

Wissenschaftliche Begleitung der Sanierung Rotlintstraße 116-128 in Frankfurt a. M.



Teilbericht

Planungsphase und Null-Emissions-Konzept

Bauherr:

ABG Frankfurt Holding GmbH

Fördermittelgeber des Forschungsprojekts:



Darmstadt, September 2010

Autoren: Marc Großklos
Dr. Thilo Koch
Dr. Nikolaus Diefenbach

Reprotechnik: Redah Hatteh

IWU-Bestellnummer: 02/10

ISBN 978-3-941140-15-8



Institut Wohnen und Umwelt GmbH
Annastraße 15
64285 Darmstadt
Tel. 06151 - 2904-0

Email: info@iwu.de
Internet: www.iwu.de

Inhalt

1	Einleitung	1
2	Beschreibung der Gebäude vor der Sanierung.....	3
2.1	Lage und Zuschnitt der Wohnungen.....	3
2.2	Zustand vor der Sanierung	5
2.3	Luftdichtheitsmessungen vor Sanierung.....	7
3	Vorstellung des Sanierungskonzepts.....	11
3.1	Übersicht.....	11
3.2	Energetisches Konzept.....	14
3.2.1	Gebäudehülle	14
3.2.2	Anlagentechnik	20
3.3	Nicht energetisch bedingte Sanierungsmaßnahmen	21
4	Planungsdokumentation Sanierung zum Passivhaus	23
4.1	Fassadenkonstruktion.....	23
4.1.1	Konstruktion im 1. Bauabschnitt	23
4.1.2	U-Wert der Fassade im 1. Bauabschnitt.....	24
4.1.3	Konstruktion 2. und 3. Bauabschnitt.....	31
4.1.4	U-Wert der Fassade im 2. und 3. Bauabschnitt.....	36
4.1.5	Wärmebrücken im Fassadenbereich	43
4.1.6	Energetischer Vergleich der beiden Fassadenkonstruktionen	52
4.2	Energetische Betrachtung weiterer Teile der Gebäudehülle	53
4.2.1	Kellerdeckendämmung	53
4.2.2	Dämmschürzen an Kellerinnenwänden	53
4.2.3	Haustüren	55
4.2.4	Wärmebrücken im Treppenhaus und am Kellerabgang	56
4.2.5	Einbindung der Aufzüge	60
4.2.6	Punktförmige Wärmebrücken	61
4.3	Luftdichtheitskonzept	63
4.3.1	Ergebnis der Luftdichtheitsmessungen nach Sanierung.....	65
4.4	Lüftungskonzept.....	68
4.4.1	Lüftung der Wohnungen	68
4.4.2	Lüftung im Treppenhaus.....	71
4.4.3	Kellerlüftung.....	73
4.5	Anlagentechnik	75
4.5.1	Gesamtkonzept.....	75
4.5.2	Warmwasserbereitung mit thermischen Solaranlagen	75
4.5.3	Trinkwasserbehandlung.....	77
4.5.4	Wärmeverteilung Heizung und Warmwasser	78
4.5.5	Reduktion der Verteilverluste durch erhöhte Dämmstärken	83
4.5.6	Wärmeversorgung	85
5	Energetische Nutzung von Rapsöl.....	91
5.1	Anbau und Verwendung von Raps	91
5.2	Rapsanbau kontra Nahrungsmittelproduktion.....	92
5.3	Einschätzungen zur Rapsölnutzung	94
5.4	Klimarelevanz der energetischen Nutzung von Rapsöl	94
5.5	Berechnung von CO ₂ -Emissionsfaktoren mit GEMIS	95

