärenergie-Kennzahl benutzt werden (s. Formel (AI-3.4) für ein BHKW-Heizkraftwerk als Beispiel).

Formel (AI-3.3) muss für jedes Gebäude bzw. für jeden Gebäudetyp im Quartier ausgewertet werden, wobei der Nutzenergiebedarf und der Bedarf an Hilfsstrom im Gebäude, eventuell auch die Aufwandszahl der installierten Hausübergabestation, von Gebäudetyp zu Gebäudetyp für sich festgestellt werden müssen. Alle übrigen Parameter ändern sich nicht (bzw. gegebenenfalls von Jahr zu Jahr, wie  $f_{el}$ ). Somit kann eine Gesamt-Energiebilanz für das ganze Quartier leicht erstellt werden. Die Vorgehensweise für die CO<sub>2</sub>-Bilanz ist analog.

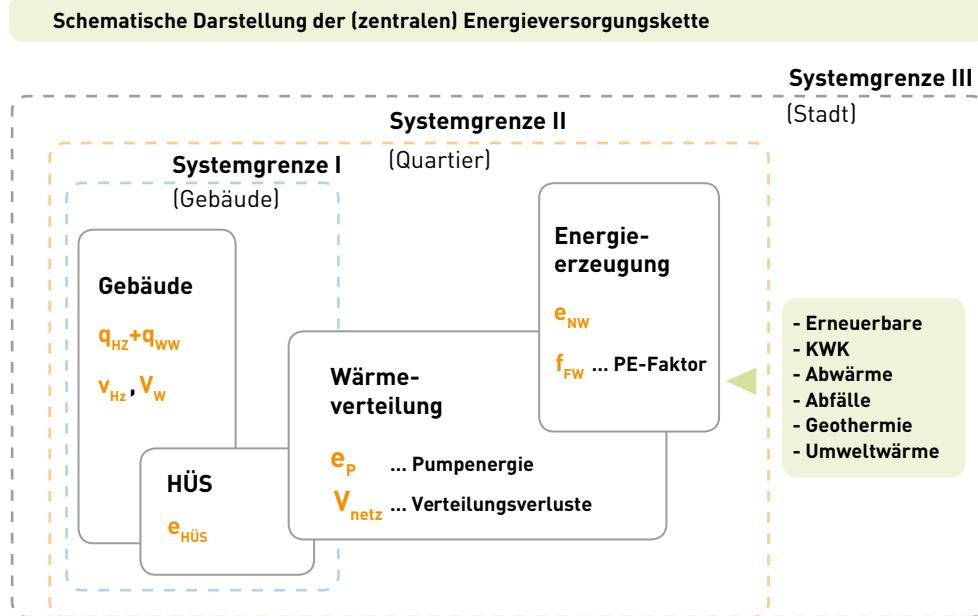
Die Primärenergie-Kennzahl eines Quartiers,  $pe_{Qu}$ , mit einer Anzahl von N an die Nahwärme angeschlossenen Gebäuden (oder Gebäudetypen) mit den Nutzflächen  $A_i$  ergibt sich dann aus dem gewichteten Mittelwert der Kennzahlen  $pe_i$  der einzelnen Gebäude oder Gebäudetypen:

$$pe_{Qu} = \frac{\sum_{i=1}^N (pe_i \cdot A_i)}{\left[ \sum_i A_i \right]} .$$

Dieser Wert kann als Benchmark auch für andere Quartiere benutzt werden, oder zur Charakterisierung der laufenden Entwicklung der örtlichen Quartiers-Primärenergiekennzahl über mehrere Jahre.

Abb. AI-3.1 stellt diese Vorgehensweise für ein aus einem Nahwärmennetz versorgtes Quartier grafisch dar: Ausgehend vom Nutzenergiebedarf des Gebäudes erfolgt die Bilanzierung über das Gebäude, das Nahwärmennetz und die Nahwärme-Heizzentrale bzw. das Fernwärmennetz unter Nutzung der jeweiligen Kenndaten nach Formel (AI-3.3).

**Abb. AI-3.1:** Schematische Darstellung der (zentralen) Energieversorgungskette eines Quartiers, ausgehend vom Endverbraucher mit den im Text genannten Kenndaten, für verschiedene Optionen der Nutzwärmebereitstellung ( $v_{Hz}$  und  $v_w$  stellen die Verluste der Heizungs- und Warmwasserleitung im Gebäude dar)



In Quartieren mit Nahwärme- oder Fernwärmennetzen muss die Aufwandszahl der Heizzentrale jeweils fallspezifisch, entsprechend der installierten Technik, berechnet werden. Beispielsweise ergibt sich für ein Grundlast-BHKW mit Spitzenlast-Kessel, beide mit Gas betrieben, der Primärenergie-Faktor  $f_{BHKW}$  des Gesamtsystems – frei Heizzentrale – aus der Formel

$$(AI-3.4) \quad f_{BHKW} := \left( \frac{1+s}{\eta_{BHKW}} \cdot f_{Gas} - \frac{s}{\eta_{Mix}} \cdot f_{Mix} \right) \cdot p_{GL} + e_{Ks} \cdot f_{Gas} \cdot p_{SL}$$

mit

- s ... Stromkennzahl des BHKW (kWhel/kWhth)
- $\eta_{BHKW}$  ... Gesamtwirkungsgrad BHKW
- $f_{Gas}$  ... Primärenergie-Faktor Erdgas
- $\eta_{Mix}$  ... el. Wirkungsgrad des Kraftwerks-Mix
- $f_{Mix}$  ... Primärenergiefaktor des Mix an Primärenergieträgern im Kraftwerkspark
- $p_{GL}$  ... Grundlastanteil
- $p_{SL}$  ... Spitzenlastanteil
- $e_{Ks}$  ... Aufwandszahl SL-Kessel,

siehe auch (Annex 51, 2013 und Gesamtstudie Fernwärme, 1977). Der so berechnete Wert für  $f_{BHKW}$  muss in Formel (AI-3.3) für  $f_{EE}$  eingesetzt werden, um den Primärenergieverbrauch eines Gebäudes zu berechnen, das mit Fernwärme aus einem Heizkraftwerk mit einem BHKW

in Grundlast versorgt wird. In diesem Ausdruck für  $f_{\text{BHKW}}$  (AI-3.4) sind die Netzverluste und der Stromaufwand für die Wärmeverteilung, die im o. g. Wert für  $f_{\text{NW}}$  des Nahwärmenetzes Rintheim (Anhang AI-2; (AI-2.2)) bereits enthalten sind, noch nicht berücksichtigt.

## Anhang AI-4 Heizgradtage und Temperaturbereinigung

### AI-4.1 Berechnung des Jahres-Heizenergieverbrauchs mit der Heizgradtag-Methode

Der Wärmeverlust eines Gebäudes hängt im Wesentlichen von dessen über die Hüllfläche gemitteltem U-Wert  $U_m$  bzw. dem nach EnEV korrigierten spezifischen Transmissionsverlust  $H_T$  von der Lüftungsrate  $n_L$  sowie von der Differenz zwischen der Innen- und Außentemperatur,  $t_i - t_a$ , ab. Bei stationärer Betrachtung und unter Vernachlässigung von Sonneneinstrahlung, Windeinfluss, Wärmespeicherung sowie Nutzerverhalten ergibt sich für den Wärmeverlust  $Q$  bei der Außentemperatur  $t_a$  die Formel:

$$(AI-4.1) \quad Q = (H_T A_H + c_L n_L V_L) \cdot (t_i - t_a) \text{ in Watt},$$

wobei  $A_H$  die wärmeübertragende Umfassungsfläche ( $\text{m}^2$ ),  $V_L$  das Luftvolumen des Gebäudes ( $\text{m}^3$ ),  $c_L = 0,34 \text{ Wh}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$  die Wärmekapazität der Luft und  $n_L$  der stündliche Raumluftwechsel ( $\text{h}^{-1}$ ) sind.

An einem Tag mit einer mittleren Außentemperatur beträgt dann die erforderliche Heizenergie  $Q_d$  zur Aufrechterhaltung der Raumtemperatur über 24 Stunden

$$(AI-4.2) \quad Q_d = \frac{24}{1000} (H_T A_H + c_L n_L V_L) \cdot (t_i - \bar{t}_d) (\text{kWh/d}).$$

Für ein Jahr bzw. eine Heizperiode müssen diese  $Q_d$  über die Heiztage des jeweiligen Zeitraums aufsummiert werden:

$$Q_{Hz} = \frac{24}{1000} (H_T A_H + c_L n_L V_L) \cdot \sum (t_i - \bar{t}_d).$$

Die hier enthaltene Summe über  $z$  Tage mit den täglichen Temperaturdifferenzen  $t_i - \bar{t}_d$  heißt Gradtagszahl  $Gt_z$ :

$$(AI-4.3) \quad Gt_z = \sum_d (t_i - \bar{t}_d) (\text{Kd}).$$

Der Heizenergiebedarf  $Q_{Hz}$  (kWh) eines Gebäudes, z. B. über eine Heizperiode, ist demnach proportional zur Anzahl  $Gt_z$  an Gradtagen innerhalb dieses Zeitraums:

$$(AI-4.4) \quad Q_{Hz} = \frac{24}{1000} (H_T A_H + c_L n_L V_L) \cdot Gt_z \text{ (kWh/a).}^{62}$$

Wegen der internen Wärmequellen in einem Gebäude sowie der Sonneneinstrahlung<sup>63</sup> gibt es eine Heizgrenze  $t_{HG}$ , oberhalb der die Wärmeverluste durch Transmission und Lüftung im Tagesdurchschnitt geringer sind als der Wärmegewinn durch diese Wärmequellen, d. h. bei  $\bar{t}_a \leq t_{HG}$  muss nicht geheizt werden.  $t_{HG}$  hängt von der wärmetechnischen Qualität des Gebäudes ab: alte, schlecht gedämmte Häuser haben eine Grenztemperatur  $t_{HG}$  von z.B. 17 °C, während  $t_{HG}$  z. B. bei Passivhäusern bei 10 °C liegen kann. Da die Differenz der mittleren Außentemperatur  $\bar{t}_a$  nicht zur Innentemperatur, sondern zur Heizgrenztemperatur  $t_{HG}$  gezählt wird, reduziert sich der reale Heizenergiebedarf beträchtlich. Zusätzlich reduziert sich die Anzahl der Tage  $z$ , an denen geheizt werden muss. Der reale Heizenergiebedarf in einer Heizperiode ergibt sich daher nicht aus der Gradtagszahl  $Gt_z$ , sondern aus der Anzahl der Heizgradtage HGt, definiert durch

$$(AI-4.5) \quad HGt_z = \sum_d (t_{HG} - \bar{t}_d) \text{ (Kd),}$$

wobei über alle  $z$  Tage aufsummiert wird, an denen die tagesmittlere Außentemperatur  $\bar{t}_d \leq t_{HG}$  ist. Somit erhält man für den Heizenergiebedarf  $Q_{Hz}$  über eine Heizperiode unter Berücksichtigung der inneren Wärmegewinne und der Solareinstrahlung

$$(AI-4.6) \quad Q_{Hz} = \frac{24}{1000} (H_T A_H + c_L n_L V_L) \cdot HGt \text{ (kWh/a),}$$

wenn man für die Berechnung der HGt die korrekte Heizgrenztemperatur  $t_{HG}$  einsetzt (siehe Anhang AI-1).

$$\text{Aus der Umformung } Gt_z = \sum_z (t_i - \bar{t}_k) = \sum_z (t_i - t_{HG} + t_{HG} - \bar{t}_k) = (t_i - t_{HG}) \cdot z + \sum_d (t_{HG} - \bar{t}_d)$$

erhält man eine Beziehung zwischen den HGt und  $Gt_z$ , die es ermöglicht, aus den (meist bekannten  $Gt_z$  und der Anzahl der Heiztage,  $z$ ) für die jeweilige Heizgrenze  $t_{HG}$  eines Gebäudes die gesuchten HGt<sub>HG</sub> zu berechnen:

$$(AI-4.7) \quad HGt_{HG} = GTz - (t_i - t_{HG}) \cdot z$$

Alternativ kann auch die mittlere Außentemperatur  $t_m$  der Heizperiode zur Berechnung von  $Q_{Hz}$  benutzt werden:

$$(AI-4.8) \quad Q_{Hz} = \frac{24}{1000} (H_T A_H + c_L n_L V_L) \cdot z \cdot (t_{HG} - t_m)$$

<sup>62</sup> In der EnEV wird zur Berechnung der Wärmeverluste für die HGt (Kd) der Ausdruck  $FGt = 24/1000 \cdot Gt$  (in kWh/a) benutzt. Für die FGT wird für das „Referenzklima Deutschland“ ein Wert von  $FGT = 24/1000 \cdot GtRef = 66$  kWh/a vorgegeben.

<sup>63</sup> Für die inneren Wärmequellen in Wohngebäuden gibt die EnEV einen Wert von  $q_i = 5$  W pro m<sup>2</sup> Wfl. vor. Die Sonneninstrahlung  $q_s$  während der Heizperiode liegt im Bereich von 10 W pro m<sup>2</sup> Wfl. (Hegner 2002).

Da [AI-4.6] und [AI-4.8] denselben Wert für  $Q_{\text{Hz}}$  ergeben müssen, kann man bei Kenntnis der  $\text{HGt}_{\text{HG}}$  für einen bestimmten Wert von  $t_{\text{HG}}$  die Anzahl der Heiztage  $z$  aus

$$(\text{AI-4.9}) \quad z = \frac{\text{HGt}_{\text{HG}}}{[t_{\text{HG}} - t_m]}$$

berechnen.

## AI-4.2 Rechenhilfen für den Gebäude-Energiemanager

### (1) Benutzungsstunden der Heizung

Mit bekannten  $\text{HGt}_{\text{HG}}$  kann auch die Anzahl an Jahres-Volllast-Benutzungsstunden,  $h_B$ , für die installierte Heizleistung abgeleitet werden:

$$(\text{AI-4.10}) \quad h_B = 24 \cdot \text{HGt}_{\text{HG}} / \Delta t_{\text{HG}} \text{ (h/a)},$$

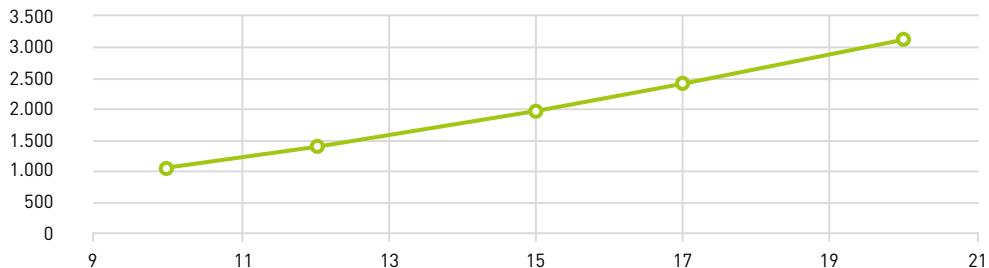
mit  $\Delta t_{\text{HG}} = t_{\text{HG}} - t_N$ , ( $t_N$  ... Norm-Außentemperatur, z. B.  $-12^\circ\text{C}$ ). Im Fall von Karlsruhe, mit  $\text{HGt}_{15}^{20} = 2.053 \text{ Kd}$ , ergibt sich daraus  $h_B = 1.820 \text{ h/a}$ , bzw., mit einer Kesselüberdimensionierung um 10 % zum Ausgleich von Aufheizvorgängen,  $1.640 \text{ h/a}$ . Mit einem durchschnittlichen Warmwasser-Verbrauch frei Heizungskeller von  $27 \text{ kWh/(m}^2\text{.a)}$  und einer installierten Heizleistung für die Warmwasser-Erzeugung von  $15 \text{ W/m}^2$  erhält man als Anhaltswert für die Gesamt-Benutzungsdauer  $h_B$  für Heizung und Warmwasser (Standort Karlsruhe):

$$h_B \approx 1.700 \text{ h/a } (\rightarrow \text{Kap. III.4.6}).$$

### (2) HGt Karlsruhe als Funktion der Heizgrenze $t_{\text{HG}}$

Die  $\text{HGt}_{\text{HG}}$  hängen von der Heizgrenztemperatur  $t_{\text{HG}}$  ab. Abb. AI-4.1 zeigt diese empirische Abhängigkeit unter Nutzung der Messwerte der Wetterstation in Rintheim:

**HGt (Kd) als Funktion der Heizgrenze  $t_{\text{HG}}$**



**Abb. AI-4.1:** Gemessene Anzahl an Heizgradtagen  $\text{HGt}_{\text{HG}}^{20}$  in Karlsruhe (Kd) als Funktion der Heizgrenze  $t_{\text{HG}}$

Die in Abb. AI-4.1 dargestellte Kurve  $HGt(t_{HG})$  kann in dem betrachteten Temperaturintervall durch eine Gerade angenähert werden:

$$(AI-4.11) \quad HGt(t_{HG}) = 200 \cdot t_{HG} - 930 \text{ (Kd).}$$

Pro Änderung von  $t_{HG}$  um  $\pm 1^\circ\text{C}$  ergibt sich demnach eine Änderung der  $HGt$  um  $\pm 200 \text{ Kd}$ . Auf diese Weise können die  $HGt(t_{HG})$  aus den (meist bekannten) lokalen Gradtagen  $Gt$  für verschiedene Heizgrenztemperaturen bestimmt werden.

### **[3] Witterungskorrektur unter Benutzung der HGt**

Durch Bildung der Größe

$$(AI-4.12) \quad h = q_{Hz} / HGt \cdot 1.000 \text{ Wh/(m}^2\text{.Kd}),$$

mit dem spezifischen Heizenergiebedarf  $q_{Hz} = Q_{Hz}/A_{Wfl}$  in  $\text{kWh/m}^2$ , erhält man den spezifischen Heizenergieverbrauch pro Gradtag. Der Wert von  $h$  liefert ein direktes Maß für die energetische Qualität eines bestimmten Gebäudes. Mit dieser Größe kann eine sehr einfache Gradtagszahlbereinigung erfolgen, da  $h$  nur mit dem  $HGt$ -Wert des langjährigen Mittels, in Karlsruhe z. B.  $HGt_{LJM} = HGt_{15}^{20} = 2.053 \text{ Kd}$ , multipliziert werden muss, um den temperaturbereinigten spezifischen Jahres-Heizenergieverbrauch  $h_{t\text{-ber}}$  zu erhalten:

$$h_{t\text{-ber}} = h \cdot HGt_{LJM}$$

Die Größe  $h$  ist in der Wohnungswirtschaft auch nützlich, um den Heizenergiebedarf eines Wohngebäudes über einen bestimmten Zeitraum mit bekannter Heizgradtagszahl zu berechnen, z. B. bei Mieterwechsel: Wenn sich für den spezifischen Heizenergieverbrauch in einem Gebäude, z. B. über den Monat Dezember,  $h_{Dez} = 20 \text{ Wh/(m}^2\text{.Kd)}$  ergeben, und über die Heizperiode eine Heizgradtagszahl von z. B.  $HGt = 1.920 \text{ Kd}$  gemessen wurde, so ist für dieses Gebäude über diese Heizperiode ein Jahresheizenergieverbrauch von

$$q_{Hz} = h_{Dez} \cdot HGt/1000 = 20 \cdot 1.920/1.000 = 38,4 \text{ kWh/m}^2$$

zu erwarten.

## Anhang II: Gebäude- und Quartiersoptimierung

### Anhang AII-1 Optimierung des Wärmeschutzes der Gebäude-Hüllflächen

Im Folgenden werden die Kosten bzw. die erzielbare Wirtschaftlichkeit von „integralen“ energetischen Sanierungsmaßnahmen anhand eines konkreten Gebäudes im Quartier Rintheimer Feld dargestellt, des Gebäudes Heilbronner Str. 27-13 (Abb. AII-1.1), das als Vergleichsgebäude für die beiden Forschungsgebäude dient.



**Abb. AII-1.1:** Vergleichsgebäude  
Heilbronner Str. 27-31 nach  
Sanierung (Foto: VOLKSWOHNUNG 2009)

Das Gebäude hat folgende Eckdaten:

- Baujahr 1956, umfassende Sanierung/Modernisierung 2008
- 5 Vollgeschosse (lichte Höhe  $h_E = 2,35 \text{ m}$ ), Satteldach, Dachgeschoß nicht ausgebaut, 3 Eingänge mit je 10 gleich großen Wohnungen
- Wohnfläche  $2.112 \text{ m}^2$  ( $70,4 \text{ m}^2$  pro Wohnung),  
beheizte Wohnfläche  $2.014 \text{ m}^2$  ( $67,1 \text{ m}^2$  pro Wohnung)

• Hüllflächen:	
• Außenwand	1.143 m <sup>2</sup> (ohne Fensterflächen)
• Fensterflächen	520,8 m <sup>2</sup>
• oberste Geschossdecke	530 m <sup>2</sup>
• Kellerfläche	530 m <sup>2</sup>
• Gesamt-Hüllfläche <sup>64</sup>	2.724 m <sup>2</sup>
• H <sub>T</sub> -Wert der Hüllfläche vor Sanierung <sup>65</sup>	1,61 W/(m <sup>2</sup> .K)
• beheiztes Gebäudevolumen	V <sub>e</sub> = 7.159,6 m <sup>3</sup> ; A <sub>H</sub> /V <sub>e</sub> -Verhältnis: 0,38
• Nutzfläche A <sub>N</sub> nach EnEV:	A <sub>N</sub> = 0,32 · V <sub>e</sub> = 2.191,1 m <sup>2</sup>
• Wärmebereitstellung vor der Sanierung:	Einzel-Gasöfen in den Wohnungen; Gasdurchlauferhitzer zur Warmwasser-Versorgung
• nach Sanierung:	Anschluss an Nahwärmenetz, zentrale Warmwasser-Bereitstellung
• Heizenergieverbrauch vor Sanierung: (Verbrauchsausweis 2005–2007, witterungsbereinigt)	125 kWh pro m <sup>2</sup> beh. Wfl. (Mittelwert 2005–2007)
• Heizenergieverbrauch nach Sanierung:	45 kWh pro m <sup>2</sup> beh. Wfl. (gemessener temperaturbereinigter Mittelwert 2011 und 2012).