5.6	Fazit Rapsölanbau	98
6	Null-Emissions-Ansatz für Gebäude	99
6.1	Definition von Null-Emissions-Gebäuden: Konzepte und Probleme	99
6.2	Leitlinien für das Null-Emissions-Haus	102
7	Energiebilanzberechnungen	105
7.1	Energiebedarf vor der Sanierung	105
7.2	Energieverbrauch vor der Sanierung	106
7.3	Energiebedarf nach Sanierung nach dem Berechnungsverfahren der EnEV	108
7.4	Energiebilanz nach Sanierung gemäß Passivhaus-Projektierungs-Paket (PHPP)	109
7.4.1	Heizwärmebedarf	109
7.4.2	Einfluss der Wärmebrücken	113
7.4.3	Auswirkung der Gebäudeorientierung auf den Heizwärmebedarf	114
7.4.4	Gesamtwärmebedarf und Wärmeerzeugung	115
7.4.5	Endenergiebedarf	116
7.4.6	Primärenergiebilanz	121
7.5	Bilanzierung des Null-Emissions-Ansatzes für die Rotlintstraße	123
7.6	Einsparungen durch die Sanierung	125
8	Fazit	127
	Literatur	129

1 Einleitung

Die ABG Frankfurt Holding ist mit über 50.000 Wohnungen die größte Wohnungseigentümerin in Frankfurt. Sie hat seit einigen Jahren verstärkt Neubau im Passivhausstandard errichtet. Einige der Neubau-Mehrfamilienhäuser im Passivhausstandard sind „Gremppstraße“, „Sophienhof“ oder „Campo“. Im Bereich der Sanierung wurden zwischen 2004 und 2006 in der Tevesstraße zwei Mehrfamilienhäuser mit Passivhauskomponenten saniert. Bei diesem Projekt wurde ein Heizwärmebedarf von 16,7 kWh/(m²a) erreicht. Die mittlerweile vorliegenden Ergebnisse aus der Nutzungsphase bestätigen mit einem gemessenen Heizwärmeverbrauch von 15,7 kWh/(m²a) die projektierten niedrigen Verbräuche. Berücksichtigt man die nutzbaren Wärmeverluste der Verteilungen, so erhöhte sich zwar der Wärmeverbrauch auf 18,1 kWh/(m²a), allerdings bei einem komfortablen Temperaturniveau von 21,8 °C [Peper 2009]. Dies zeigt, dass bereits bei den Gebäuden in der Tevesstraße außergewöhnlich niedrige Verbrauchswerte erreicht wurden, ohne dass die Nutzer sich beim thermischen Komfort einschränken mussten.

In einem neuen Projekt, das in diesem Bericht vorgestellt wird, soll in den Gebäuden der Rotlintstraße 116-128 im Frankfurter Nordend nun der Passivhausstandard bei energetischen Sanierung von drei Gebäuden erreicht werden. Darüber hinaus sollte auch die Effizienz der Anlagentechnik optimiert sowie die Nutzer in die Steigerung der Gesamteffizienz eingebunden werden. Die Sanierungsziele sind hier unter anderem:

- Sanierung der Gebäude auf Passivhausstandard (im Mittel über die gesamte Wohnfläche)
- Entwicklung und Anwendung von Fassadendämmungen mit überwiegend nachwachsenden Rohstoffen
- Verminderung der Warmwasserverbräuche sowie der Energieverbräuche für die Warmwasserbereitung
- Verminderung der Stromverbräuche der Mieter durch Installationen, Geräte und Information
- Beheizung und Warmwasserbereitung überwiegend aus regenerativen Energieträgern über eine thermische Solaranlage und ein Rapsöl-Blockheizkraftwerk
- Das Haus soll nach Abschluss der Arbeiten in der Bilanz möglichst keine Treibhausgas-Emissionen ausstoßen („Null-Emission-Haus“-Ansatz)
- Vermietung der Wohnungen mit Warmmieten, d. h. ohne individuelle Abrechnung von Heizkosten (hierauf wird in einem der folgenden Bericht eingegangen)

Der vorliegende Teilbericht dokumentiert Bestandsaufnahme, Planungsphase (Stand September 2010), eine Literaturrecherche zur energetischen Rapsölnutzung, Überlegungen zu Leitlinien für Null-Emissions-Gebäude, Gebäudebilanzen und Analysen zur Einsparungen durch die Sanierung. In weiteren Teilberichten, die für die Jahre 2011 und 2012 geplant sind, werden die Bauphase dokumentiert, eine wohnungswirtschaftliche Analyse durchgeführt sowie im Endbericht die Messergebnisse ausgewertet und eine Gesamtbewertung des Projekts durchgeführt.