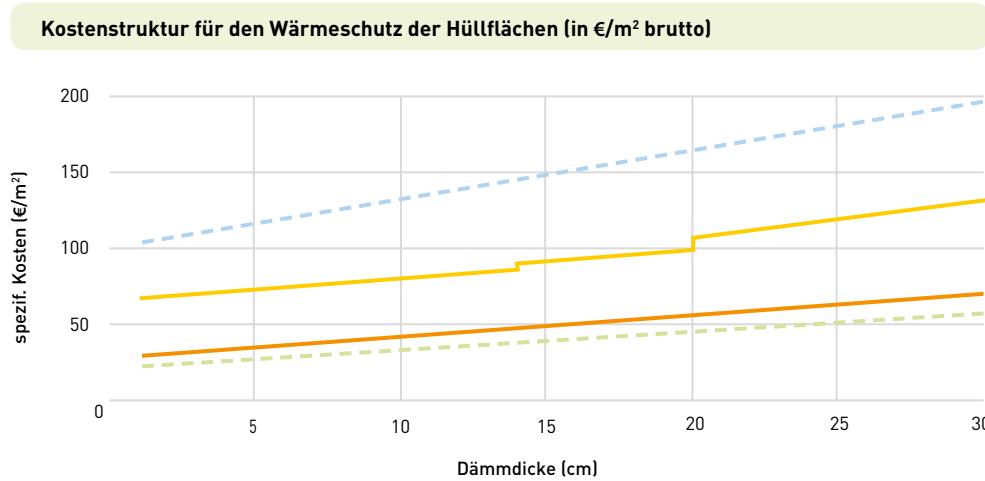
## AII-1.1 Kostenstruktur der Wärmeschutzmaßnahmen

Basis einer wirtschaftlich optimierten energetischen Gebäudesanierung ist die Kostenstruktur für den Wärmeschutz der Hüllflächen. Diese Kosten sind für einzelne Dämmstärken bekannt<sup>66</sup>, aber nicht für beliebige Dicken d<sub>WD</sub>. Unter Annahme eines linearen Kostenanstiegs mit der Dämmdicke d<sub>WD</sub> sowie eines festen Kostensockels (Gerade mit Steigung k, Achsenabschnitt D) können aus den Kostendaten einzelner d<sub>WD</sub>-Werte die Kosten k<sub>WD</sub> der Wärmedämmung als Funktion der Dicke d<sub>WD</sub> entsprechend der Geradengleichung k<sub>WD</sub> = k · d<sub>WD</sub> + D (€/m<sup>2</sup>) abgeleitet werden:

<sup>64</sup> „Wärmetauschende Umfassungsfläche“ A<sub>H</sub> nach EnEV.

<sup>65</sup> H<sub>T</sub> ... mittlerer spezifischer Transmissionswärmeverlust nach EnEV.

<sup>66</sup> Pitzer, O., VOLKSWOHNUNG: Auswertung/Nachkalkulation von Sanierungsprojekten der VOLKSWOHNUNG bzw. Angeboten, 2009



**Abb. All-1.2:** Kostenstruktur für den Wärmeschutz der Hüllflächen (in €/m<sup>2</sup> brutto): Festkosten des Dämmsystems plus variable Kosten in Abhängigkeit von der Dämmdicke, von unten nach oben:

- Dämmung der obersten Geschoßfläche (EPS-Platten mit begehbarer Abdeckung)
- Kellerdecke (EPS<sup>67</sup>-Platten von unten)
- konventionelles Wärmedämmverbundsystem (WDVS) mit EPS-Platten für die Außenwand
- RESOL - WDVS für die Außenwand<sup>68</sup>

Die Koeffizienten der zugehörigen Geradengleichungen für die in Abb. All-1.2 dargestellten Geraden sowie für Vakuumverbund-Isolationspaneele (VIP; nicht in Abb. All-1.2 eingezeichnet) sind in Tab. All-1.1 angegeben.

Die Festkosten  $D$  (€/m<sup>2</sup>) sind i. W. ein Maß für den Arbeitsaufwand zur Anbringung des jeweiligen Wärmedämmssystems. Die Steigung der Geraden für die einzelnen Dämm-Systeme in Tab. All-1.1 gibt jeweils die Kosten für einen zusätzlichen cm an Dämmstärke an. Ein Kostenanstieg von  $k = 1,50$  €/(m<sup>2</sup>· cm) für das EPS-WDVS entspricht Kosten von 150 €/m<sup>3</sup> Dämm-Material (mit einer Dichte von  $\rho_{\text{EPS}} = 20$  kg/m<sup>3</sup>; wären dies ausschließlich Materialkosten, so entspräche dies einem Preis von 7,5 €/kg)<sup>69</sup>. Die Kosten von RESOL ( $k = 3,24$  €/(m<sup>2</sup>· cm)) sind demnach etwa doppelt so hoch wie die von EPS, während sie für Vakuum-Isolationspaneele (VIP) rund 10-mal so hoch sind.

Die Kosten des Fensteraustausches für das Vergleichsgebäude liegen bei 185 €/m<sup>2</sup> (2-Scheiben-Wärmeschutz-Fenster,  $U_w = 1,30$  W/(m<sup>2</sup>·K)) bzw. 250 €/m<sup>2</sup> (3-Scheiben-Passivhaus-Fenster,  $U_w = 0,80$  W/(m<sup>2</sup>·K), nicht Passivhaus-zertifiziert).

<sup>67</sup> EPS ... expandiertes Polystyrol (Styropor)

<sup>68</sup> RESOL ... Phenolharz-Hartschaum

<sup>69</sup> Die Dichte  $\rho$  ist definiert als  $\rho = m/V$  (kg/m<sup>3</sup>); daher ist bei einem Preis von  $p_v$  in €/m<sup>3</sup> der Preis von 1 kg WD-Material,  $p_m$ , gegeben durch  $p_m = p_v/\rho = 150/20 = 7,5$  €/kg.

	Material	Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{WD}$ W/(m·K)	Steigung k €/(m <sup>2</sup> ·cm)	Sockel D €/m <sup>2</sup>
Dämmung der obersten Geschossfläche	Mineralwolle	0,035	1,20	21,5
Kellerdecke, von unten konventionelles Wärmedämmverbundsystem für die Außenwand [bis $d_{WD} = 14 \text{ cm}$ <sup>70</sup> ]	EPS	0,035	1,40	28,2
WDVS für die Außenwand	RESOL <sup>71</sup>	0,022	3,24	100
VIP – Vakuum-Isolations-Element	evakuiertes Kiesel-säure-Granulat	0,010 <sup>72</sup>	17,2	154

**Tab. AII-1.1:** Koeffizienten der Kostengeraden für Wärmedämmmaßnahmen an den Hüllflächen<sup>73</sup> (alle Werte brutto)

## AII-1.2 Wirtschaftliches Optimum der Dämmstärke

### AII-1.2.1 Energieeinsparung durch Wärmedämmung

Die Abb. AII-1.3 auf Seite 95 zeigt eine Gegenüberstellung des mit der Dicke der Wärmedämmung sinkenden U-Wertes des WDVS sowie der mit der Dicke annähernd linear steigenden Kosten.

Abb. AII-1.3 zeigt, dass mit zunehmender Dicke der Wärmedämmung der resultierende Nutzen (= der zusätzliche Wärmewiderstand  $R(d_{WD}) = 1/U(d_{WD})$ ) rasch abnimmt, während die Kosten weiter ansteigen. Somit existiert ein Kostenminimum, also diejenige Dämmstärke, bei der die Einsparkosten (Aufwand in Cent (ct) je eingesparter kWh) am niedrigsten sind.

<sup>70</sup> ab d<sub>WD</sub> ~ 14 cm stufenweiser Anstieg durch Änderung in der Befestigungsart (empirische Kosten, O. Pitzer, VOLKSWOHNUNG)

<sup>71</sup> Phenolharz-Hartschaum

<sup>72</sup> effektiver  $\lambda$ -Wert für VIP/EPS-Verbund-Konstruktion (va-Q-tec Würzburg)

<sup>73</sup> Wagner, D., VOLKSWOHNUNG: Nachkalkulation Sanierungsmaßnahmen Heilbronner Str. 27-31



**Abb. AII-1.3:** U-Wert eines Wärmedämmverbundsystems (EPS) als Funktion der Dicke der Wärmedämmung in cm  
 ■ ( $l_{WD} = 0,035 \text{ W/(m.K)}$ ), linke Skala  
 ■ und spezif. Kosten des Außenwand-WDVS (€ pro m<sup>2</sup> Bauteilfläche), rechte Skala

Zur Ermittlung der Einsparkosten als Funktion der Dämmdicke muss die jährliche spezifische Energieeinsparung  $\Delta E$  (kWh pro m<sup>2</sup> Hüllfläche) als Funktion des U-Wertes berechnet werden. Mit dem Heizgradtag-Ansatz (→ Anhang AI-4) ergibt sich  $\Delta E(d_{WD})$  aus der Differenz der Transmissionsverluste pro m<sup>2</sup> Hüllfläche vor Sanierung (U-Wert  $U_0$ ) und nach Sanierung mit einer Wärmedämmung der Dicke  $d_{WD}$  und mit dem U-Wert  $U(d_{WD})$ :

$$(AII-1.1) \quad \Delta E(d_{WD}) = \frac{24}{1000} \cdot (U_0 - U(d_{WD})) \cdot HGt \text{ (kWh/m}^2\text{.a)},$$

wobei der Wärmedurchgangskoeffizient der Wand vor der Sanierung,  $U_0$ , durch den Kehrwert des Wärmewiderstandes  $R_0$  von N Bauteilschichten mit der Dicke  $d_k$  und dem Wärmeleitwert  $l_k$  gegeben ist (Fischer 2008):

$$(AII-1.2) \quad R_0 = \frac{1}{\alpha_i} + \sum_{k=1}^N \frac{d_k}{\lambda_k} + \frac{1}{\alpha_a} \text{ (K.m}^2\text{)/W.}$$

$\alpha_i$  und  $\alpha_a$  sind die Wärmeübergangswiderstände der angrenzenden Luftschicht innen ( $\alpha_i = 5,88 \text{ W/(m}^2\text{.K)}$  und außen ( $\alpha_a = 25 \text{ W/(m}^2\text{.K)}$ )<sup>74</sup>.

<sup>74</sup> Für horizontale Flächen ist der Wärmeübergangswert  $\alpha_h = 7,69 \text{ W/(m}^2\text{.K)}$ . Die Wärmeübergangswerte sind keine absolut vorgegebenen Werte, sondern hängen von Geometrie und anderen Bedingungen ab. Die angegebenen Werte sind als „Übereinkunft“ in der Fachwelt anzusehen. Der resultierende Wärmeübergangs-Widerstand liegt im Vergleich zum Wärmewiderstand einer gedämmten Wand unter 5 %.

Die Ausgangswerte der Wärmewiderstände  $R_0$  vor Sanierung sind für das Beispiel Heilbronner Str. 27-31:

	Wärme-widerstand R (m <sup>2</sup> .K)/W	Wärmedurchgangs-koeffizient U W/(m <sup>2</sup> .K)	T-Korrektur-faktor (EnEV)
Außenwand	0,95	1,05	1
oberste Geschossdecke	0,40	2,50	0,80
Kellerdecke	0,53	1,89	0,50
Fenster	0,33	3,00	1

**Tab. AII-1.2:** Ausgangswerte der Wärmewiderstände der Hüllflächen des Vergleichsgebäudes.

Daraus ergibt sich vor der Sanierung ein mittlerer U-Wert der Hüllflächen von  $U_m = 1,90 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$  bzw. ein  $H_T$ -Wert für das Gebäude von  $H_T = 1,61 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ .

Eine zusätzliche Dämmschicht (Dicke  $d_{WD}$ , Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_{WD}$ ) erhöht den Wärmewiderstand um  $R(d_{WD})$ :

$$R(d_{WD}) = \frac{d_{WD}}{\alpha_i} \quad [\text{K}\cdot\text{m}^2]/\text{W}.$$

Der Wärmedurchgangswert  $U(d_{WD})$  einer Wand als Funktion der zusätzlichen Wärmedämm-Dicke  $d_{WD}$  folgt aus dem Gesamt-Wärmewiderstand  $R_0 + R(d_{WD})$  mit

$$(AII-1.3) \quad U(d_{WD}) = \frac{1}{R_0 + R(d_{WD})} \quad \text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K}),$$

Damit kann die Heizenergieeinsparung pro m<sup>2</sup> Hüllfläche in Abhängigkeit von  $d_{WD}$  (Formel (AII-1.1)) berechnet werden, wobei hier für die Heizgradtage HGt das langjährige Mittel der Heizgradtage in Karlsruhe mit der Heizgrenze  $t_{HG} = 15^\circ\text{C}$  und der Innentemperatur  $t_i = 20^\circ\text{C}$  ( $HGt_{15}^{20} = 2.053 \text{ Kd}$ ) eingesetzt wird.

Formel (AII-1.1) gilt für alle Hüllflächen, einschließlich der Fenster, wobei in diesem Fall der U-Wert  $U_0$  durch den alten U-Wert des Fensters,  $U_{w0}$ , und der U-Wert  $U(d_{WD})$  durch den U-Wert des neuen Fensters,  $U_w$ , ersetzt werden muss.

### AII-1.2.2 Graue Energie der Wärmedämmung

Die in der Wärmedämmung selbst enthaltene Energie („graue Energie“) stellt eine theoretische Begrenzung der noch sinnvollen Wärmedämm-Dicke dar, da bei großer Dämmdicke, wie Abb. AII-1.3 zeigt, der U-Wert kaum mehr abnimmt: Ab einer bestimmten Grenzdicke der

Wärmedämmung ist der weitere Zuwachs an grauer Energie größer als die Einsparung an Heizenergie. Diese Grenzdicke hängt vom Wärmedämm-Material ab.

Für Polystyrol-Hartschaum (EPS) werden in der Literatur unterschiedliche Werte der enthaltenen grauen Energie angegeben. So geht das PHI (Passivhaus-Institut Darmstadt; Kah, Feist 2005) von einem Energieinhalt von  $e_{gr} = 370 \text{ kWh/m}^3$  aus, während das Institut für Energie der Fachhochschule beider Basel in Muttenz (FHBB 2003) in einer vergleichenden Untersuchung verschiedener Wärmedämm-Materialien einen „Kumulierten Energieaufwand“ (KEA) von  $1.100 \text{ kWh/m}^3$  angibt. Einer neueren Veröffentlichung des Forschungsinstituts für Wirmschutz, München ist eine Übersicht über die Eigenschaften verschiedener Dämm-Systeme zu entnehmen (Sprengard 2013).<sup>75</sup> Für die wichtigsten Dämmstoffe werden dort folgende (gerundete) Werte angegeben:

Dämmstoff	Dichte $r$ kg/m <sup>3</sup>	Wärmeleitfähigkeit $l$ W/(m.K)	Energieinhalt	
			MJ/kg	kWh/m <sup>3</sup>
Mineralwolle	30	0,040	28	230
expandiertes Polystyrol (EPS/Styropor)	20	0,035	50	280
extrudiertes Polystyrol (XPS/Hartschaum)	33	0,033	100	920
Polyurethan-Schaum (PUR)	30	0,028	95	800
Resol (Phenolharz-Hartschaum)	40	0,022	k.A.	k.A.
Vakuumisolationsdämmung (VIP)	190	0,007	25	1.320

**Tab. AII-1.3:** Übersicht über die Kenndaten der wichtigsten Dämmstoffe [Sprengard 2013]

Die „graue Energie“, aufgeteilt auf die technische Lebensdauer, z. B. 40 Jahre, muss von der jährlich erreichten Energieeinsparung, also verringerten Transmissionsverlusten pro m<sup>2</sup> Hüllfläche nach Formel (AII-1.1), abgezogen werden. Damit ergibt sich aus dieser Formel mit den beiden für EPS vom PHI bzw. von der Hochschule BB genannten unterschiedlichen Werten für  $e_{gr}$  die folgende Grafik ohne und mit Berücksichtigung der grauen Energie:

<sup>75</sup> [www.nachhaltigesbauen.de/oekobaudat/](http://www.nachhaltigesbauen.de/oekobaudat/).

### Jährliche Verringerung an Transmissionsverlusten durch die Außenwand

**Abb. All-1.4:** Jährliche Verringerung an Transmissionsverlusten durch die Außenwand (Klimadaten von Karlsruhe) als Funktion der Dämmstärke (EPS)

- ohne Berücksichtigung der „graue Energie“
- mit dem Wert des PHI für  $e_{gr}$ : 370 kWh/m<sup>3</sup>
- mit dem Wert der Hochschule BB für  $e_{gr}$ : 1.100 kWh/m<sup>3</sup>

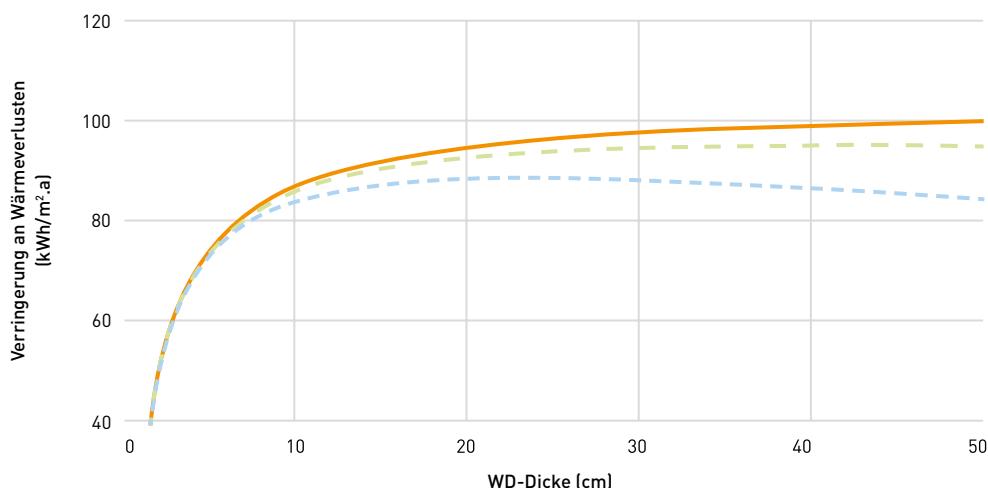


Abb. All-1.4 zeigt, dass je nach Material bzw. nach dem angesetzten Wert für die graue Energie die maximal sinnvolle Wärmedämm-Dicke bei  $d = 42$  cm (PHI) bzw. bei 23 cm (Hochschule BB) liegt<sup>76</sup>, entsprechend U-Werten zwischen 0,07 und 0,12 W/(m<sup>2</sup>.K). Die Abbildung zeigt, dass der Nutzen der Wärmedämmung in jedem Fall jenseits von  $d_{WD} \approx 20$  cm ( $U \approx 0,14$  W/(m<sup>2</sup>.K)) nur mehr gering ist (s. auch Abb. All-1.5).

Die „energetische Amortisationszeit“, also die Zeit, nach der die bei der Herstellung des Dämmstoffes benötigte Energie durch die Energieeinsparung des Gebäudes kompensiert wird, hängt vom Ausgangs-U-Wert der Wand (ohne Wärmedämmung) und von der Dicke der Wärmedämmung ab. Bei „normalen“ Dämmstärken im Bereich zwischen 12 und 20 cm (und schlechtem Ausgangs-U-Wert) liegt sie im Bereich von 0,5 bis 1,5 Jahren.<sup>77</sup>

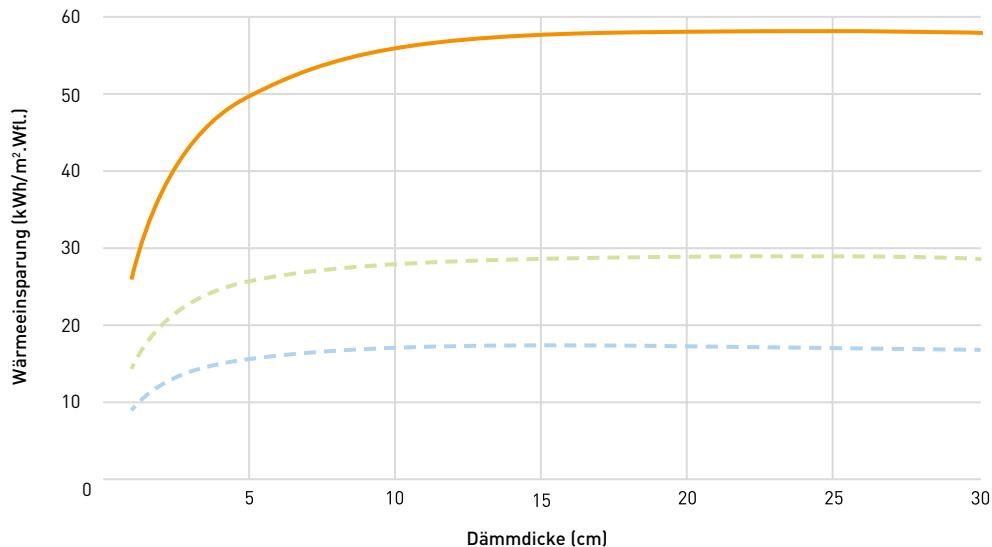
<sup>76</sup> Geht man davon aus, dass das eingesetzte EPS nach Ende der Nutzungsdauer des Gebäudes thermisch genutzt wird (d. h. in einer Müllverbrennungsanlage verbrannt wird, was voraussetzt, dass beim Gebäudeabriß eine entsprechende Materialtrennung erfolgt), kann die graue Energie praktisch vernachlässigt werden und es gilt annähernd die oberste der drei Kurven in Abb. All-1.4.

<sup>77</sup> Nimmt man an, dass das Vergleichsgebäude an allen Hüllflächen mit Ausnahme der Fensterflächen mit 15 cm EPS gedämmt wird, so ergibt sich ein EPS-Volumen von 310 m<sup>3</sup> (oder 10 m<sup>3</sup> pro Wohnung). Je nach der Wahl des in Tab. All-1.3 genannten Energieinhalts von EPS entspricht dies einem Energieaufwand für die Wärmedämmung von 45 bis 120 kWhPE/m<sup>2</sup> Wfl.

### All-1.2.3 Energieeinsparkosten durch Dämmung der Hüllflächen

Bei Kenntnis der Gebäude-Geometrie kann die durch nachträglichen Wärmeschutz der Hüllflächen erreichte Energieeinsparung auf die Wohnfläche  $A_{\text{Wf}}$  bezogen werden. Dies ermöglicht einen Vergleich der Transmissionsverluste durch die einzelnen Hüllflächen. Mit den o. g. Gebäudedaten des Vergleichsgebäudes, Heilbronner Str. 27-31, und mit den Formeln (All-1.1) bis (All-1.3) erhält man für Außenwand, oberste Geschossdecke und Kellerdecke die in Abb. All-1.5 gezeigte Abhängigkeit der Verringerung an spezifischen Transmissionsverlusten ( $\text{kWh}/\text{m}^2 \text{Wfl.}$ ) von der Dämmdicke  $d_{\text{WD}}$  (cm). Daraus kann man ablesen, dass mit den hier angesetzten Ausgangs-U-Werten bei einer Wärmedämmung aller Hüllflächen von z. B. 15 cm in der Summe eine Verringerung an Transmissionsverlusten von rund 100 kWh pro  $\text{m}^2 \text{Wfl.}$  erreicht wird, wobei – für dieses Vergleichsgebäude – die Einsparwirkung für eine vorgegebene Dämmdicke der Außenwand größer ist als die durch Wärmedämmung der obersten Geschossdecke und der Kellerdecke erreichte Einsparung zusammen.

#### Rechnerische Wärmeeinsparung $\Delta E$ durch nachträglichen Wärmeschutz (WLG 035)



**Abb. All-1.5:** Rechnerische Wärmeeinsparung  $\Delta E$  durch nachträglichen Wärmeschutz (WLG 035) nach Formel (All-1.1) bezogen auf die Wohnfläche ( $\text{kWh}/\text{m}^2 \text{Wfl.}$ ) für das Vergleichsgebäude unter Berücksichtigung der „grauen Energie“ ( $e_{\text{gr}} = 1.100 \text{ kWh}/\text{m}^3$ )

- Außenwand
- oberste Geschoßfläche
- Kellerdecke

Die Energieeinsparung durch Fenstererneuerung beträgt für das Vergleichsgebäude nach (All-1.1)  $\Delta E_w = 25 \text{ kWh}/\text{m}^2 \text{Wfl.}$  (2-fach-Verglasung) bzw. für die 3-fach-Verglasung:  $\Delta E_w = 31 \text{ kWh}$  pro  $\text{m}^2 \text{Wfl.}$  ( $U_w$ -Wert des ursprünglichen Fensters:  $U_{w0} = 3,4 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ).

Aus der jeweils erreichbaren Verringerung der Transmissionsverluste (Abb. All-1.5) und den bekannten Kosten (Abb. All-1.2) kann das wirtschaftliche Optimum der Wärmedämmung der einzelnen Hüllflächen berechnet werden: Das Maß für die Wirtschaftlichkeit sind in diesem Fall die „Einsparkosten“  $e(d_{WD})$  in Abhängigkeit von der Dämmdicke  $d_{WD}$  in ct/kWh. Diese erhält man, indem die sich aus der Investition pro  $m^2$  Hüllfläche ergebenden Jahreskosten  $k_a = \text{Inv}(d_{WD}) \cdot a$  (a ... Annuität) durch die erzielte Energieeinsparung  $\Delta E(d_{WD})$  nach Formel (All-1.1) dividiert werden (Kah, Feist 2005):

$$(All-1.4) \quad e(d_{WD}) = \frac{k_a}{\Delta E(d_{WD})} = \frac{1000}{24} \cdot \frac{\text{Inv}(d_{WD}) \cdot a}{(U_0 - U(d_{WD})) \cdot HGt},$$

mit dem Annuitätsfaktor a:

$$a = \frac{q-1}{1-q^{-N}}$$

(Diskontierungsfaktor  $q = 1+p/100$  mit dem Zinssatz p, hier mit 4 % angenommen; Abschreibungszeit N Jahre) und der spezifischen Investition  $\text{Inv}(d_{WD})$  in €/ $m^2$  Hüllfläche für die Wärmedämmung der Dicke  $d_{WD}$  (berechnet mit den Daten von Tab. All-1.1). Als Ergebnis dieser Rechnung werden in Abb. All-1.6 die resultierenden Einsparkosten  $e(d_{WD})$  als Funktion der Dämmdicke für Abschreibungszeiten von N = 40 Jahren (linkes Bild) bzw. 20 Jahren (rechtes Bild) angegeben:

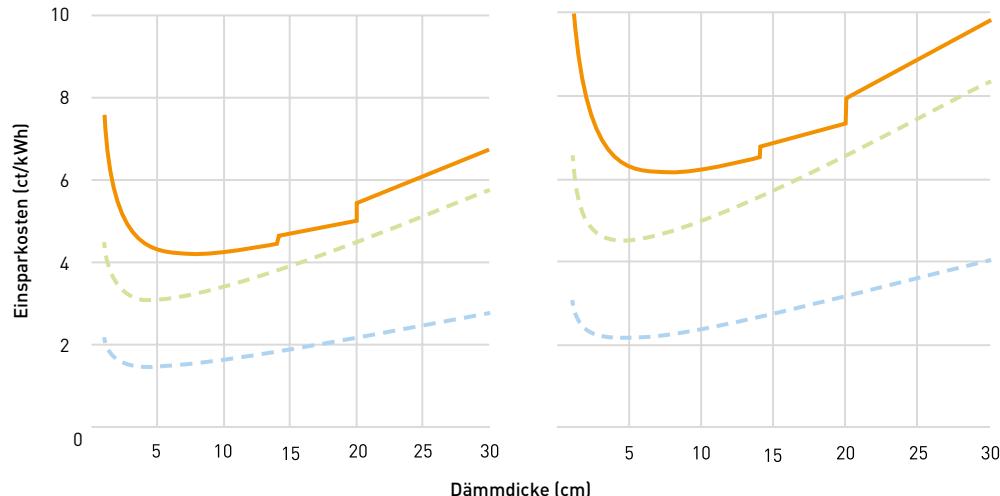
#### Einsparkosten $e(d_{WD})$ durch Wärmedämmung der Hüllflächen in ct/kWh

**Abb. All-1.6, links:** Einsparkosten  $e(d_{WD})$  durch Wärmedämmung der Hüllflächen in ct/kWh

- Außenwand-Wärmedämmverbundsystem
- Kellerdecke
- oberste Geschossdecke mit einer Abschreibungszeit von N = 40 Jahren;

**Abb. All-1.6, rechts:**

Abschreibungszeit 20 Jahre; jeweils ohne Berücksichtigung der „grauen Energie“



Bei einer Lebenszyklusbetrachtung (Life Cycle Analysis, LCA) würde man z. B. mit  $N = 40$  Jahren kalkulieren, woraus sich bei der wirtschaftlich optimalen Dämmstärke der Außenwand von  $7,5 \text{ cm}$ <sup>78</sup> Einsparkosten von unter  $5 \text{ ct/kWh}$  ergeben ( $6,1 \text{ ct/kWh}$  bei einer Abschreibungszeit von 20 Jahren). Dies bedeutet, dass beim Wärmepreis des Jahres 2013 (HEL:  $8,5 \text{ ct/kWhHu}$  brutto) die Jahrestkosten der wirtschaftlich optimalen Einsparinvestition deutlich niedriger sind als der Einkauf von Energie zur Erzeugung der Heizwärme.

Das Kostenminimum ist – wie allgemein bekannt – sehr flach: Die Einsparkosten liegen im Falle des Wärmedämmverbundsystems bis zu einer Grenzdicke von  $d_{WD} = 27 \text{ cm}$  oder  $U_{AW} = 0,12 \text{ W/(m}^2\text{K)}$  unterhalb der aktuellen Kosten der Wärmeerzeugung mit leichtem Heizöl<sup>79</sup> (Abb. All-1.6 rechts: 20 Jahre Abschreibung). Beim heutigen Preis für HEL bzw. Erdgas und LCA-Betrachtung wären für die Dämmung der obersten Geschossdecke sogar noch Dämmstärken mit  $d_{WD} \rightarrow 40 \text{ cm}$  wirtschaftlich, wegen des ab ca.  $15 \text{ cm}$  nur mehr sehr geringen Nutzeffektes aber nicht unbedingt sinnvoll, wie Abb. All-1.5 zeigt. Beim WDVS für die Außenwand und einer Kostenstruktur, wie in Abb. II-1.3 dargestellt, sollte deshalb die Dämmstärke auf das Erreichen der ersten WDVS-Kostenstufe, d. h. ca.  $15 \text{ cm}$ , beschränkt werden: Die nachteilige Wirkung noch größerer Dämmstärken („Schießcharteneffekt“, zusätzlicher Verbrauch an Volumen) muss dem geringen zusätzlichen Nutzen gegenübergestellt werden. Lediglich bei der Dämmung der obersten Geschossdecke sind Dämmstärken jenseits von  $20 \text{ cm}$  sinnvoll. An der Kellerdecke des Vergleichsgebäudes ist die Dämmstärke wegen der bereits geringen lichten Höhe der Kellerräume im Vergleichsgebäude begrenzt auf maximal  $10 \text{ cm}$ .

Maßgeblich für die energetische Qualität ist der mit der jeweiligen Dämmstärke erreichte U-Wert. Die Abhängigkeit der Einsparkosten vom U-Wert wird in Abb. All-1.7 als Funktion von  $d_{WD}$  dargestellt, links für Außenwand, Kellerdecke und oberste Geschossdecke, rechts für Außenwand-WDVS mit EPS im Vergleich zu RESOL, jeweils mit den Kostenfunktionen aus Abb. All-1.2. Diese Darstellung zeigt besser als Abb. II-1.6, wie schnell sich das Kosten/Nutzenverhältnis unterhalb eines U-Wertes von etwa  $0,10 \text{ W/(m}^2\text{K)}$  bis  $0,15 \text{ W/(m}^2\text{K)}$  (Außenwand) verschlechtert.

Der vor wenigen Jahren neu eingeführte Dämmstoff RESOL (Hartschaum aus Phenolharz) ermöglicht es infolge eines sehr guten Wärmeleitkoeffizienten,  $l = 0,022 \text{ W/(m.K)}$ , die Dämmstärke bei gleichem U-Wert wie EPS ( $l = 0,035 \text{ W/(m.K)}$ ) um ca. 30 % zu reduzieren. RESOL weist aber deutlich höhere Kosten auf, wie die Abb. All-1.2 bzw. Abb. All-1.7 [rechtes Bild] zeigen: Erst bei  $U \approx 0,07 \text{ W/(m}^2\text{K)}$  würde theoretisch Kostengleichheit erreicht, d. h. bei ca.  $45 \text{ cm}$  EPS bzw.  $30 \text{ cm}$  RESOL<sup>80</sup>.

<sup>78</sup> Für  $d_{WD} = 7,5 \text{ cm}$  erhält man aus Abb. All-2.3 einen U-Wert von  $0,38 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ .

<sup>79</sup> Der durchschnittliche Heizöl-Preis lag im Zeitraum 2011 – 2013 bei  $8,6 \text{ ct/kWh}$  brutto [[www.tecson.de](http://www.tecson.de)]. Mit einem Kesselwirkungsgrad von 90 % (Brennwertkessel) resultieren daraus Wärmeerzeugungskosten von  $9,6 \text{ ct/kWh}_{th}$ .

<sup>80</sup> Wegen des wesentlich höheren Kostenstocks von RESOL (D-Wert in Tab. All-1.1) ist RESOL grundsätzlich deutlich teurer als ein WDVS mit EPS; bei gleichem Kostenstock dürfen die Materialkosten von RESOL um den Faktor 1,7 höher als die Materialkosten von EPS sein, wenn die Einsparkosten etwa gleich hoch liegen sollen.

### Einsparkosten als Funktion des erreichten U-Wertes

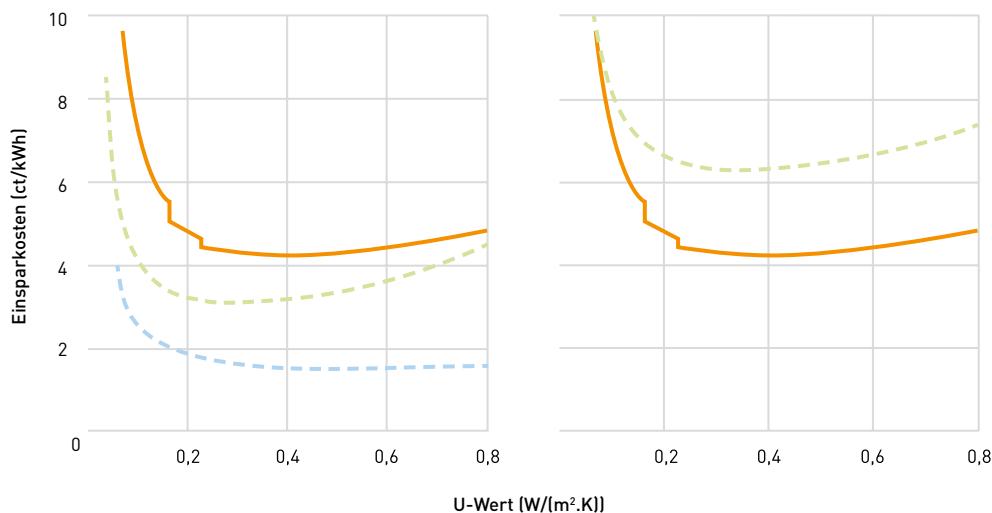
**Abb. AII-1.7, links:**

Einsparkosten als Funktion des erreichten U-Wertes bei „LCA“-Betrachtung (40 Jahre Abschreibung):

- Außenwand im Vergleich zu
- oberster Geschossdecke bzw.
- Kellerdecke jeweils mit EPS

**Abb. AII-1.7, rechts:**

- Vergleich WDVS Außenwand mit EPS im Vergleich zu
- RESOL als Dämmmaterial



Für die Einsparkosten durch Fenstererneuerung kann dieselbe Betrachtung angestellt werden: Die Energieeinsparung  $\Delta E_w$  pro m<sup>2</sup> Fensterfläche ergibt sich<sup>81</sup> aus

$$\Delta E_w = \frac{24}{1000} \cdot (U_{w0} - U_w) \cdot HGt \text{ (kWh/m}^2\text{)}.$$

Mit Investitionskosten von 185 €/m<sup>2</sup> (2-Scheibenfenster,  $U_w = 1,30 \text{ W/(m}^2\text{.K)}$ ) bzw. 250 €/m<sup>2</sup> (3-Scheiben-Fenster,  $U_w = 0,80 \text{ W/(m}^2\text{.K)}$ ) ergeben sich bei LCA-Betrachtung (25 Jahre Lebensdauer der Fenster;  $U_{w0} = 3,5 \text{ W/(m}^2\text{.K)}$ ) mit Formel (AII-1.4) Einsparkosten von ca. 11 ct/kWh bzw. 12 ct/kWh, d. h. Passivhaus-Fenster sind etwas unwirtschaftlicher als 2-Scheiben-Fenster, und für beide Fenstertypen liegen die Einsparkosten bei heutigen Energiepreisen (noch) höher als die aktuellen Kosten der Wärmebereitstellung.

<sup>81</sup> Ohne Berücksichtigung einer möglichen Verringerung der Fugenverluste durch den Ersatz undichter Fensters durch dicht schließende Fenster.

## AII-1.3 Gebäudebetrachtung

### AII-1.3.1 Heizenergieverbrauch

Bisher wurde nur die Wärmetransmission durch einzelne Teile der Gebäudehüllfläche behandelt. Es geht jedoch um den Heizenergieverbrauch des Gebäudes insgesamt bzw. dessen Verringerung durch die möglichst kosteneffiziente Kombination einzelner Maßnahmen. Dazu muss der Nutzen der einzelnen Maßnahmen verglichen werden mit deren Kosten, um die Maßnahmenkombination mit den niedrigsten Gesamtkosten herauszufinden.

Die Ermittlung des Jahres-Heizenergieverbrauchs eines Gebäudes erfolgt nach DIN V 4108 oder DIN V 18599, Energetische Bewertung von Gebäuden. Die dort vorgegebenen Ansätze wurden aus Simulationsmodellen abgeleitet und stehen für den Planer in Form von Planungspaketen zur Verfügung (Lichtmeß 2010).<sup>82</sup> Zur Auswertung erfordert die jeweilige Software umfangreiche Daten zur Geometrie bzw. Bauphysik des betrachteten Gebäudes. Damit kann die Energiebilanz eines Gebäudes berechnet werden. Kosten spielen dabei keine Rolle.

Diese Planungspakete sind daher für eine Optimierungsanalyse wenig geeignet. Daher wurde von der VOLKSWOHNUNG ein Näherungsverfahren entwickelt, mit dem eine vereinfachte Gesamtbetrachtung des Gebäudes und der resultierenden Gesamtkosten für unterschiedliche Energiemaßnahmen angestellt werden kann.

Dieser Ansatz dient dazu, mit wenigen Daten (z. B. vereinfachte Gebäudegeometrie: quaderförmiges Gebäude mit glatten Hüllflächen) und plausiblen Annahmen, die an den Vorgaben der EnEV orientiert sind, für verschiedene Typen von Mehrfamilienhäusern eine Berechnung der Gesamtkosten zur Deckung des Heizenergiebedarfs zu ermöglichen, die bei unterschiedlichen Wärmeschutz-Kombinationen entstehen. Er wird im Folgenden auf das Vergleichsgebäude Heilbronner Str. 27-31 angewendet.

Die Näherung geht vom stationären 1-Zonen-Modell aus, für das der Heizenergiebedarf eine Funktion des  $H_T$ -Wertes des Gebäudes und der Anzahl der Heizgradtage HGt ist, siehe Formel (AI-4.6) in Anhang AI-4:

$$(AII-1.5a) \quad Q_{HZ} = \frac{24}{1000} \cdot (H_T A_H + C_L n_L V_L) \cdot HGt \text{ (kWh/a)},$$

wobei die HGt für eine bestimmte Heizgrenztemperatur  $t_{HG}$ , meistens 15 °C, eingesetzt werden (Bedeutung der Formelzeichen siehe Anhang AI-4). Allerdings hängen die HGt vom  $H_T$ -Wert des betreffenden Gebäudes ab: Je besser (= niedriger) der Transmissionskoeffizient  $H_T$ , desto niedriger  $t_{HG}$ , definiert als die tagesmittlere Außentemperatur, bei der die inneren

<sup>82</sup> Siehe auch: „EnerCALC – vereinfachte Energiebilanzen nach DIN V 18599“, [www.enob.info/tools](http://www.enob.info/tools) oder PHPP (Passivhaus-Projektierungspaket, [www.passiv.de](http://www.passiv.de)).

Wärmequellen  $q_i$  und die Solareinstrahlung  $q_s$  die Wärmeverluste des Gebäudes durch Transmission und Luftwechsel im Tagesmittel gerade ausgleichen.

Mit niedrigerer Heizgrenztemperatur sinkt wiederum die Heizgradtagszahl HGt (siehe Abb. AI-4.1), sodass  $Q_{Hz}$  nicht mehr linear von  $H_T$  abhängt, wie es aus Formel (AI-1.5) eigentlich hervorgeht, weil  $H_T$  auch in die Berechnung der HGt eingeht. Zur Berechnung von  $q_{Hz}$  muss demnach die Abhängigkeit der Heizgrenztemperatur  $t_{HG}$  von  $H_T$  gefunden werden, um mit diesem Wert für  $t_{HG}(H_T)$  die zugehörigen HGt zu berechnen.

Setzt man in Formel (AI-4.1) von Anhang AI-4 für  $t_i$  die Heizgrenze  $t_{HG}$  ein, dann ist der spezifische Wärmeverlust des Gebäudes im Tagesmittel per definitionem gleich der Summe der inneren Wärmequellen  $q_i$  und der externen Einstrahlung  $q_s$  (W/m<sup>2</sup> Wfl.):

$$(AI-1.5) \quad q_i + q_s = [A_H \cdot H_T + c_L \cdot n_L \cdot V_L] \cdot (t_i - t_{HG}) / A_{Wfl}.$$

Erfahrungsgemäß liegt die Heizgrenze für ältere Mehrfamilienhäuser mit einem  $H_T$ -Wert von 1,5 bis 2,0 W/(m<sup>2</sup>.K) bei 15 bis 16 °C. Mit  $H_T = 1,61$  für das Vergleichsgebäude,  $t_i = 21$  °C und  $t_{HG} = 15,5$  °C ergibt sich aus (AI-1.5)  $q_i + q_s = 14,2$  W/m<sup>2</sup> Wfl. Da  $q_i$  laut EnEV bei etwa 5 W/m<sup>2</sup> Wfl. liegt, beträgt die tagesmittlere Sonneneinstrahlung bei der Außentemperatur 15,5 °C etwa  $q_s \sim 9$  W pro m<sup>2</sup> Wfl.