Das Büro faktor10 aus Darmstadt ist in diesem Projekt federführend und u. a. für Sanierungsplanung, Gestaltung und Bauleitung zuständig. Die Ingenieurbüros bauart aus Lauterbach (Statik, Brandschutz) und Baumgartner aus Mörlenbach (Anlagentechnik)

übernehmen weitere wichtige Planungsleistungen. Das Institut Wohnen und Umwelt (IWU) begleitet die Planung wissenschaftlich, führt die energetischen Bilanzierungen durch und dokumentiert das Projekt.

Die Autoren bedanken bei allen am Projekt beteiligten für die vertrauensvolle und gute Zusammenarbeit. Besonders sollen an dieser Stelle Herr Wagner und Herr Theobald von der ABG Frankfurt Holding, Herr Rasch, Herr Rögner und Frau Grenz vom Büro faktor10 und Herr Baumgartner vom IB Baumgartner genannt werden. Die Büros faktor10 sowie bauart Konstruktions haben die im Text abgebildeten Pläne zur Verfügung gestellt, das Ingenieurbüro Baumgartner in Mörlenbach Unterlagen und Informationen zur Anlagentechnik.

Ein besonderer Dank gilt dem Hessischen Ministerium für Umwelt, Energie, Landwirtschaft und Verbraucherschutz, das gemeinsam mit Mitteln aus dem Europäischen Regionalfond RWB-EFRE die Finanzierung der wissenschaftlichen Begleitung übernommen hat.

2 Beschreibung der Gebäude vor der Sanierung

2.1 Lage und Zuschnitt der Wohnungen

Die Gebäude des Sanierungsprojekts befinden sich im Frankfurter Nordend in der Rotlintstraße 116-128 (Abb. 2.1-1). Es handelt sich dabei um drei Blöcke, die im Jahr 1956 von der „Aktiengesellschaft für kleine Wohnungen, Frankfurt“ errichtet wurden und sich heute im Besitz der ABG Frankfurt Holding befinden. Vor der Sanierung besaßen die Gebäude insgesamt 54 Zwei- bzw. Drei-Zimmer-Wohnungen mit einer Gesamtwohnfläche von ca. 3180 m². Die Gebäude sind voll unterkellert, das Erdgeschoss beginnt ca. 1 m über Erdreich, die lichte Geschosshöhe liegt bei ca. 2,50 m. Die Erschließungstreppe der zweispännigen Gebäude liegt jeweils mittig im Grundriss. Vom Treppenhaus aus wird auch der Keller und der nicht ausgebauten Dach- bzw. Trockenboden erschlossen.



Rotlintstraße 122-124 von Südost



Rotlintstraße 118-120 Südseite



Rotlintstraße 126-128 Südseite



Rotlintstraße 122-124 Westseite, hinten Nr. 126

Abb. 2.1-1: Ansichten der Gebäude vor der Sanierung

Die Häuser der Rotlintstraße 116-120 bilden einen Block mit drei Hauseingängen und je drei Vollgeschossen. Hausnummer 116 ist leicht aus der Achse der beiden anderen Gebäude gedreht und um ca. 2 m nach Süden versetzt. Rotlintstraße 122-124 besitzt vier, Rotlintstraße 126-128 fünf Vollgeschosse; beide Blöcke besaßen ursprünglich einen Lastenaufzug im Treppenhaus. In Tabelle 2.1-1 sind die wichtigsten Kenndaten der Gebäude

vor der Sanierung zu finden, Abb. 2.1-2 zeigt den Grundriss des Blocks 116-120, Abb. 2.1-3 einen Grundriss aus dem Block 126-128.