Damit kann  $t_{HG}$  als Funktion von  $H_T$  dargestellt werden (siehe auch Abb. AI-1.8):

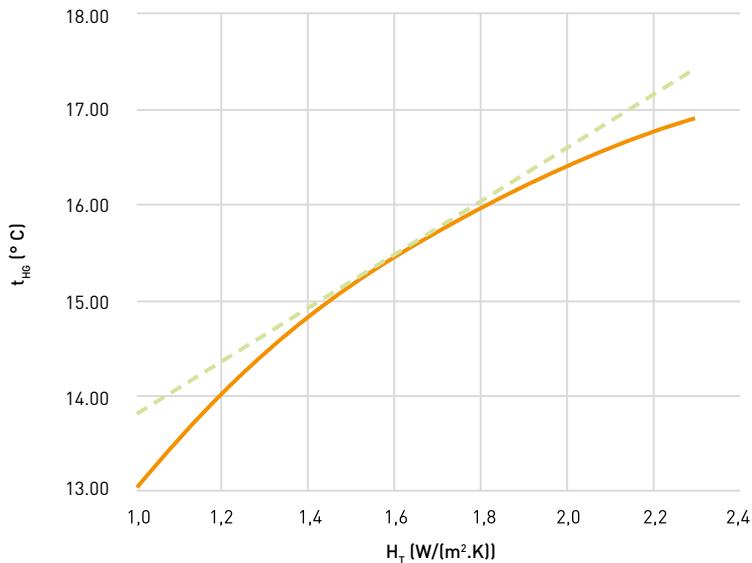
$$(AI-1.6) \quad t_{HG} = t_i - \frac{(q_i + q_s) \cdot A_{Wfl}}{A_H \cdot H_T + c_L \cdot n_L \cdot V_L} \text{ °C}$$

$q_s$  in (AI-1.6) ist jedoch nicht konstant: Bei einer tagesmittleren Außentemperatur von weniger als 15 °C wird  $q_s$  kleiner, bei höherer Außentemperatur nimmt  $q_s$  zu, d. h. die Krümmung der Kurve in Abb. AI-1.8 ist in Wirklichkeit geringer. Im Näherungsmodell der VOLKSWOHNUNG wird angenommen, dass die lineare Näherung an  $t_{HG}(H_T)$  an der Heizgrenze, dargestellt durch die Tangente an die Kurve in diesem Punkt, das reale Verhalten von  $t_{HG}(H_T)$  beschreibt.

Nach Abb. AI-4.1 sind die HGt wiederum linear abhängig von  $t_{HG}$ . Die gesuchte Abhängigkeit von  $HGt(H_T)$  ergibt sich durch Kombination der beiden zugehörigen Geradengleichungen, mit folgendem empirischen Ergebnis für das Vergleichsgebäude:

$$(AI-1.7) \quad HGt(H_T) = 555,8 \cdot H_T + 1.272 \text{ (Kd).}$$

### Heizgrenztemperatur $t_{HG}$ des Vergleichsgebäudes



**Abb. All-1.8:** Heizgrenztemperatur  $t_{HG}$  des Vergleichsgebäudes als Funktion von  $H_T$  nach Formel (All-1.6), orangefarbene Kurve bzw. in linearer Näherung: Tangente<sup>83</sup> im Punkt  $H_T = 1,61 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$

Um mit diesem Näherungsmodell den gesuchten Heizwärmeverbrauch  $Q_{Hz}$  [kWh/a] oder den spezifischen Wert  $q_{Hz}$  [kWh/m<sup>2</sup>] zu erhalten, muss der gefundene Ausdruck für HGt( $H_T$ ) aus (All-1.7) in Formel (Al-4.6) bzw. in

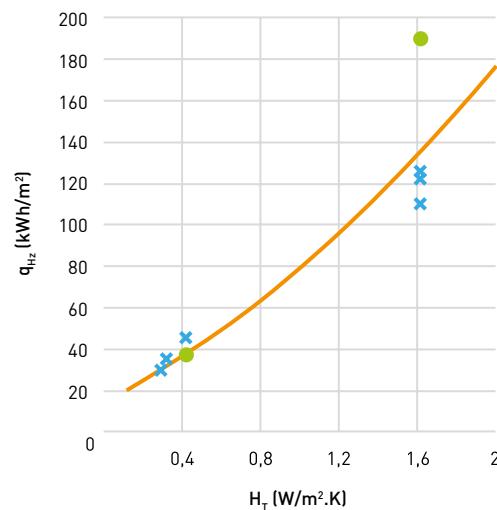
$$(All-1.8) \quad Q_{Hz} = \frac{24}{1000} \cdot \frac{A_H \cdot H_T + c_L \cdot n_L \cdot V_L}{A_{Wfl}} \cdot HGt(H_T) \text{ (kWh pro m}^2 \text{ Wfl.)}$$

eingesetzt werden. Dieser empirische Berechnungsansatz der VOLKSWOHNUNG liefert die in Abb. All-1.9 (Seite 106) gezeigte Kurve.

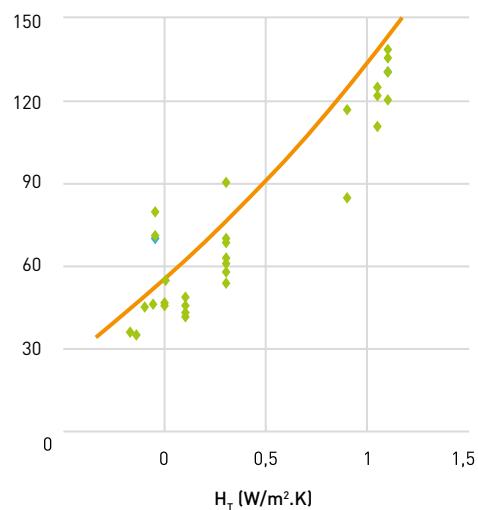
<sup>83</sup> Die Tangente ist für das hier besprochene Vergleichsgebäude gegeben durch die 1. Ableitung von  $t_{HG}(H_T)$  nach  $H_T$  aus Formel (All-1.6) im Punkt  $H_T = 1,61 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  mit  $q_s = 9,22 \text{ W}/\text{m}^2$ .

### Spez. Heizenergiebedarf als Funktion von $H_T$

**Abb. AII-1.9, links:** Spezifischer Heizenergiebedarf als Funktion von  $H_T$  nach dem Näherungsmodell der VOLKSWOHNUNG; ebenfalls eingetragen sind die empirischen Werte der drei Gebäude Heilbronner Str. 27-31<sup>84</sup>, Heilbronner Str. 33-37 und Mannheimer Str. 43-47 vor und nach der Sanierung sowie die nach EnEV berechneten Werte für das Gebäude Heilbronner Str. 27-31 (grüne Punkte) vor und nach Sanierung.<sup>85</sup>



### Vergl. der Näherungskurve für $q_{Hz}(H_T)$



**Abb. AII-1.10, rechts:** Vergleich der Näherungskurve für  $q_{Hz}(H_T)$  mit empirischen Daten für 30 Gebäude in Rintheim aus 2012 (Gebäude mit demselben  $H_T$ -Wert sind unterschiedliche Gebäude gleichen Typs)

Formel (AII-1.8) kann grundsätzlich für beliebige Mehrfamilienhäuser angewendet werden. Abb. AII-1.10 (oben rechts) zeigt den Vergleich der Heizenergieverbräuche 2012 von 30 Gebäuden in Rintheim, aufgetragen über ihrem  $H_T$ -Wert, mit dem Ergebnis der Näherungsrechnung nach dem oben beschriebenen Modell.

Dieses Ergebnis scheint eine grobe Übereinstimmung des Näherungsmodells mit den gemessenen Daten zu zeigen, allerdings gibt es auch größere Abweichungen. Einerseits ist jedoch die Zuverlässigkeit der hier benutzten Daten aus dem Jahr 2012 unsicher (Datenzuordnung: nur Heizung oder Heizung plus Warmwasser? Witterungsbereinigung?  $H_T$ -Werte korrekt?), andererseits müsste man eigentlich für jedes Gebäude (unterschiedliche Geometriedaten in Formel (AII-1.8)) eine eigene  $q_{Hz}(H_T)$ -Kurve berechnen. Die Grafik zeigt jedenfalls, dass diese Daten im Einzelnen noch genauer überprüft werden müssen. Dies wird hier nicht weiter behandelt; es ist aber ein Beispiel für die Sinnhaftigkeit des Energiecontrollings, das es ermöglicht, mit einer durchdachten Analyse mögliche Schwachstellen im Gebäudebetrieb aufzudecken.

<sup>84</sup> Aufgrund der Ofen-Einzelheizungen des unsanierten Gebäudes kann man annehmen, dass sich die Nutzer vor der Sanierung eher sparsam verhalten haben; durch unnötige „Sommerheizung“ (ca. 3–4 kWh/m<sup>2</sup> gemessen) ist der Heizenergieverbrauch nach der Sanierung im Vergleichsgebäude etwas zu hoch.

<sup>85</sup> Für die beiden Forschungsgebäude wurde der Heizenergieverbrauch ohne „Sommerheizung“ sowie einschließlich (geschätztem) Gewinn aus der Wärmerückgewinnung eingesetzt (siehe Kap. IV.7).

Mit diesem empirischen Modell kann für jeden Gebäudetyp die Wirkung von kombinierten Einsparmaßnahmen an allen Hüllflächen näherungsweise berechnet werden. Abb. All-1.11 zeigt den Verlauf des Heizenergiebedarfs  $q_{Hz}$  des Vergleichsgebäudes nach Formel (All-1.8), wenn die Wärmedämmung an allen Hüllflächen gleichzeitig schrittweise erhöht wird und vorab die Fenster durch 2-Scheiben-Fenster,  $U_w = 1,30 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ , bzw. Passivhaus-Fenster, ( $U_w = 0,80 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ , untere Kurve, ausgetauscht werden. Wie bereits oben anhand der Einzelflächen festgestellt, sinkt ab Dämmstärken von 15 bis 20 cm der Heizenergiebedarf mit zunehmender Dämmstärke  $d_{WD}$  nur mehr geringfügig ab. Die Einsparwirkung des Übergangs von 2-Scheiben-Fenstern auf Passivhaus-Fenster liegt in diesem Fall bei etwa 6 kWh/m<sup>2</sup> Wfl.



**Abb. All-1.11:** Entwicklung des Heizenergiebedarfs  $q_{Hz}$  (kWh/m<sup>2</sup> Wfl.) des Vergleichsgebäudes mit zunehmender Dicke der Wärmedämmung ( $l_{WD} = 0,035 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ) bei vorangegangenem Austausch der vorhandenen Fenster durch  
■ 2-Scheiben-Wärmeschutz-Fenster bzw. durch  
■ Passivhaus-Fenster berechnet mit Formel (All-1.8)

### All-1.3.2 Wirtschaftlichkeit von energetischen Verbesserungsmaßnahmen der Hüllfläche

Mit bekannten Kosten für die Wärmeschutz-Maßnahmen der Gebäudehülle (siehe Tab. All-1.1) können mit der oben beschriebenen Näherung die Gesamtkosten zur Deckung des Heizenergiebedarfs für unterschiedliche Wärmedämm-Strategien berechnet werden. Diese Kosten ergeben sich aus der Summe der Kapitalkosten für Fenstertausch und Dämm-Maßnahmen an den Hüllflächen und den aus der Deckung des resultierenden Heizenergiebedarfs  $q_{Hz}(H_T)$  resultierenden Energiekosten.

Für das Vergleichsgebäude zeigt Abb. All-1.12 die Entwicklung der Kapitalkosten, der jährlichen Energiekosten und der resultierenden jährlichen Gesamtkosten (€/m<sup>2</sup> Wfl.) unter der

Annahme der Wärmeerzeugung mit einem Heizkessel – weil dies der allgemeinste Fall ist – mit einem Wirkungsgrad von 86 % und einem Brennstoffpreis von 8,5 ct/kWhHu.

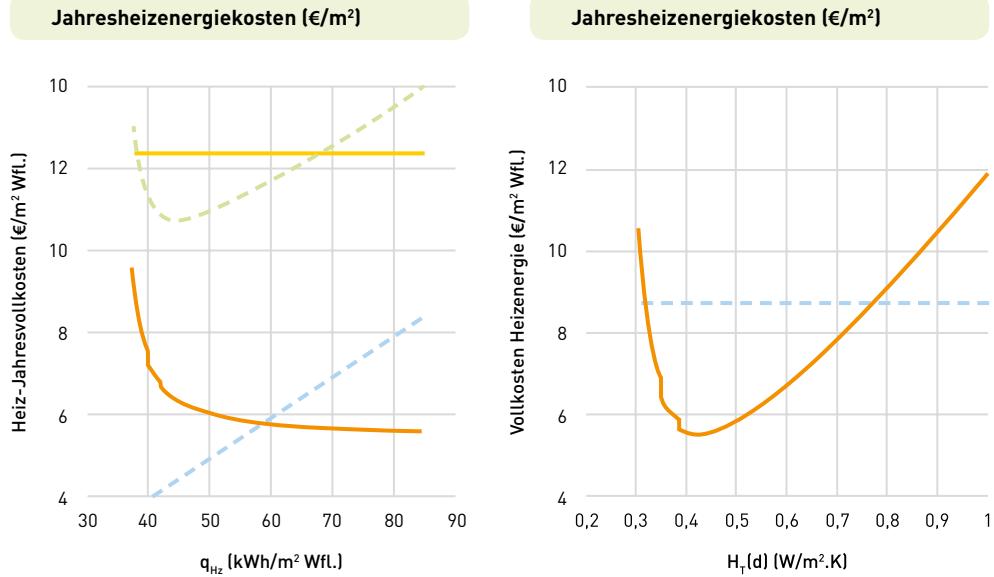
**Abb. All-1.12, links:** Jahreskosten ( $\text{€}/\text{m}^2 \text{Wfl.}$ )

- für (von rechts nach links) zunehmende Wärmedämmung und Fenstererneuerung mit 2-Scheiben-Fenster (durchgezogene Kurve),
- █ Kosten der Heizenergiebedarfsdeckung (linear fallende Gerade) und
- █ resultierende Jahres-Vollkosten als Summe der Kapital- und Energiekosten über dem Jahresheizenergieverbrauch  $q_{Hz}$ .

Die Kurven sind von rechts nach links zu lesen (schrittweise Zunahme der Dämmstärke).

- Energiekosten zur Deckung des gemessenen Heizenergiebedarfs des Vergleichsgebäudes von  $q_{Hz} = 125 \text{ kWh}/\text{m}^2$  vor der Sanierung.

**Abb. All-1.12, rechts:** Vollkosten aufgetragen über dem mit zunehmender Dämmdicke  $d_{WD}$  sinkenden Gebäude-Transmissionskoeffizienten  $H_T(d_{WD})$ ; auch hier zum Vergleich die reinen Heizenergiekosten ohne Sanierung (waagrechte Linie)

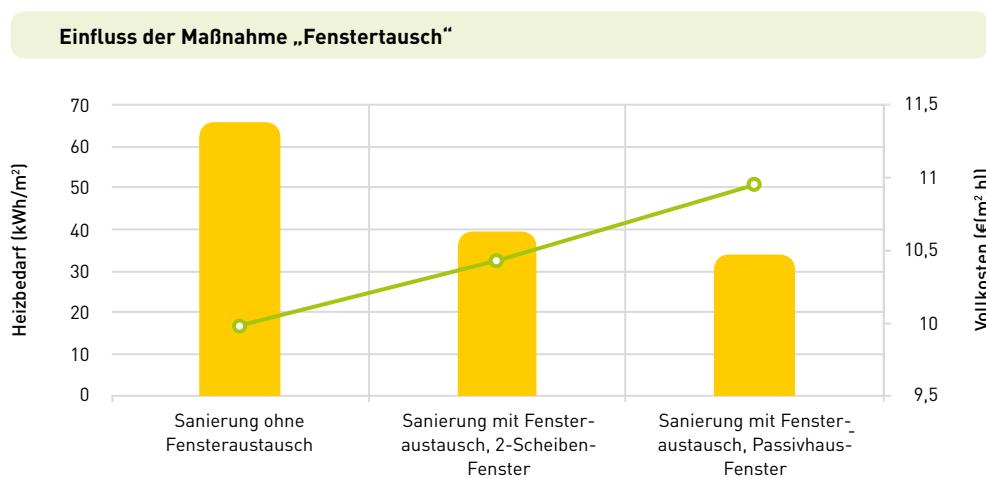


Das Minimum der Vollkosten des Vergleichsgebäudes liegt nach Abb. All-1.12 (rechtes Bild) bei einem  $H_T$ -Wert von  $0,42 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  und tritt bei einer Dämmstärke für Außenwand und oberste Geschossdecke von 13 cm bzw. für die Kellerdecke von 9 cm (bei gleichzeitigem Austausch der vorhandenen Fenster durch 2-Scheiben-Wärmeschutz-Fenster [ $U_w = 1,30 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ]) auf. Dies erfordert Investitionen von ca.  $120 \text{ €}/\text{m}^2 \text{ Wfl.}$  Die resultierenden Gesamtkosten (Kapitalkosten plus Energiekosten) liegen dann bei  $10,43 \text{ €}/\text{m}^2 \text{ Wfl.}$  oder  $0,87 \text{ €}/(\text{m}^2 \cdot \text{Monat})$ . Ohne Sanierung liegen die Heizkosten des Vergleichsgebäudes, mit einem – infolge der ursprünglich vorhandenen Einzelofenheizung verhältnismäßig niedrigen – Heizenergieverbrauch von  $125 \text{ kWh}/\text{m}^2 \text{ Wfl.}$  bei  $12,4 \text{ €}/\text{m}^2 \text{ Wfl.}$  Wenn die kostenoptimale Sanierung gewählt wird und die resultierenden Kosten auf die Kaltmiete aufgeschlagen werden, ergibt sich für die Mieter, bezogen auf die Warmmiete und bei einer LCA-Betrachtung<sup>86</sup> ein Vorteil von ca.  $144 \text{ €}$  pro Jahr ( $0,17 \text{ €}/\text{m}^2 \cdot \text{Monat}; 70 \text{ m}^2 \text{ Wfl.}$ ) verglichen mit den Heizenergiekosten vor der Sanierung.

<sup>86</sup> Mit LCA ist eine „Lebenszyklus-Analyse“, d. h. eine Grenzkostenbetrachtung gemeint: Die Kosten der Einsparinvestitionen werden über die vermutete Lebensdauer der Maßnahmen (Wärmeschutz-Maßnahmen: 40 Jahre, Fenster: 25 Jahre) abgeschrieben, die resultierenden Kapitalkosten werden auf die Kaltmiete aufgeschlagen. Eine eventuelle Förderung wird nicht berücksichtigt.

Für eine „warmmietneutrale“ energetische Sanierung – deren Energiekosten-Einsparpotential für die Mieter also etwa der zu erwartenden Kostenumlage entspricht – wäre es sogar möglich, die oberste Geschossdecke und die Außenwand mit bis zu 30 cm Dämmschicht zu versehen (zusätzliche Kosten von ca. 30 €/m<sup>2</sup> Wfl.), was auf  $H_T = 0,32 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$  und  $q_{Hz} = 34 \text{ kWh/m}^2$  führen würde. Abb. All-1.11 zeigt jedoch, dass der resultierende Zuwachs an Energieeinsparung nur bei ca. 5 kWh pro m<sup>2</sup> Wfl. liegt, also geringer ist als beim Einbau von PH-Fenstern anstelle von 2-Scheiben-Fenstern (Abb. All-1.11).

Ist ein Fensteraustausch überhaupt wirtschaftlich? Soll das einzubauende Fenster ein Passivhaus-Fenster sein? Diese Frage kann unter Benutzung des oben beschriebenen Näherungsmodells für das Vergleichsgebäude durchgerechnet werden, um die günstigste Maßnahme festzustellen. Die drei Varianten „kein Fensteraustausch“, „Fensteraustausch mit 2-Scheiben-Fenster ( $U_w = 1,30 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K})$ ) und „Fensteraustausch mit Passivhaus-Fenster“ ( $U_w = 0,80 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K})$ ) führen auf folgendes Resultat:

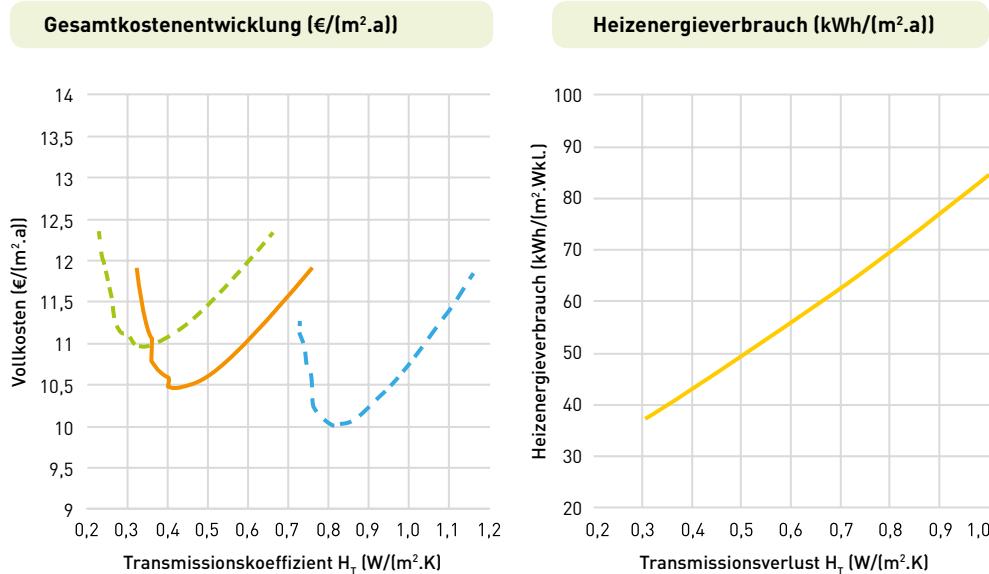


**Abb. All-1.13:** Einfluss der Maßnahme „Fensteraustausch“ auf den Heizenergieverbrauch (Säulen; linke Skala) bzw. die resultierenden Vollkosten (€ pro m<sup>2</sup> Wfl. und Jahr, rechte Skala) der Heizungsbereitstellung für das Vergleichsgebäude (jeweils für das Kostenminimum in Abb. All-1.14);

■ Heizbedarf  
■ Vollkosten

Abb. All-1.13 zeigt, dass die kostengünstigste Maßnahme eine mäßige Wärmedämmung – Außenwand und oberste Geschossdecke mit einer Dämmstärke von jeweils ca. 13 cm, Kellerdecke ca. 10 cm – ohne Fensteraustausch darstellt. Daraus resultiert (s. Abb. All-1.14, linkes Bild, Kurve ganz rechts:  $H_T^{\min} \approx 0,80 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K})$ ) ein Heizenergieverbrauch des Vergleichsgebäudes von 66 kWh/m<sup>2</sup>, mit Vollkosten von 9,98 €/m<sup>2</sup>. Da bei der Sanierung eines Wohngebäudes der Verzicht auf eine Fenstererneuerung jedoch in der Regel nicht sinnvoll ist, ergibt sich nur die Frage nach der wirtschaftlich optimalen Wahl des neuen Fensters. Abb. All-1-13 zeigt, dass das 2-Scheiben-Fenster im Vergleich zum Passivhaus-Fenster (etwas) günstigere Vollkosten ergibt (10,43 verglichen mit 10,95 €/m<sup>2</sup>) – was bereits bei der Bauteilbetrachtung (oben) festgestellt wurde.

Aus Abb. All-1.14, rechtes Bild, kann die energetische Auswirkung verschiedener Maßnahmenkombinationen direkt abgelesen werden: Der Vorteil des Passivhaus-Fensters im Vergleich zum 2-Scheiben-Fenster liegt mit 34 im Vergleich zu 40 kWh/m<sup>2</sup> bei ca. 6 kWh/m<sup>2</sup>. Das Passivhaus-Fenster hat also, verglichen mit dem 2-Scheiben-Fenster, jeweils in Verbindung mit kostenoptimaler Wärmedämmung, einen etwas größeren energetischen Effekt, als ihn ein Übergang in der Dämmstärke (Außenwand, oberste Geschossdecke) von 13 cm zu ca. 30 cm hätte, ist aber – mit den hier angesetzten Fenster-Kosten – kostengünstiger (d. h. in diesem Fall: weniger unwirtschaftlich, siehe Abb. All-1.13 und All-1.15).



**Abb. All-1.14, links:** Gesamtkostenentwicklung (€/(m<sup>2</sup>.a)) für die drei Varianten von Abb. All-1.13. Die Kurven zeigen die Kosten für die zunehmende Dämmung der Hüllflächen ohne Fenstererneuerung (rechte Kurve), mit Erneuerung der Fenster durch 2-Scheiben-Fenster (mittlere Kurve) und durch Passivhaus-Fenster (linke Kurve).

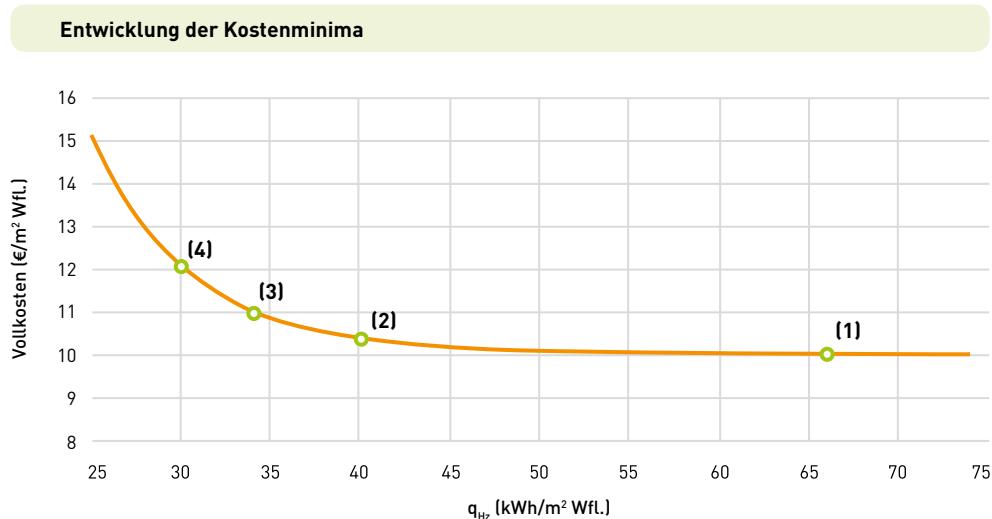
**Rechts:** der zugehörige Heizenergieverbrauch (kWh/m<sup>2</sup> Wfl.) als Funktion von H<sub>T</sub>, berechnet mit dem oben beschriebenen Näherungsverfahren (Formel All-1.8)

Die Rechnungen wurden mit heutigem Energiepreis ( $p_E = 8,5$  ct/kWhHu brutto) durchgeführt. Wirkt sich die Höhe des Energiepreises  $p_E$  auf die wirtschaftlich optimale Maßnahmenkombination aus? Die – hier nicht weiter ausgeführte – Analyse zeigt, dass das Minimum der Vollkosten bei Energiepreisen zwischen ca. 5 und 17 ct/kWh im Bereich von  $H_T \approx 0,40$  W/(m<sup>2</sup>.a) bleibt. Erst bei  $p_E < 3,5$  ct/kWh verschiebt sich das Kostenminimum zu schlechteren (= höheren) H<sub>T</sub>-Werten, während umgekehrt erst ab etwa  $p_E \approx 17$  ct/kWh niedrigere H<sub>T</sub>-Werte (Passivhaus-Fenster plus Dämmstärken von 20 cm und mehr) ein Gesamtkosten-Minimum ergeben. Während ein Energiepreis von unter 3,5 ct/kWh (aus dem Jahr 2000) der Vergangenheit angehört, dürfte ein Preis von 17 ct/kWh noch auf lange Sicht nicht eintreten. Die Schlussfolgerung ist, dass für das betrachtete Vergleichsgebäude ein H<sub>T</sub>-Wert von etwa 0,40 W/(m<sup>2</sup>.K) – mit einem Heizenergieverbrauch von ca. 40 kWh/m<sup>2</sup> Wfl. – als Ergebnis der energetischen Sanierung der Hüllflächen ein robustes Kostenminimum darstellt. Während die oben berechneten Zahlen auf dem Klima von Karlsruhe ( $HGT_{15}^{20} = 2.053$  Kd) beruhen, dürfte diese Schluss-

folgerung – hinsichtlich des optimalen  $H_T$ -Wertes nach Sanierung – auch für Regionen mit kälterem Klima (höhere Anzahl an HGt, größerer Wert für  $q_{H_T}$ ) grundsätzlich Bestand haben.

Von den bisher diskutierten Maßnahmen für das zu sanierende Vergleichsgebäude besteht demnach die sinnvollste Kombination in einer Wärmedämmung im Bereich von 13 cm (Kellerdecke: 9 cm) in Verbindung mit 2-Scheiben-Wärmeschutzfenstern (im Folgenden „Standardsanierung“ genannt). Daraus ergeben sich für die Mieter Gesamtkosten (Energiekosten plus Modernisierungszuschlag bei LCA-Betrachtung), die um rund 15 % unter den reinen Energiekosten vor der Sanierung (heutiger Energiepreis) liegen. Eine Entscheidung für Passivhaus-Fenster wäre noch sinnvoll; sie würde den Heizenergieverbrauch auf ca. 34 kWh/m<sup>2</sup> senken und den Kostenvorteil im Vergleich zum Energieverbrauch vor der Sanierung (125 kWh/m<sup>2</sup>) von 15 auf 10 % reduzieren: Der zusätzliche Einspareffekt beim Übergang von  $U_w = 1,30$  auf  $U_w = 0,80 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  für das Vergleichsgebäude beträgt nur ca. 6 kWh/m<sup>2</sup> Wfl., mit denen die Mehrkosten des Passivhaus-Fensters, kalkuliert mit 25 Jahren Abschreibung, bei einem Energiepreis von  $p_E \leftarrow 17 \text{ ct}/\text{kWh}$  nicht finanziert werden können.

Abb. All-1.15 stellt die Entwicklung der Gesamtkosten mit zunehmendem Wärmeschutz-Standard dar: Die Gesamtkosten mit Passivhaus-Fenster und 20 cm Wärmedämmung (Maßnahmenpaket (4)) liegen wieder so hoch wie die reinen Heizkosten von 12,4 €/m<sup>2</sup>.a vor der Sanierung (LCA-Betrachtung). Damit würde ein Heizenergieverbrauch von  $q_{H_T} \sim 30 \text{ kWh}/\text{m}^2 \text{ Wfl.}$  erreicht. Mit dieser weiteren Verbesserung von 40 kWh/m<sup>2</sup> (Kostenminimum) auf 30 kWh/m<sup>2</sup> wäre man noch „warmmiet-neutral“, würde aber den Kostenvorteil der wirtschaftlich optimalen Sanierung verschenken, der eigentlich erforderlich ist, um die Kosten der übrigen Modernisierungsmaßnahmen (siehe weiter unten) wenigstens zum Teil aufzufangen.



**Abb. All-1.15:** Entwicklung der Kostenminima („Least-Cost“-Kurve) für verschiedene Maßnahmenkombinationen an der Gebäudehülle und zugehöriger Heizenergieverbrauch  $q_{H_T}$ ; Kreise von rechts nach links:  
 (1) 13 cm Wärmedämmung  
 für Außenwand und oberste  
 Geschossdecke, 9 cm für  
 Kellerdecke; kein Fenster-  
 austausch

- (2) „Standardsanierung“:  
 wie (1), aber mit Ersatz der vorhandenen Fenster durch 2-Scheiben-Wärmeschutz-Fenster ( $U_w = 1,30 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ )
- (3) wie (2), aber PH-Fenster ( $U_w = 0,80 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ )
- (4) wie (3), aber erhöhte Wärmedämmung („Passivhaus-Sanierung“ (keine Lüftung mit Wärmerückgewinnung, keine solare Warmwasser-Erzeugung))

### All-1.3.3 Energetische Verbesserungsmaßnahmen der technischen Gebäudeausrüstung: Einzelgebäude

Die durch Erhöhung der Dämmstärken erreichbare Energieeinsparung ist begrenzt. Weitergehende Maßnahmen zur energetischen Verbesserung eines Mehrfamilienhauses müssen die technische Gebäudeausrüstung (TGA) mit einbeziehen. Die Betrachtungsweise bezieht sich dann auf den Endenergieverbrauch zur Deckung des Bedarfs an Heizung und Warmwasser und muss auch die Verluste der TGA im Gebäude sowie deren Stromverbrauch berücksichtigen.

Zum Vergleich sinnvoller Pakete zur energetischen Sanierung bzw. Ertüchtigung des Vergleichsgebäudes werden folgende Maßnahmenpakete betrachtet:

#### Paket

**Tab. All-1.4:** Übersicht über die betrachteten Maßnahmenpakete

- 1 keine Sanierung
- 2 Minimalkosten-Sanierung: nur Wärmedämmung plus höhergedämmte Rohrleitungen (s. All-2)
- 3 „Standardsanierung“: wie Paket 2, plus 2-Scheiben-Fenster
- 4 erhöhte Dämmung (oberste Geschossdecke 25 cm, Außenwand WDVS 20 cm, Kellerdecke 10 cm); Passivhaus-Fenster
- 5 wie Paket 4, plus Lüftung mit WRG
- 6 wie Paket 5, plus Solarkollektoren zur Deckung von 2/3 des Warmwasser-Verbrauchs ( $0,04 \text{ m}^2 \text{ Kollektorfläche pro m}^2 \text{ Wfl.}$ )
- 7 wie Paket 5, mit Elektro-Wärmepumpe (Luft/Wasser) zur Deckung des Heizungs- und Warmwasser-Bedarfs

Neben dem vom Wärmeschutz-Standard abhängigen Heizenergiebedarf wird der Wärmebedarf zur Deckung des Warmwasser-Verbrauchs sowie die Summe aller Verteilungsverluste im Gebäude mit  $37 \text{ kWhth/m}^2$  und der Stromverbrauch der Heizanlage (Pumpen für Heizung und Warmwasser, kontrollierte Entlüftung) mit  $1,85 \text{ kWhel/m}^2$  angenommen. Dieser Wärmebedarf wird mit einem Gas-Heizkessel ( $h_{ks} = 0,87$ ) gedeckt. Der Gaspreis beträgt  $8,5 \text{ ct/kWhHu}$ , der Strompreis  $28 \text{ ct/kWhel}$  (jeweils brutto). Die Kosten für die Lüftung mit Wärmerückgewinnung, Rückwärmzahl 0,80, werden optimistisch mit  $45 \text{ €/m}^2$  (ohne die Kosten der kontrollierten Entlüftung), die Kosten der Solarkollektoren mit  $1.000 \text{ € pro m}^2 \text{ Kollektorfläche}$  angesetzt (mit  $0,04 \text{ m}^2 \text{ Kollektorfläche pro m}^2 \text{ Wfl. entspricht dies Investitionskosten von } 40 \text{ €/m}^2 \text{ Wfl.}$ ), die Elektro-Wärmepumpe mit Kosten von  $1.570 \text{ €/kWth}$  (Jahres-Arbeitszahl:  $e_a = 3,80$ ; Wärmepumpen-Tarif der Stadtwerke Karlsruhe:  $22 \text{ ct/kWhel}$  brutto). Der Kapitaldienst (KD) wurde mit Abschreibungszeiten der baulichen Maßnahmen von 40 Jahren

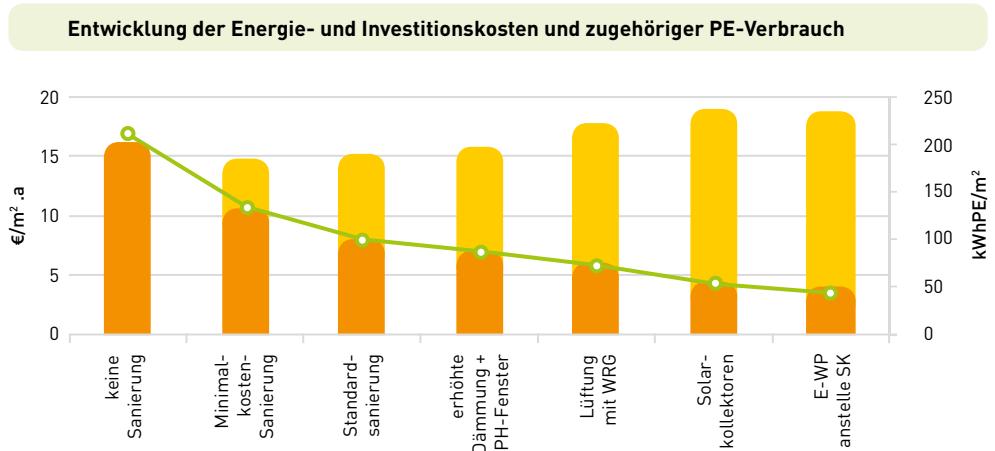
und der TGA von 25 Jahren berechnet (kalkulatorischer Zinssatz 4 %). Die Kosten des Wärmeverteilsystems im Gebäude und der Heizflächen in den Wohnungen wurden nicht berücksichtigt. Diese Ansätze sind als (eher zu) optimistisch zu bezeichnen.

Damit erhält man folgende Eckdaten für die 7 Maßnahmenpakete von Tab. All-1.4:

Paket	Inv.-Kosten €/m <sup>2</sup> brutto	q <sub>HZ</sub> kWh/m <sup>2</sup> Wfl.	q <sub>ges</sub> kWh/m <sup>2</sup>	Endenergie Gas kWhEE/m <sup>2</sup>	Endenergie Strom kWhel/m <sup>2</sup>	PE-Verbrauch kWhPE/m <sup>2</sup>	Ges.-Kosten €/m <sup>2</sup> .a
1	0	125	162	186,2	0	205	16,24
2	80	66	101,7	118,3	1,85	134,7	14,72
3	126	40	75,7	88,0	1,85	101,5	15,12
4	155	30	65,7	76,4	1,85	88,7	15,81
5	200	15	50,7	59,0	3,61	73,9	17,68
6	240	15	33,7	39,1	3,71	52,3	19,20
7	246	15	51	0	17,3	43,3	18,66

**Tab. All-1.5:** Übersicht über die Eckdaten der sieben betrachteten Maßnahmenpakete ( $q_{\text{ges}}$  ist der gesamte Wärmeverbrauch einschließlich Verteilungsverlusten)

Das Ergebnis von Tab. All-1.5 zeigt Abb. All-1.16:



**Abb. All-1.16:** Entwicklung der Energie- und Investitionskosten (Säulen; linke Skala) sowie des resultierenden Primärenergie-Verbrauchs (rechte Skala) nach Durchführung der Maßnahmenpakete 1 bis 7 von Tab. All-1.5 (einschließlich Bereitstellung von Warmwasser)

■ E-Kosten  
■ KD  
■ PE

Abb. All-1.16 zeigt, dass mit den kostengünstigsten Maßnahmen (Paket 3; Paket 2 wäre geringfügig günstiger, ermöglicht aber eine deutlich geringere energetische Verbesserung) eine Halbierung des Primärenergieeinsatzes möglich ist, bei der zugleich die Gesamtkosten des Wärmebedarfs für die Mieter sinken. Eine weitere Halbierung auf rund 50 kWhPE/m<sup>2</sup> ist technisch möglich, mit der doppelten Investition und Gesamtkosten, die um ca. 25 % höher sind als die kostengünstigste Variante. Die Variante 7, Passivhaus-Sanierung/Wärmepumpe ist sowohl hinsichtlich Kosten als auch hinsichtlich Primärenergie-Kennzahl etwas günstiger als Variante 6, Passivhaus-Sanierung/Gaskessel plus Solarkollektoren. Hierbei wurden optimistische Annahmen hinsichtlich Kosten und Performance von Lüftung mit WRG, Solarkollektoren und Wärmepumpe getroffen. Ferner wurden weder Wartungskosten noch Kosten der Anlagenoptimierung berücksichtigt – die hier angegebenen Kosten für die Pakete 5, 6 und 7 sind demnach zu optimistisch und liegen in der Realität deutlich höher (siehe Kap. V.5). Es wären noch andere energetische Maßnahmen denkbar, etwa andere Wärmepumpen, dezentrale Umwälzpumpen, Solarkollektoren mit Heizungsunterstützung, Installation eines Einzelraumregelungssystems zur Bedarfsreduzierung, Einsatz eines BHKWs, Pelletkessel etc., sowie verschiedene Kombinationen davon. Hier sollte jedoch anhand des Vergleichsgebäudes nur eine begrenzte Anzahl exemplarischer und für Mehrfamilienhäuser verallgemeinerungsfähiger Maßnahmen diskutiert werden, um den Sachverhalt nicht zu unübersichtlich zu machen.

Ergebnisse des Vergleichs der Energieeinsparpakte für das Vergleichsgebäude:

- Unter der Vorgabe, dass eine Fenstererneuerung auf jeden Fall erforderlich ist, werden die minimalen Gesamtkosten der energetischen Verbesserung der Hüllflächen mit der „Standardsanierung“ erreicht. Mit einer Investition von ca. 126 €/m<sup>2</sup> wird eine Halbierung des Endenergieverbrauchs im Vergleich zum Zustand vor der Sanierung (auf ca. 100 kWh<sub>EE</sub> pro m<sup>2</sup> Wfl.) ermöglicht. Die Vollkosten der Standardsanierung liegen (bei heutigem Gas/HEL-Preis) um ca. 15 % niedriger als die reinen Energiekosten vor der Sanierung.
- Die „echte“ Passivhaus-Sanierung (erhöhte Wärmedämmung, Lüftung mit Wärmerückgewinnung, Warmwasser-Bereitung mit Solarkollektoren) ermöglicht eine weitere Halbierung des Endenergieverbrauchs auf ca. 50 kWh<sub>EE</sub>/m<sup>2</sup> Wfl., ergibt aber – mit einer Verdopplung der Investitionen auf 250 €/m<sup>2</sup> – Vollkosten, die um rund 20 % höher sind im Vergleich zum unsanierten Zustand bzw. um 40 % höher als die Kosten der „Standardsanierung“ (LCA-Rechnung).
- Der Einsatz einer Luft/Wasser-Wärmepumpe ist energetisch und hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit etwas günstiger als „Erdgas-Kessel plus Solarkollektoren“ (falls die hier unterstellten optimistischen Annahmen über erreichbare Investitions- und Betriebskosten realisiert werden können).
- Wenn die Performance der Lüftung mit Wärmerückgewinnung bzw. der eingesetzten Solarkollektoren bzw. der Wärmepumpen im Betrieb ungünstiger ausfällt, als hier angenommen, können die resultierenden Gesamtkosten erheblich steigen. Die Wirtschaftlichkeit dieser „neuen“ Techniken hängt daher kritisch ab von der Qualität der Anlagenplanung bzw. -ausführung und dem nachfolgenden (optimierten) Betrieb (→ Kap. V.5).

- Aus dem für das Betriebscontrolling bzw. die laufende Betriebsoptimierung erforderlichen Anlagenmonitoring ergeben sich Mehrkosten (Messsysteme, laufende Auswertung) für den Gebäude-Betreiber, die in die o. g. Kosten nicht eingerechnet wurden.

## All-1.4 Nahwärmeversorgung

Den oben diskutierten Optionen für Energieeinsparmaßnahmen am Einzelgebäude (Gebäu-dehülle, TGA) können bei einer Quartiersbetrachtung zentrale Maßnahmen gegenübergestellt werden. Diese sind mit der Errichtung eines Fern- bzw. Nahwärmennetzes verbunden, das mit den jeweils örtlich verfügbaren Techniken bzw. Energiequellen betrieben wird. Eine solche zentrale Wärmeversorgung ist dann sinnvoll, wenn die bereitgestellte Nutzwärme im Vergleich zu den dezentralen Varianten erhebliche Vorteile in energetischer Hinsicht hat (Energieeffizienz und/oder Anteil erneuerbarer Energien). Dies ist in Rintheim der Fall (→ Anhang AI-2): Die aus dem vorgelagerten Fernwärmennetz der Stadtwerke Karlsruhe bezogene Wärme hat einen Primärenergie-Faktor frei Gebäude in Rintheim von 0,48 kWhPE/kWhth. Es stellt sich die Frage, wie sich diese zentrale Versorgung des Quartiers Rintheim im Vergleich mit den oben diskutierten dezentralen Energietechniken in energetischer und wirtschaftlicher Hinsicht verhält, insbesondere in Bezug auf das Kostenminimum verschiedener Einsparvarianten.

Die Kostenstruktur des Nahwärmennetzes Rintheim wird in Anhang All-1 unter der Annahme behandelt, dass alle an das Netz angeschlossenen Gebäude zuvor energetisch nach dem oben für das Vergleichsgebäude diskutierten „Sanierungsstandard“ saniert wurden (was annähernd zutrifft). Mit der von der VOLKSWOHNUNG vorgegebenen Abschreibungszeit von 20 Jahren<sup>87</sup> für das Nahwärmennetz ergeben sich Nahwärme-Gesamtkosten von 85,1 €/MWh brutto. Die zugehörigen Festkosten (Kapitaldienst, Wartung/Instandhaltung, Wärmeverluste, Verwaltungskosten) liegen bei 30,1 €/MWh.

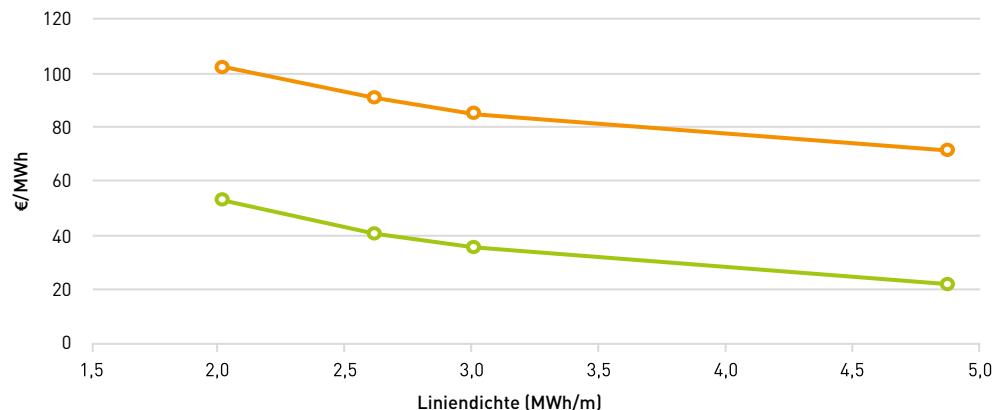
Nimmt man (hypothetisch) an, dass alle Gebäude jeweils nach dem gleichen Standard energetisch saniert werden, so erhält man je nach Sanierungsvariante (Tab. All-1.6) verschiedene Liniendichten (MWh/(m.a)) für das Nahwärmennetz, die bei praktisch gleichbleibenden Festkosten zu umso höheren Verteilungskosten führen, je höher der Sanierungsstandard der Gebäude ist:

<sup>87</sup> 20 Jahre Abschreibungszeit für Fernwärmennetze ist unüblich kurz. Daraus ergibt sich, dass nach 20 Jahren – unter sonst gleich bleibenden Rahmenbedingungen – die Festkosten des Netzes reduziert und damit der Nahwärme-Preis gesenkt werden können.

### Netzkosten als Funktion der Liniendichte

**Abb. All-1.17:** Spezifische Festkosten und Gesamtkosten (brutto) des Nahwärmenetzes Rintheim nach Anhang AIII-1 in Abhängigkeit von der Liniendichte, die sich aus der Realisierung unterschiedlicher Sanierungsstandards (für alle Gebäude) nach Paket 1, 3, 4 und 5 (Tab. All-1.4) ergeben

█ Festkosten  
█ Gesamtkosten



**Tab. All-1.6:** Sanierungspakete der Nahwärme-Versorgung in Rintheim (Paket-Nr. entspricht Tab. All-1.4); (1): keine Sanierung; (3): „Standardsanierung“; (4): erhöhte Dämmung plus Passivhaus-Fenster; (5): wie (4) plus Lüftung mit Wärmerückgewinnung; die Spalte „Ges.-Kosten Verbraucher“ enthält die Gebäudesanierungskosten und die Wärmeversorgung mit den dem jeweiligen Paket zugehörigen Nahwärme-Kosten.

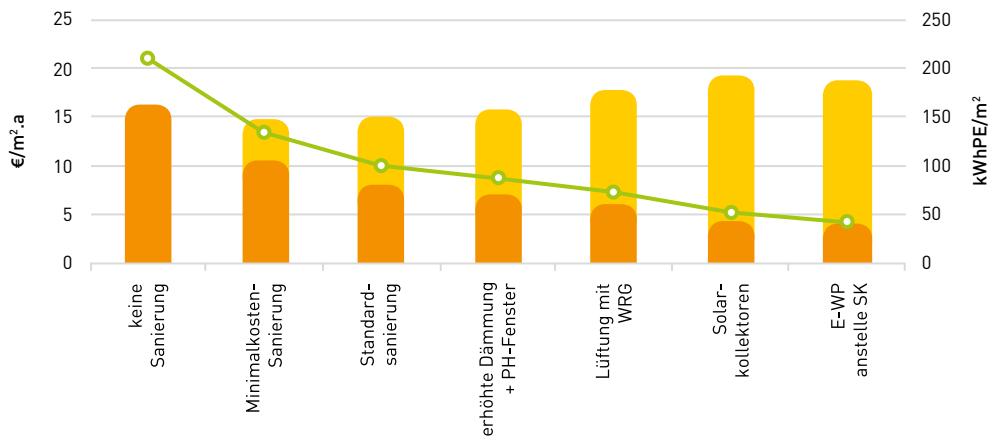
Für diese Varianten sollen im Folgenden die Gesamtkosten der Wärmebereitstellung dargestellt werden, die direkt mit den in All-1.3.2 behandelten Maßnahmen an Einzelgebäuden verglichen werden können. Die betrachteten Varianten entsprechen den in Tab. All-1.4 aufgeführten Maßnahmenpaketen für die energetische Verbesserung der Einzelgebäude, aber jeweils angewendet auf alle Gebäude des Quartiers gleichzeitig, wobei von den sieben Paketen in Tab. All-1.4 (unten) nur die vier für die Nahwärme sinnvollen Pakete ausgewählt wurden:

Den Vergleich der Kostenentwicklung der sieben Maßnahmenpakete für Einzelgebäude mit den Gesamtkosten für die Nahwärme-Versorgung für die vier unterschiedlichen Sanierungspakete von Tab. All-1.6 zeigt Abb. All-1.18, ebenso wie die resultierenden unterschiedlichen Primärenergie-Verbräuche. Anders als bei der Einzelgebäudebetrachtung wäre der Anschluss aller Gebäude an die Nahwärme ohne energetische Sanierung die kostengünstigste

Paket	Inv.-Kosten €/m <sup>2</sup> brutto	q <sub>HZ</sub> kWh/m <sup>2</sup> Wfl.	q <sub>ges</sub> kWh/m <sup>2</sup>	Endenergie Nahwärme kWhth/m <sup>2</sup>	Endenergie Strom kWhel/m <sup>2</sup>	NW-Kosten €/MWhth	PE-Verbrauch kWhPE/m <sup>2</sup>	Ges.-Kosten Verbraucher ww/m <sup>2</sup> .a
1	0	125	164,3	171,1	0	71,6	82,2	12,25
3	126	40	75,7	78,9	1,85	85,1	42,5	14,34
4	155	30	65,7	68,4	1,85	90,4	37,5	15,51
5	200	15	50,7	52,8	3,61	102,5	34,5	18,09

Variante, weist aber einen deutlich höheren Primärenergie-Verbrauch auf als die energetisch optimierten Einzelgebäude mit dezentraler Wärmebereitstellung (Gaskessel). Das nächst-günstige Paket ist die „Standardsanierung“ (Paket 3 von Tab. All-1.6), die etwas günstigere Kosten hat als die entsprechende Einzelgebäudevariante, aber bereits einen niedrigeren Primärenergie-Verbrauch aufweist als die echte Passivhaus-Variante (Paket 7 von Tab. All-1.5). Die Primärenergie-Einsparung durch Übergang von Paket (3) auf Paket (5) der an die Nahwärme angeschlossenen Gebäude ist nur mehr gering, aber mit einer Kostenerhöhung um über 25 % im Vergleich zum Paket (3) verbunden (Tab. All-1.6, Spalte ganz rechts und Abb. All-1.18, unteres Bild).

#### Entwicklung Energie-, Kapital- und Gesamtkosten sowie PE-Verbrauch



**Abb. All-1.18:** Vergleich der Energiekostenstrukturen und des spezifischen Primärenergie-Verbrauchs (rechte Skala) der sieben Varianten für Einzelgebäudesanierung und der vier Varianten für die die Sanierung der Gebäude im Nahwärmennetz (unterschiedliche Skalen auf der rechten Achse!)

■ E-Kosten  
■ KD  
■ PE

#### Entwicklung Kosten und PE-Verbrauch

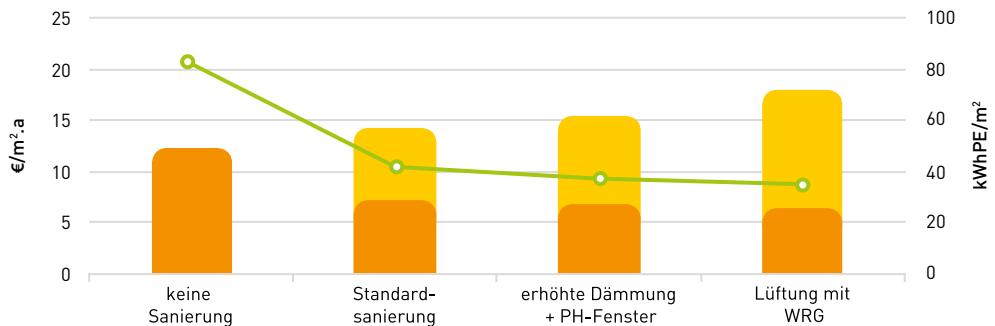
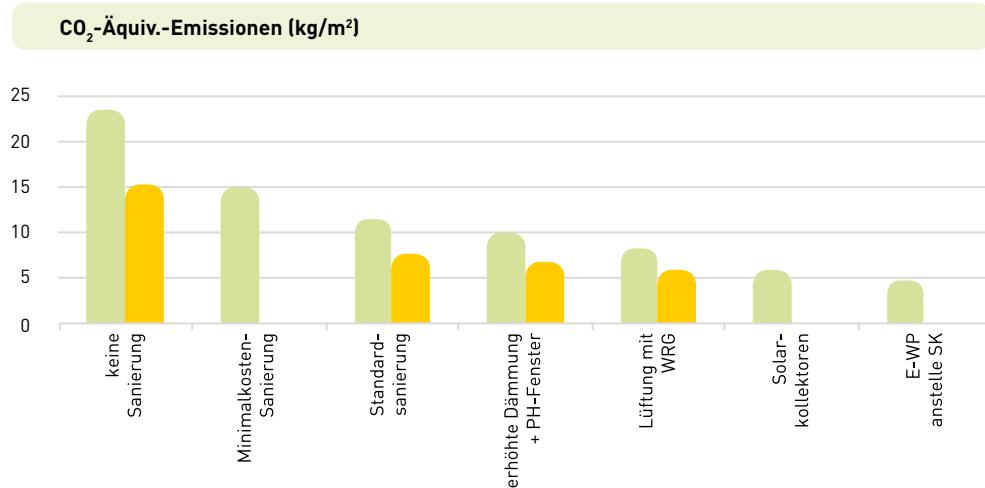


Abb. All-1.18 zeigt, dass der Primärenergieverbrauch von ursprünglich über 200 kWh<sub>EE</sub>/m<sup>2</sup> (unsaniert, Erdgas) bei Standardsanierung plus Nahwärme-Anschluss auf ca. 42,5 kWh<sub>EE</sub>/m<sup>2</sup> sinkt (minus 80 %).

Der Nahwärme-Anschluss plus „Standardsanierung“ ermöglicht eine Minderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen um 67 %. Bei Passivhaus-Sanierung und rein elektrischer Versorgung mit Wärmepumpe, Paket 7, ergäbe sich hingegen eine Reduktion um 80 % im Vergleich zum nicht sanierten Zustand und Gaskessel (Paket 1), s. Abb. All-1.19.



**Abb. All-1.19:** Vergleich der dezentralen und Nahwärme-Varianten hinsichtlich CO<sub>2</sub>-Emissionen (kg CO<sub>2</sub>-Äquiv. pro m<sup>2</sup> Wfl.)

■ CO<sub>2</sub>-Äquiv. dez.  
■ CO<sub>2</sub>-Äquiv. NW

## All-1.5 Gesamtbetrachtung der Gebäude-Modernisierung

Die Sanierung bzw. Modernisierung eines Wohngebäudes ist nie auf rein energetische Sanierungsmaßnahmen begrenzt. Eine Gebäude-Modernisierung muss immer „ganzheitlich“ betrachtet werden:

- die zyklisch notwendigen Instandhaltungsmaßnahmen, für die als Bestandteil der Kaltmiete die notwendigen Mittel zurückgelegt werden,
- Modernisierungsmaßnahmen, die infolge der technischen Weiterentwicklung (z.B. Kommunikationstechnik) und der Weiterentwicklung von Normen (z. B. Elektro, Sanitär) oder gesetzlichen Bestimmungen (z. B. Brandschutz, Hygiene) im Rahmen einer Sanierung umgesetzt werden müssen,
- Maßnahmen zur „nachhaltigen Erhöhung des Gebrauchswerts“, etwa Wohnungs-Grundrissänderungen, Barrierefreiheit, Aufzüge, und
- energetische Sanierungs- bzw. Modernisierungsmaßnahmen.

Alle diese Maßnahmen sind Teil einer „integralen Gesamtsanierung“, die auch Maßnahmen im „Wohnumfeld“, also außerhalb des Gebäudes, etwa Außenanlagen, Parkplätze etc., umfassen kann. Dabei ist eine eindeutige Abgrenzung zwischen Instandhaltung und Modernisierung nicht immer möglich.

Während den energetischen Maßnahmen und den entsprechenden Investitionskosten eine Kosteneinsparung gegenübersteht, die sich bei optimaler Umsetzung „selbst“ finanziert<sup>88</sup>, steht den sonstigen Modernisierungsmaßnahmen keine unmittelbare „Amortisation“ durch Kosteneinsparungen an anderer Stelle gegenüber. Diese Kosten erhöhen also in Form von „Modernisierungszuschlägen“ die Kaltmiete. Die Höhe dieser Modernisierungszuschläge ist im Mietrecht auf 11 % pro Jahr begrenzt, bezogen auf die Modernisierungskosten – was für den Vermieter auskömmlich ist, sofern er die sich daraus ergebende Mieterhöhung wirklich realisiert.

Für die Mieter ist – neben den sonstigen Nebenkosten (Wasser, Abwasser, Abfallentsorgung), die in den letzten Jahren ebenfalls gestiegen sind – die Warmmiete ausschlaggebend, die die Kaltmiete plus Kosten der Heizung und Warmwasser-Versorgung inklusive Abrechnungskosten umfasst. Deshalb ist es wichtig, die Maßnahmen zur energetischen Sanierung so kosteneffizient wie möglich zu konzipieren, um zu erreichen, dass die dadurch erreichbare Kosteneinsparung bei den Energiekosten möglichst einen Teil der sonstigen Modernisierungskosten abdecken kann. Im konkreten Fall des Vergleichsgebäudes haben sich folgende Kosten ergeben:<sup>89</sup>

	€ brutto	€/m <sup>2</sup>	Anteil (%)
Gesamt-Sanierungskosten (ohne Nebenkosten, ohne Außenanlagen)	1.842.000	909	
Anteil Instandhaltung	676.000	333	36,7
Anteil energetische Modernisierung	481.000	238	26,1
Anteil sonstige Modernisierung	685.000	336	37,2

**Tab. All-1.7:** Gesamtübersicht Sanierungskosten Vergleichsgebäude (KGR 300 und 400)

Wie Tab. All-1.7 zeigt, macht die energetische Modernisierung nur wenig mehr als ein Viertel der Gesamt-Sanierungskosten aus. Klammert man die Instandhaltungskosten aus, die aus den Rücklagen der Kaltmiete finanziert werden, liegen die Kosten der energetischen Modernisierung bei rund 40 % der Gesamt-Modernisierungskosten.

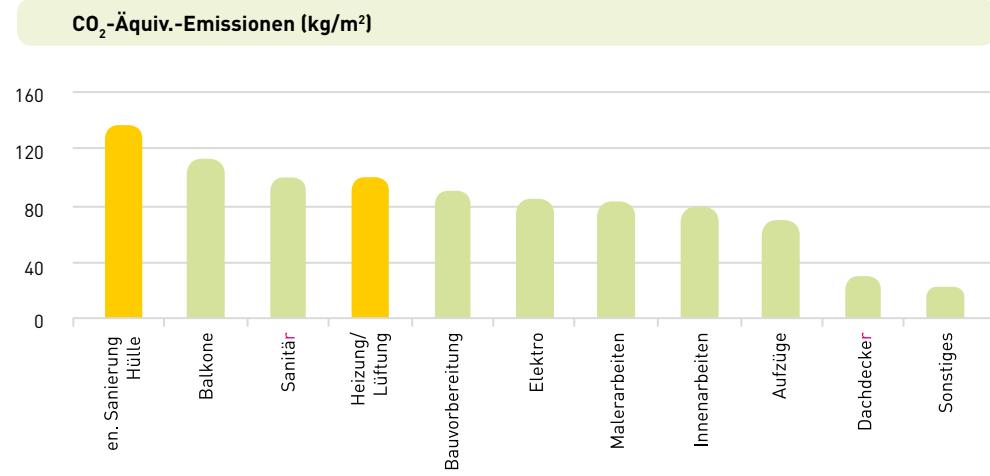
<sup>88</sup> Die Wirtschaftlichkeit von Energieeinsparmaßnahmen hängt direkt vom Energiepreis ab, der erst seit 2006 ein Niveau erreicht hat, das eine umfassende energetische Sanierung der Hüllflächen wirtschaftlich macht.

<sup>89</sup> Nachkalkulation Dieter Wagner, VOLKSWOHNUNG

Die Gesamtkosten der integralen Sanierung liegen demnach im Bereich von 1.000 €/m<sup>2</sup>, davon die Modernisierungskosten bei 575 €/m<sup>2</sup> brutto. Dies muss den Kosten eines neuen Mehrfamilienhauses gegenübergestellt werden, die bei über 2.000 €/m<sup>2</sup> liegen. Im Sinne von kostengünstigem Wohnraum in Karlsruhe ist es also viel besser, die bestehenden Gebäude zu sanieren, als diese abzureißen und neu zu bauen.

Eine Gesamtübersicht der Kosten aller Sanierungsmaßnahmen zeigt Abb. All-1.20:

**Abb. All-1.20:** Spezifische Sanierungskosten Vergleichsgebäude (€/m<sup>2</sup> Wfl. brutto; 30 Wohnungen, Gesamt-Wfl. 2.112 m<sup>2</sup>); nur die beiden gelben Balken betreffen energetische Modernisierungsmaßnahmen



Mit einer stark simplifizierten Rechnung (Abschreibungszeit 40 Jahre, konstanter Zinssatz 4 %, Vernachlässigung aller Verwaltungs-, Wartungs- und sonstigen Nebenkosten sowie gegebenenfalls KfW-Förderung) resultiert aus einer Investition von 100 €/m<sup>2</sup> ein Mietbeitrag von 0,42 €/(m<sup>2</sup>.Monat). Damit ergibt sich aus den Daten der Tab. All-1.7 ein Modernisierungsaufschlag für die energetische Sanierung von 1,00 €/(m<sup>2</sup>.Monat) und für die sonstige Modernisierung von 1,42 €/(m<sup>2</sup>.Monat), insgesamt also 2,42 €/(m<sup>2</sup>.Monat). Der tatsächlich von der VOLKSWOHNUNG nach der Sanierung verfügte Modernisierungszuschlag lag für das Vergleichsgebäude bei 1,73 €/(m<sup>2</sup>.Monat).

Aus dem Endenergieverbrauch des Vergleichsgebäudes von 160 kWh/m<sup>2</sup> vor der Sanierung (Heizung plus Warmwasser) resultieren Energiekosten von 1,14 €/(m<sup>2</sup>.Monat), während sich nach der Sanierung Energiekosten von 0,47 €/(m<sup>2</sup>.Monat) ergeben, d. h. eine Reduzierung um 0,67 €/(m<sup>2</sup>.Monat) im Mittel für alle Wohnungen im Vergleichsgebäude. Die Kosten der energetischen Modernisierung des Vergleichsgebäudes (einschließlich Heizung und Lüftungsanlage!) werden demnach nicht kompensiert. Dies ist kein Widerspruch zu den obigen Ausführungen über das wirtschaftlich optimale Standardsanierungspaket für das Vergleichsgebäude, weil in den hier genannten Kosten von ca. 240 €/m<sup>2</sup> auch die Kosten für den Neu-

einbau der Heizung bzw. Heizzentrale (vor der Sanierung Einzel-Öfen) sowie die Installation einer zentralen kontrollierten Lüftungsanlage enthalten sind, die in Abschnitt All-1.3.3 nicht berücksichtigt wurden.

Im vorliegenden Fall lag die Kaltmiete vor der Sanierung bei 4,32 €/(m<sup>2</sup>.Monat). Nach der Sanierung erhielten die Mieter einen Modernisierungsaufschlag von 1,73 €/(m<sup>2</sup>.Monat) und damit eine Kaltmiete von 6,05 €/(m<sup>2</sup>.Monat), die unter dem Durchschnitt vergleichbarer Wohnungen in Karlsruhe liegt. Die Warmmiete änderte sich von 5,46 €/(m<sup>2</sup>.Monat) vor der Sanierung auf 6,72 €/(m<sup>2</sup>.Monat) nach der Sanierung. Die Mieter müssen also unter dem Strich Mehrkosten von 1,26 €/(m<sup>2</sup>.Monat) bzw. 85 €/Monat in Kauf nehmen, entsprechend einer Erhöhung der Warmmiete um 23 %<sup>90</sup> – dafür erhalten sie eine umfassend modernisierte Wohnung, deren Komfort mit den alten Wohnungen nicht zu vergleichen ist.

Diese Ausführungen zeigen, gerade im Hinblick auf einkommensschwächere Mieter, für die die VOLKSWOHNUNG in Karlsruhe Wohnraum anbietet, wie wichtig es ist, das geplante Sanierungspaket wirtschaftlich zu optimieren, um den erforderlichen Modernisierungszuschlag zu begrenzen.

## Anhang All-2: Verluste der Wärmeverteilung im Gebäude

Die Verluste der Wärmeverteilung von der Heizzentrale zu den Nutzern werden i. A. unterschätzt, insbesondere was die Warmwasser-Leitungen angeht, die das ganze Jahr über in Betrieb sind. Der geforderte Standard für neue oder zu sanierende Rohrleitungen liegt bei „1-facher EnEV“: Die Dicke der Rohrisolierung ist annähernd gleich der Medium-Rohrnenweite.

Mit der Formel zur Berechnung des U-Wertes der Rohrleitung,

$$U_R = \frac{2\pi}{\frac{1}{\alpha_i \cdot r_i} + \frac{1}{\lambda_R} \cdot \ln\left(\frac{r_a}{r_i}\right) + \frac{1}{\lambda_{WD}} \cdot \ln\left(\frac{r_R}{r_a}\right) + \frac{1}{\alpha_a \cdot r_R}},$$

mit

- $\alpha_i, \alpha_a$  ... innerer und äußerer Wärmeübergangswiderstand (W/(m<sup>2</sup>.K))
- $\lambda_R$  ... Wärmeleitfähigkeit des Mediumrohrs (Kupfer, Stahl) in W/m.K
- $\lambda_{WD}$  ... Wärmeleitfähigkeit der Dämmung
- $r_i$  ... innerer Radius des Mediumrohrs in m
- $r_a$  ... äußerer Radius des Mediumrohrs
- $r_R$  ... Gesamtradius der Leitung (=  $r_a + d_{WD}$ ,  $d_{WD}$  ... Dicke der Rohrdämmung in m)

<sup>90</sup> Was u. a. auf den niedrigen Heizenergieverbrauch vor der Sanierung von  $q_{H_2} = 125 \text{ kWh}/\text{m}^2 \text{ Wfl.}$  zurückzuführen ist: Bei höherem Energieverbrauch vor der Sanierung wäre der Unterschied geringer.

ergibt sich mit dieser Dämmstärke ein U-Wert der Rohrleitungen von  $U_R \approx 0,22 \text{ W/(m.K)}$  und eine Verlustwärmeleistung von

$$Q_p = L \cdot U_R \cdot \Delta t \text{ (in Watt).}$$

$\Delta t = t_i - t_u$  ist die Differenz zwischen Medium-Temperatur und der Temperatur in der Umgebung des Rohrs, z. B.  $\Delta t = 60 - 15 \text{ K}$ .  $L$  ist die Rohrleitungslänge (Vor- und Rücklauf vom Pufferspeicher bis zu den Zapfstellen). Im Falle der Warmwasser-Versorgungsleitungen, die das ganze Jahr über betrieben werden, resultiert daraus ein Wärmeverlust von

$$Q_a = Q_p \cdot 8.760 / 1.000 \text{ in kWh/a,}$$

von dem ein Teil der Gebäudeheizung zugute kommt.

Mit  $L = 66 \text{ m}$  (Vergleichsgebäude) und  $U_R = 0,22 \text{ W/(m.K)}$  ergibt sich ein Wärmeverlust der Warmwasser-Verteilung von  $5.570 \text{ kWh/a}$  oder  $8,5 \text{ kWh}$  pro  $\text{m}^2 \text{ Wfl.}$ , d. h. mehr als  $60 \%$  des mittleren Warmwasser-Bedarfs in den Wohnungen.

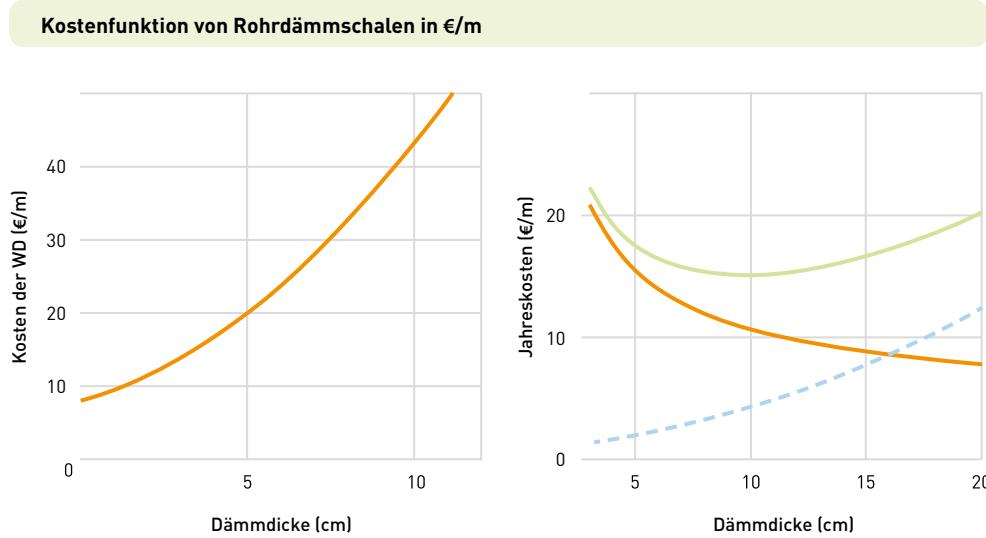
Eine Reduzierung dieser Verluste ist möglich durch Absenkung des Warmwasser-Temperaturniveaus, was „Wohnungs-Frischwasserstationen“ voraussetzt, bei denen das benötigte Warmwasser über einen Wärmetauscher erzeugt wird. Hierdurch ist eine Absenkung der Wassertemperatur von über  $60^\circ\text{C}$  bei zentraler Warmwasser-Bereitstellung auf  $45^\circ\text{C}$  denkbar (in der Realität eher  $50^\circ\text{C}$ ), d. h.  $\Delta t$  verringert sich von  $45$  auf  $30 \text{ K}$ , wodurch die Verluste um rund ein Drittel reduziert werden könnten. Im Vergleich zu einer konventionellen zentralen Warmwasser-Bereitstellung ist für Frischwasserstationen mit Mehrkosten von ca.  $1.750 \text{ €}$  pro Wohnung (brutto), entsprechend  $25 \text{ €}/\text{m}^2$ , zu rechnen.

Die Kosten der Rohrleitungs-Wärmedämmung können aus Kostenangaben von Herstellern für verschiedene Nennweiten hergeleitet werden, aus denen auf die Materialkosten der Dämmsschalen geschlossen werden kann (Abb. All-3.1, links). Mit dieser Kostenfunktion können die Gesamtkosten (Investition, Wärmeverluste) bestimmt werden, die sich aus einer verstärkten Rohrisolierung ergeben: Abb. All-3.1, rechts. Daraus ergibt sich ein Kostenminimum bei einer Dämmdicke von ca.  $10 \text{ cm}$  mit einem U-Wert von  $0,15 \text{ W/(m.K)}$ , d. h. eine Verbesserung im Vergleich zur „1-fachen EnEV“-Dämmung um  $32 \%$ . Der zu erwartende Energie-Einspareffekt liegt also im selben Bereich wie bei den Frischwasser-Stationen. Die Mehrkosten der verstärkten Dämmung der Rohrleitungen liegen hier jedoch bei  $22 \text{ €}/\text{m}$  Leitungslänge bzw. ca.  $145 \text{ €}$  pro Wohnung, also weniger als ein Zehntel der Frischwasserstationen.

Bei allen insgesamt 40 Frischwasserstationen in den Eingängen HB 33, MA 43, MA 45 und MA 47 waren die Betriebserfahrungen nicht gut: Der Stromverbrauch der Umwälzpumpen, die die Frischwasserstationen permanent mit heißem Wasser ( $t_v \sim 48^\circ\text{C}$ ) versorgen, lag beim 3-Fachen der konventionellen Warmwasser-Versorgung. Unabhängig davon zeigen schon die hier genannten Kosten, dass eine verstärkte Dämmung der Rohrleitungen die weitaus wirt-

schaftlichere Strategie ist – wenn es die Platzverhältnisse erlauben, Rohre mit so dicker Wärmedämmung (bei NW 50 beträgt der Gesamt-Rohrdurchmesser 25 cm) zu verlegen. Hier wäre es ein guter Ansatz von Herstellern, Wärmedämm-Materialien für Rohrschalen zu entwickeln, die eine geringere Wärmeleitfähigkeit aufweisen als den hier angesetzten Wert von  $\lambda_{WD} = 0,037 \text{ W/m.K}$ .

Darüber hinaus sollten insbesondere Warmwasser-Leitungen mit ihrer langen jährlichen Betriebsdauer sehr sorgfältig geplant werden, um die Leitungslängen und die wärmeübertragenden Flächen (z. B. durch Inline-Leitungen) sowie die Betriebszeit der Zirkulation so gering wie möglich zu halten. Der so erreichbare Einspareffekt liegt in der Größenordnung der Einsparung, die ein Passivhaus-Fenster im Vergleich zu einem 2-Scheiben-Fenster bewirkt, aber mit viel niedrigeren Kosten.



**Abb. All-3.1:** Linkes Bild: Kostenfunktion von Rohrdämmeschalen in € pro Meter Rohrlänge (NW 50)<sup>91</sup> als Funktion von  $d_{WD}$ ; rechtes Bild: Gesamt-Jahreskosten (€/(m.a), obere Kurve), gegeben durch die Summe der Jahreskosten der Wärmedämmung, untere Kurve, und der Kosten der Wärmeverluste, mittlere Kurve, als Funktion der Dämmdicke (cm) für ein Heizungsrohr der Nennweite NW 50. Wärme-preis: 75 €/MWhth; Annuität mit  $p = 4\%$ , 25 Jahre

Anmerkung: Mit der in Abb. All-3.1 links gezeigten Kostenkurve haben die Dämmeschalen einen Materialpreis von 1,12 €/Liter oder 35 €/kg und sind somit siebenmal teurer als die (bereits verhältnismäßig teuren) Wärmedämm-Platten aus dem gleichen Material (EPS; → Anhang All-1.1).

<sup>91</sup> Die Kostenfunktion  $k_{is}(d_{is})$  als Funktion der Dämmdicke (Abb. All-3.1),  $d_{is}$ , ist gegeben durch:  

$$k_{is}(d_{is}) = k \times [(r_a + d_{is})^2 - r_a^2] \times \pi + k_F, \text{ mit } k = 707 \text{ €/m}^3 \text{ und } k_F = 8 \text{ €/m}$$
 sowie  $r_a$  = halbe Nennweite ( $d_{is}$  und  $r_a$  in m).

## Anhang AIII: Wirtschaftlichkeitsrechnung: Nahwärme und Wohnungsunternehmen

### Anhang AIII-1: Nahwärmennetz Rintheim

Aus dem 2008 beschlossenen Anschluss der Raffinerie MiRO, gelegen am Rhein nördlich von Karlsruhe-Knellingen, an das vorhandene Fernwärmennetz der Stadtwerke Karlsruhe ergibt sich die Notwendigkeit, dieses erheblich auszubauen, um das große Abwärmepotenzial der Raffinerie auszuschöpfen. Dies war ausschlaggebend dafür, das Wohnquartier Rintheim an das bis zum Technologiezentrum Karlsruhe (ca. 300 m nördlich des Wohnquartiers) führende Fernwärmennetz anzuschließen.

MiRO liegt ca. 6,5 km von Rintheim entfernt. Die Abwärme wird zum Haupteinspeisepunkt in das Fernwärmennetz Karlsruhe in der Nähe des Rheinhafen-Dampfkraftwerks (ca. 3,5 km südlich der Raffinerie) geführt und versorgt von dort das ganze Fernwärmennetz in Grundlast. Insbesondere im Sommer genügt diese Einspeisung zur vollständigen Deckung des Bedarfs. Um das Abwärmepotenzial von MiRO voll auszuschöpfen, muss langfristig das Betriebs-Temperaturniveau der vorhandenen Fernwärme von der bisherigen Maximal-Auslegung von 130 °C reduziert werden. Daher werden die neu angeschlossenen Gebiete indirekt angeschlossen, um dort von vornherein niedrigere Betriebstemperaturen zu ermöglichen.

Die Stadtwerke haben hierzu 2008 eine 300 m lange Transportleitung vom Technologiezentrum zur Übergabestation Hirtenweg errichtet und liefern die Fernwärme frei Übergabestation zu einem Arbeitspreis von AP = 38,44 €/MWhth bzw. Leistungspreis von LP = 21,21 €/kWth brutto. Mit den unten stehenden Angaben über die Einspeisung in das Nahwärmennetz ergibt sich – nach Anschluss aller Nutzer im Jahr 2014 – ein Durchschnittspreis der Nahwärme frei Einspeisung Rintheim von DP = 48,17 €/MWhth brutto.

Das von der VOLKSWOHNUNG 2008 bis 2011 errichtete Nahwärmennetz Rintheim, geplant für einen Betrieb mit 75 °C Vorlauf- und 45 °C Rücklauftemperatur, ist an die gemeinsame Tochter der VOLKSWOHNUNG und der Stadtwerke Karlsruhe, KES – Karlsruher Energieservice GmbH, verpachtet. Die technische Betreuung erfolgt über einen Dienstleistungsvertrag der KES mit den Stadtwerken Karlsruhe.

Nach Vorplanung durch die Stadtwerke erfolgte die Detailplanung und Ausführung teils ebenfalls durch die Stadtwerke, teils durch die GEF Ingenieur AG, Leimen. Die Gesamtkosten für die Errichtung des Nahwärmennetzes (einschließlich Übergabestation, aber ohne Transportleitung vom Technologiezentrum) lagen bei 2,06 Mio. € brutto, was mit einer Leitungslänge von 2.790 m (inklusive Gebäudeanschlussleitungen) spezifische Trassenkosten von 740 €/m brutto ergibt. Die GEF AG hat durch kostengünstige Vergabe und genaue Kostenüberwachung erheblich zu einer Kostenbegrenzung beigetragen.

Die Gesamtkosten der Nahwärme-Versorgung frei Hausübergabestation ergeben sich bei einer Abgabe im Endausbau von  $Q_a$  (MWhth/a) und einer Einspeiseleistung  $Q_p$  (kWth) aus den

- Investitionskosten I für das Netz, kalkulatorisch (Vorgabe der VOLKSWOHNUNG) über N = 20 Jahre abgeschrieben: Mit einem kalkulatorischen Zinssatz von  $p = 4\%$  ergibt sich ein Annuitätsfaktor von  $a = 7,36\%$ ; Kosten für Wartung/Instandhaltung mit  $w = 0,5\%$  der Investitionskosten angesetzt,
- Kosten für den Netzbetrieb: Pumpstrom:  $e_p = 6 \text{ kWhel/MWhth}$  mit Strompreis  $p_{el} = 26 \text{ ct/kWhel}$ ,
- Beschaffungskosten der Fernwärme (Arbeitspreis AP, einschließlich der Netzverluste:  $v = 7,2\%$ , und Leistungspreis LP (vorgegeben durch die Stadtwerke, siehe oben),
- Verwaltungskosten (mit  $k_v = 6 \text{ €/MWhth}$  brutto angesetzt).

Die Summe dieser jährlichen (Brutto-)Kosten ergibt die Gesamtkosten der Wärmebereitstellung in Rintheim und – nach Division durch die Jahreswärmeabgabe – die spezifischen Wärmebereitstellungskosten frei Gebäude-Hausübergabestation (€/MWhth) mit folgender Formel:

$$(AIII-1) \quad k_B = \frac{I \cdot (a+w) + \left[ \frac{e_p}{1000} \cdot p_{el} + \left( 1 + \frac{v}{100} \right) \cdot AP + k_v \right] \cdot Q_a + LP \cdot Q_p}{Q_a} \text{ €/MWhth.}$$

Die zur Auswertung dieser Formel erforderlichen Daten der Nahwärme-Versorgung Rintheim sind wie folgt:

Alle Gebäude im Quartier wurden bis Ende 2014 an die Nahwärme angeschlossen, zusätzlich zu den 31 sanierten Bestandsgebäuden der VOLKSWOHNUNG (Wärmebedarf 5.730 MWhth/a entsprechend „Standardsanierung“, siehe Abschnitt AII-1.4) auch folgende weitere Gebäude mit einer Anschlusslänge von 180 m und Investitionskosten von 133.000 € brutto (in den o. g. Kosten bereits enthalten):

	Anschlusswert (kWth)	plausible Benut- zungsstunden	MWh/a
8 Neubauten VOLKSWOHNUNG (114 WE)	340	1.700	578
2 Mehrfamilienhäuser Dritter	230	1.700	391
1 Senioren-Wohnsitz	500	2.000	1.000
2 Schulen	700	1.000	700
	1.770		2.669

**Tab. AIII-1.1:** Gebäude Dritter im Wohnquartier Rintheim, die an die Nahwärme angeschlossen wurden bzw. noch werden; Anschlusswert laut Planungsdaten<sup>92</sup>; mit der Planung der Neubauten wurde 2014 begonnen.

<sup>92</sup> Gemessene Werte werden erst ab 2015 vorliegen.

In der Summe kommt die Nahwärme nach Anschluss aller Gebäude auf eine Jahresabgabe von  $Q_a \approx 8.400 \text{ MWh/a}$  mit einem Gesamt-Anschlusswert von 4.940 kWth bzw., bei einem Gleichzeitigkeitsfaktor von 0,78, mit einer realen Leistung von  $Q_p = 3.850 \text{ kWth}$ . Diese Jahres-Wärmeabgabe entspricht einer Liniendichte von rund 3,0 MWth pro m Trassenlänge.

Die mittleren Verluste der Nahwärme-Trassen (= Doppelleitung) liegen laut Herstellerangaben bei 25 W/m, also ca. 611 MWhth/a. Dies entspricht bei Vollausbau Verlusten von  $v = 7,2\%$ . Mit einem Beschaffungspreis von 48,17 €/MWhth brutto ergeben sich Kosten der Wärmeverluste von 29.400 €/a.

Der mittlere Druckverlust über die gesamte Leitungslänge liegt bei  $\Delta p \approx 100 \text{ Pa/m}$ , entsprechend einer Gesamt-Druckhöhe von  $\Delta P = 260 \text{ kPa}$ . Die resultierende Pumpleistung wird berechnet aus

$$N_{el} = \frac{1}{\eta_p} \cdot \Delta P \cdot V_p \text{ mit } V_p \text{ aus } V_p = \frac{Q_p}{3600 \cdot c_w \Delta t}$$

Hierbei sind

$\eta_p$  ... Wirkungsgrad der Umwälzpumpen (75 %)

$V_p$  ... umzuwälzendes Wasservolumen ( $\text{m}^3/\text{s}$ )

$Q_p$  ... maximale eingespeiste Wärmeleistung (kWth)

$c_w$  ... spezifische Wärmekapazität des Wassers: 1,163 kWh/( $\text{m}^3 \cdot \text{K}$ )

$\Delta t$  ... Nenn-Temperaturspreizung der Nahwärme-Versorgung: 30 K.

Daraus ergibt sich eine Nennleistung der Umwälzpumpen von ca. 8,5 kWel. Der Jahresstrombedarf der Umwälzpumpen hängt von der Pumpen- bzw. Temperatur-Regelung ab. Mit einem plausiblen Ansatz von 6.000 Volllast-Benutzungsstunden pro Jahr ergeben sich 51 MWhel/a oder  $e_p = 6 \text{ kWel/MWhth}$ . Mit einem Strompreis von  $p_{el} = 26 \text{ ct/kWhel}$  brutto ergibt dies Kosten von 13.260 €/a.

Die Festkosten als Summe aus Kapitaldienst und Wartungs- und Instandhaltungs-Kosten sind wie folgt (Kalkulationszinssatz 4 %, Abschreibungszeit N = 20 Jahre):

	€	N	W/I (%)	Annuität	€/a
Inv.-Kosten Netz netto	1.471.500	20	0,5	0,0736	115.630
Nebenkosten netto	262.500	20	0	0,0736	19.313
Summe netto	1.734.000				134.944
brutto	2.063.400				160.583

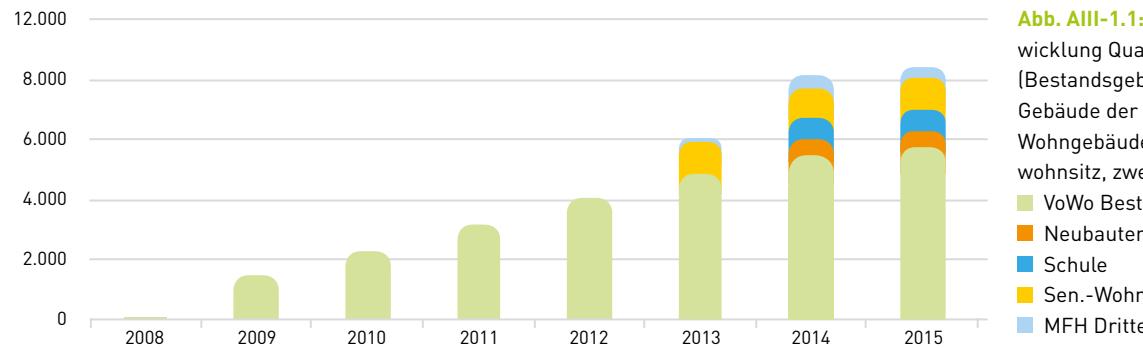
**Tab. AIII-1.2:** Festkosten des Nahwärmenetzes Rintheim nach Voll-Anschluss

Zu diesen Kosten werden noch die „Overhead-Kosten“ der KES – Karlsruher Energieservice GmbH addiert, die mit  $k_v = 6 \text{ €/MWhth}$  brutto angesetzt wurden. Kapitaldienst und W/I, Wärmeeverluste, Pumpstromaufwand und Overhead-Kosten ergeben „Festkosten des Nahwärmenetzes“ in Höhe von  $30,1 \text{ €/MWhth}$  brutto.

Hierzu müssen noch die Anlaufverluste addiert werden (nicht in Formel (AllI-1) enthalten), die sich ergeben, bis alle Verbraucher an die Nahwärme angeschlossen sind. Diese erhält man aus folgender Überlegung:

Mit der Errichtung des Nahwärmenetzes wurde 2008 begonnen, der Anschluss der Gebäude wird bis 2015 abgeschlossen sein, d. h. der Anschluss des Quartiers Rintheim benötigt sieben Jahre. Die bekannte Rate an Gebäudeanschlüssen in Rintheim ergibt folgende Entwicklung der Jahres-Wärmeabgabe im Quartier:

**NW-Anschlussentwicklung Quartier Rintheim 2008–2015 (MWh/a)**

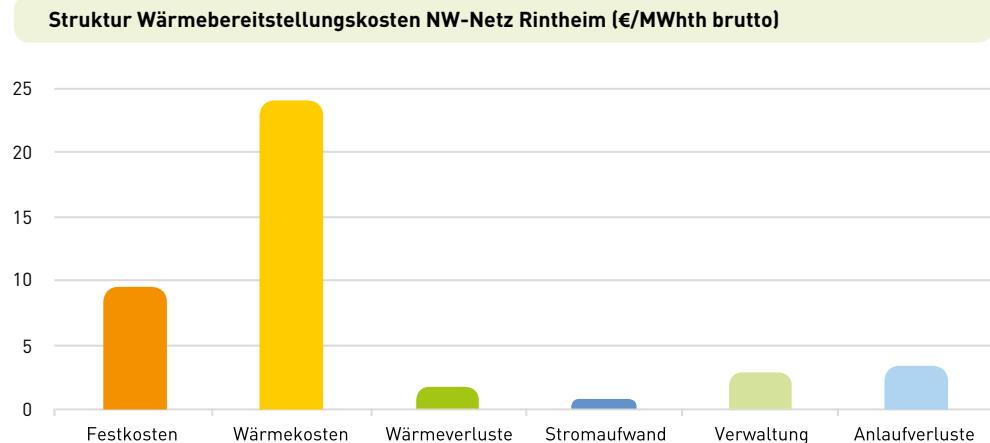


**Abb. AllI-1.1:** Anschlussentwicklung Quartier Rintheim (Bestandsgebäude, neue Gebäude der VOLKSWOHNUNG, Wohngebäude Dritter, Seniorenwohnsitz, zwei Schulen)  
 ● VoWo Bestand  
 ■ Neubauten  
 □ Schule  
 ▨ Sen.-Wohnsitz  
 ▲ MFH Dritte

Da demnach die vollen Einnahmen aus dem Wärmeverkauf, abzüglich der Kosten für die von den Stadtwerken Karlsruhe nicht bezogene Wärme, erst ab 2015 anstehen, ergeben sich in den Jahren zuvor Anlaufverluste (Differenz zwischen Soll- und Ist-Wärmeabgabe). Diese werden in den Gesamtpreis der Wärme frei Hausübergabestation einkalkuliert, indem die jährlichen Mindereinnahmen von 2008 bis einschließlich 2015 aufsummiert und auf die Gesamt-Wärmeabgabe über den vorgegebenen Kalkulationszeitraum von 20 Jahren (von 2009 bis 2028) umgelegt werden. Diese Rechnung ergibt Anlaufverluste von  $6,8 \text{ €/MWh}$  brutto, die zu den oben ermittelten Kosten hinzugaddiert werden. Dies führt zu Wärmegestehungskosten der Nahwärme Rintheim frei Gebäude von brutto  $p_{NW} = 85,1 \text{ €/MWhth}$ . Die Anlaufverluste machen somit 8 % der Wärmekosten aus, was zeigt, wie wichtig eine möglichst rasche Anschlussentwicklung ist.

Daraus ergibt sich die in Abb. AIII-1.2 gezeigte Kostenstruktur.

**Abb. AIII-1.2:** Aufteilung der Gesamt-Wärmegestehungskosten der Nahwärme frei Hausübergabestation in Höhe von 85,1 €/MWhth brutto auf die Bestandteile Festkosten, Wärmelieferkosten, Wärmeverluste, Pumpstrom, Verwaltungskosten und Anlaufverluste



In der Summe aller dieser Kostenbestandteile liegen die Kosten der Wärmebereitstellung für das Nahwärmenetz Rintheim somit bei 85,1 €/MWhth brutto, die mit dem o. g. Wärmebedarf und einer Gesamt-Nutzfläche von 87.000 m<sup>2</sup> (Tab. I-1) durchschnittliche Kosten der Wärmeversorgung des gesamten Quartiers von 8,2 €/m<sup>2</sup>.a bzw. 0,68 €/m<sup>2</sup>.Monat ergeben.

## Anhang AIII-2: Kosten und Wirtschaftlichkeit in der Wohnungswirtschaft

### AIII-2.1 Wirtschaftlichkeitsanalysen in der Wohnungswirtschaft

Grundsätzlich sind die Kosten der Wärmeversorgung von Mietwohnungen für die Wohnungswirtschaft ein durchlaufender Posten, der an die Mieter im Rahmen der jährlichen Nebenkostenabrechnung unter Berücksichtigung diverser Abrechnungsvorschriften weitergegeben wird. Daher wäre die Höhe dieser Nebenkosten für den Vermieter eigentlich unwichtig. Allerdings lagen die Kosten der Wärmeversorgung einer energetisch schlechten Wohnung, z. B. mit einem Wärmeverbrauch (Heizung, Warmwasser) von 200 kWh/m<sup>2</sup>, bei einem Heizölpreis von 3 ct/kWh im Jahr 2000 noch bei ca. 0,50 €/(m<sup>2</sup>.Monat), während sie beim Ölpreis 2013, ca. 9 ct/kWh, rund 1,50 €/(m<sup>2</sup>.Monat) betragen. Dies entspricht fast 40 % der Kaltmiete von nicht sanierten Wohnungen der VOLKSWOHNUNG von z. B. 4 €/(m<sup>2</sup>.Monat). Da energetisch derart schlechte Wohnungen auch ein Komfortproblem haben, wird die künftige Vermietbarkeit schwierig sein. Aus diesem Grund, neben weiteren, hat der Eigentümer ein direktes Interesse an einer energetischen Sanierung seiner Gebäude.

Die energetische Sanierung eines z. B. 40 Jahre alten Gebäudes wird jedoch im Allgemeinen in Form einer „integralen“ Sanierung erfolgen, mit der nicht nur umfassende energetische Maßnahmen durchgeführt werden, die in gewissem Umfang durch die EnEV vorgegeben sind, sondern auch generelle Modernisierungsmaßnahmen. Dies sind etwa: Sanitär, Elektro, Brand- und Schallschutz, Kommunikationstechnik, eventuell Aufzüge, Grundrissänderungen, Wohnumfeldverbesserungen etc. (siehe Abschnitt All-1.5). Ein so saniertes Gebäude kann erneut über 40 Jahre und länger vermietet werden. Die resultierenden Investitionskosten werden zum Teil aus der angesparten Instandhaltungskomponente der Kaltmiete finanziert, zum Teil sind sie als Modernisierungskosten unter bestimmten mietrechtlichen Vorgaben umlegbar auf die Kaltmiete, führen also zu einer Erhöhung der Miete. Die Kosten- und Einnahmenstruktur eines solchen Objektes wird in der Wohnungswirtschaft durch ein Instrument namens „vollständiger Finanzierungsplan“, auch „VoFi“ genannt, abgebildet. Ein VoFi ermöglicht die in der Wohnungswirtschaft übliche Wirtschaftlichkeitsanalyse für Mietwohngebäude, in der diverse Kostenbestandteile (Herstellungskosten, Instandhaltungskosten, Finanzierungskosten, Rückstellungen, Verwaltungskosten, Steuern/Abgaben etc.) und deren künftiger Verlauf in Form von gebäudespezifischen Jahreskosten dargestellt werden. Diese Kosten werden jährliche Einnahmen gegenübergestellt (Mieten, zukünftige Mietsteigerungen, Mietausfälle, Zuschüsse etc.). Aus einer Analyse über einen langen Zeitraum (z. B. 20 bis 30 Jahre) ergibt sich die Wirtschaftlichkeitsprognose für ein bestimmtes Gebäude.

Für die Wirtschaftlichkeitsanalyse von energetischen Maßnahmen ist eine solche Analyse nicht zweckmäßig. Hier interessieren die Gegenüberstellung von Investitionskosten zur Energieeinsparung einerseits und der Vergleich der Wärmegestehungskosten mit verschiedenen Arten der Wärmebereitstellung andererseits, mit dem Ziel, möglichst die optimale Maßnahmekombination für das betrachtete Gebäude herauszufinden, deren Kostenstruktur dann in die VoFi-Rechnung eingeht. Zu diesem Zweck sind andere Methoden besser geeignet, mit denen die Wirtschaftlichkeit von Einzelmaßnahmen oder ganzen Maßnahmenpaketen, die sich gegebenenfalls gegenseitig beeinflussen können, analysiert werden kann. Als wichtigstes Ergebnis einer solchen Wirtschaftlichkeitsanalyse dienen dabei nicht die Amortisationszeit oder ein Vergleich der resultierenden Wärmegestehungskosten, sondern die resultierenden Energiekosten (in €/(m<sup>2</sup>.Monat)), die – aus der Sicht des Mieters – in die Warmmiete als Summe von Miete und Kosten der Heizungs- und Warmwasser-Versorgung einfließen. Nach dem mit Hilfe dieser Methoden ein Gesamt-Optimum der energetischen Sanierungsmaßnahmen gefunden wurde – Anhang All-1 zeigt konkrete Beispiele für Vorgehensweise und Ergebnisse – können die resultierenden Kosten im Rahmen der „VoFi“ vom Wohnungsunternehmen weiter analysiert werden. Erst auf dieser Basis wird das Wohnungsunternehmen Investitionsentscheidungen treffen bzw. für seinen Gebäudebestand einen mittel- und langfristigen Investitionsplan aufstellen, der u. a. auch die Entwicklung eines ganzen Quartiers oder einer Wohnsiedlung betreffen kann.

Der Mieter hat durch die Sanierung/Modernisierung eine attraktivere Wohnung mit wesentlich erhöhtem Komfort und Nutzwert, d. h. eine Erhöhung der Kaltmiete ist gerechtfertigt.

Dem stehen geringere Heiz- und Warmwasser-Kosten gegenüber. Da die Gesamtkosten der Modernisierung die Kosten der energetischen Sanierung weit übersteigen, wird eine „warmmietneutrale“ normalerweise nicht möglich sein – oder nur dann, wenn der Energieverbrauch vor der Sanierung exzessiv hoch war.

Die Frage, die sich bei der Entwicklung eines energetischen Sanierungskonzepts eigentlich stellt, ist diese: Mit welcher Maßnahmenkombination können innerhalb der bestehenden Vorgaben minimale Gesamtkosten erzielt werden? Dies hängt unter anderem von der Ausgangssituation des betrachteten Gebäudes, von der Kosteneffizienz der Einsparinvestitionen und eventuell auch von der Verfügbarkeit von Fördermitteln und von den der Kalkulation zugrunde gelegten Energiepreisen ab.

## AIII-2.2 Integrale Energieplanung

Sowohl bei einem Energiekonzept für ein einzelnes Gebäude als auch bei einem Konzept für ein ganzes Quartier geht es immer um mehrere additive oder alternative Maßnahmen, die miteinander verglichen werden sollen bzw. für die ein Gesamtpaket gefunden werden soll, das die vorgegebenen wirtschaftlichen und energetischen Ziele möglichst gut erreicht. Diese optimale Kombination kann mit drei Schritten gefunden werden, die im Einzelnen einfach aussehen, aber bei der konkreten Umsetzung einen erheblichen Berechnungsumfang erfordern (→ Anhang AII-1).

### (1) Einzelmaßnahmen zur Energieeinsparung

Um Einzel-Einsparmaßnahmen behandeln zu können, wie etwa Wärmedämmung einer Hüllfläche oder Wärmerückgewinnung aus Abluft, muss jeweils die „Systemgrenze“ in geeigneter Weise definiert werden. Innerhalb dieser Systemgrenzen müssen eine Energiebilanz für die jeweils diskutierten Maßnahmen erstellt – also der Energieverbrauch vor und nach deren Umsetzung ermittelt – und eine Abgrenzung der dabei zu berücksichtigenden Kosten vorgenommen werden. Meist stehen hierfür nicht alle benötigten Daten zur Verfügung, sondern diese müssen teils durch Berechnung, teils durch plausible Annahmen ermittelt werden.

Einfaches Beispiel: Wärmeschutz-Maßnahmen an der Gebäudehüllfläche haben keinen Einfluss auf die Warmwasser-Versorgung. Die Nutzwärme wird aber zunächst gemeinsam erzeugt und im Gebäude verteilt, die resultierenden Kosten müssen also in geeigneter Weise auf Heizung und Warmwasser-Bereitstellung aufgeteilt werden, um Kosten und Nutzen abgrenzen zu können. Umgekehrt hat eine Solaranlage zur Warmwasser-Versorgung keinen unmittelbaren Einfluss auf den Heizenergiebedarf. Für eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung muss aber auch hier eine geeignete Aufteilung der entstehenden Kosten bzw. Wärmeverluste (Kessel/Hausübergabestation, Pufferspeicher, Versorgungsstränge) vorgenommen werden, um die Kosteneffizienz der Maßnahme für sich analysieren zu können. Dies ist oft in unterschiedlicher Weise möglich. Daher muss bei der Analyse eine präzise Bilanzierung erfolgen,

um die Ergebnisse nicht zu verfälschen, wie es z. B. durch Mehrfachanrechnung oder nicht korrekte Zuordnung der Kosten geschehen kann.

Nach dieser Abgrenzung hinsichtlich Kosten- und Energiebilanz kann die mit der jeweiligen Maßnahme zu erwartende Energieeinsparung berechnet werden. Der Quotient aus den Jahreskosten der Maßnahme – eventuell unter Berücksichtigung von jährlichen Wartungs- und Betriebskosten (z. B. Stromverbrauch einer Lüftungsanlage) und nach Abzug möglicher Einsparungen in den Betriebskosten – mit der jährlichen Einsparung ergibt die Einsparkosten der Maßnahme ( $\text{ct}/\text{kWh}$ ). Diese sollen entweder ein Minimum sein oder werden verglichen mit den Kosten der alternativ möglichen Erzeugung der (nicht eingesparten) Energie mit einem aktuellen oder für die Zukunft erwarteten Energiepreis. Diese letzteren Kosten bilden die wirtschaftliche Obergrenze der betrachteten Einsparmaßnahme(n).

## **[2] Energieerzeugungsmaßnahmen**

Das Kriterium der Wirtschaftlichkeit unterschiedlicher Erzeugungs-Alternativen sind die jeweiligen Wärmegestehungskosten ( $\text{€}/\text{MWhth}$ ), die sich aus dem Quotienten der Gesamt-Jahreskosten (Jahreskosten der Investition, Wartungskosten, Energiekosten, eventuelle Gutschriften, etwa bei BHKW-Einsatz) der jeweiligen Variante mit der erzeugten Nutzwärme ergeben (→ Beispiel Nahwärme-Kosten, Anhang AIII-1). Diese können mit den Ergebnissen der Berechnung der Einsparkosten verglichen werden, um die günstigsten Maßnahmen auszuwählen.

Die Ermittlung der eingesetzten Endenergie ist bei komplexen Systemen meist nicht ganz einfach. Hierzu kann die in Anhang A1-3 beschriebene Methode herangezogen werden.

## **[3] Integrale Energieplanung**

Die Ergebnisse von Energieeinsparmaßnahmen beeinflussen die Kosten der Energiebereitstellung. Deshalb ist es notwendig, Einsparkosten und Erzeugungskosten für unterschiedliche Maßnahmenpakete in einem iterativen Verfahren zu berechnen, um diese Wechselwirkung zu berücksichtigen. Dazu müssen die benötigten Berechnungen computergestützt ausgeführt werden, um Iterationen oder Änderungen in den Annahmen und verschiedene Varianten einfach und schnell berechnen zu können.

Bei einer solchen integralen Sanierung werden Energiebedarf und -bereitstellung zusammen optimiert. Hierbei wird der Energiebedarf je nach Umfang der angedachten Energieeinsparmaßnahmen unterschiedlich hoch sein. Um die Wirtschaftlichkeit solcher Varianten untereinander und mit dem Zustand vor der Sanierung vergleichen zu können, sind daher weder die Einsparkosten noch die Wärmegestehungskosten, sondern nur die zu erwartenden Vollkosten pro  $\text{m}^2$  Nutzfläche ausschlaggebend. Diese müssen für die verschiedenen Konzepte bzw. Maßnahmenpakete berechnet bzw. minimiert werden. Der Vergleich verschiedener, für sich optimierter Maßnahmenpakete ermöglicht es schließlich, das optimale Maßnahmenpaket und dessen wirtschaftliche und energetische Kennzahlen herauszufinden (→ Beispiel Anhang A-II).



## Danksagung

An einem umfangreichen Projekt mit vielen Einzelaspekten, wie dem hier beschriebenen Quartiers-Modernisierungsprojekt, sind viele Akteure beteiligt. Wenn auch der abschließende Bericht nur von zwei Autoren erstellt wurde, so waren doch eine Anzahl weiterer Personen maßgeblich am Zustandekommen zunächst des Projektes insgesamt und schließlich der zugehörigen Publikation beteiligt, beginnend mit der Unterstützung durch den Projektträger Jülich in Person von Jürgen Gehrman, durch die Planer, KW2 Ingenieure, und den wissenschaftlichen Begleiter, Prof. Dirk Müller, sowie die an der Umsetzung Beteiligten, Prof. Klaus Wolfrum, Tanja Osterhage und Davide Calì, und die Beteiligten an der Evaluierung der Ergebnisse, Erwin Ruoff, Andreas Koch und Hubert Fielenbach. Selbstverständlich war eine ganze Anzahl an Mitarbeitern der VOLKSWOHNUNG maßgeblich in das Projekt involviert, allen voran Dieter Wagner von der Planungsabteilung, der das Projekt mit großem Engagement vorangetrieben hat, sowie Beatrice Kindler von der Unternehmenskommunikation.

Das Lektorat in Person von Rüdiger Buchholz und seinen Kollegen hat sich sehr um die Formulierung und Textgestaltung verdient gemacht. Und last not least ein Dankeschön an Prof. Thomas Lützkendorf für sein Feedback zum Text und Anregungen zu den von uns gemachten Schlussfolgerungen.

Unser Dank gebührt natürlich insbesondere dem Bundesministerium für Wirtschaft und Energie für die Förderung des Forschungsprojektes. Rodoula Tryfonidou und Knut Kübler haben die EnEff:Stadt – Forschungsinitiative, deren erstes Umsetzungs-Projekt das Vorhaben in Rintheim war, von Anfang an unterstützt. Die oft unterschätzte Hebelwirkung einer Förderung komplizierter Projekte wie diesem in seiner Anfangsphase hat sich hier wieder gezeigt. Mögen die hier beschriebenen und noch weiter gemachten Projekterfahrungen zur Weiterentwicklung nachhaltiger Energietechnik beitragen.

Karlsruhe, im Februar 2014



## Die Autoren

### **Reinhard Jank**

Dr. Reinhard Jank ist Physiker und war in seiner letzten beruflichen Station vor seiner Pensionierung Energiebeauftragter der VOLKSWOHNUNG in Karlsruhe. In dieser Funktion betreute er mehrere Forschungsprojekte im Bereich der Wohnungswirtschaft. Davor war er elf Jahre lang Geschäftsführer der Klimaschutz- und Energieagentur (KEA) des Landes Baden-Württemberg, nachdem er zuvor Leiter der Abteilung „Kommunale Dienstleistungen“ bei der Vereinigten Saar-Elektrizitätswerke (VSE) AG in Saarbrücken gewesen war. Seine Hauptinteressen liegen in den Bereichen Energiesparendes Bauen und Energietechnologien.

### **Reiner Kuklinski**

Seit dem 1. August 2006 ist Reiner Kuklinski Geschäftsführer der VOLKSWOHNUNG. Der Architekt und Immobilienfachmann war zuvor sechs Jahre Geschäftsführer des Wohnungsunternehmens WOBA Dresden GmbH und arbeitete in Leitungspositionen bei der GAGFAH GmbH in Essen bzw. der debis AG in Berlin. Seine Themenschwerpunkte: Kundenzufriedenheit und mehr Kundennähe, Quartiers- und Energiekonzepte, Entwicklung von neuen Stadtteilen und vor allem die Schaffung von bezahlbarem Wohnraum.

ISBN 978-3-8167-9421-9



9 783816 794219