Tabelle 2.1-1: Kenndaten der Gebäude vor Sanierung

	Vollgeschosse	Anzahl der Wohnungen	Wohnfläche [m ²]
Rotlintstraße 116-120	3	18	1014
Rotlintstraße 122-124	4	16	900
Rotlintstraße 126-128	5	20	1234
Gesamt		54	3148

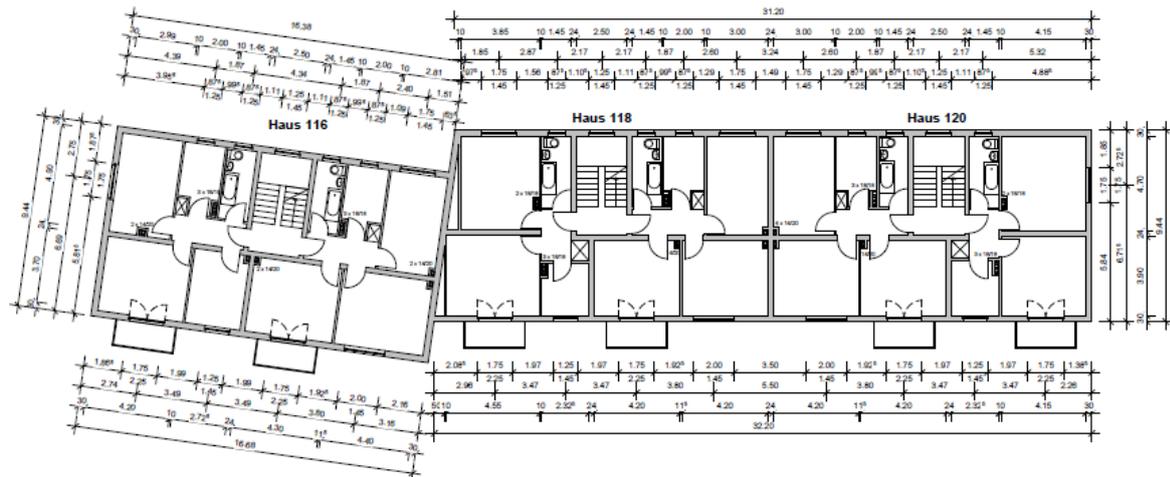


Abb. 2.1-2: Typischer Grundriss Rotlintstraße 116-120 vor der Sanierung

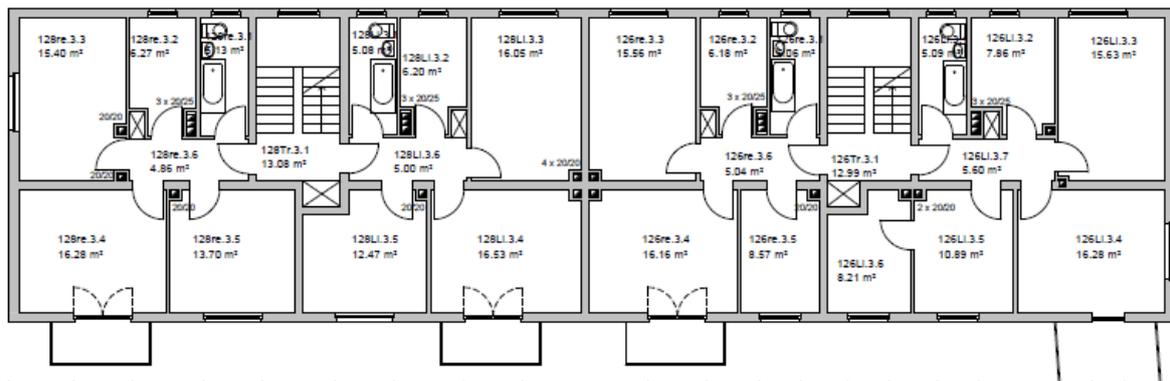


Abb. 2.1-3: Typischer Grundriss Rotlintstraße 126-128 vor der Sanierung

Die Gebäude liegen in einer attraktiven Grünanlage einer ruhigen Parallelstraße zur Friedberger Landstraße mit guter ÖPNV-Anbindung in die Innenstadt (siehe Abb. 2.1-4). In der Nähe finden sich Einkaufs- und Freizeitmöglichkeiten. Insgesamt ergibt sich das Bild einer kleinen, stadtnahen Wohnanlage, die jedoch eine grundlegende Sanierung erforderte, um die weitere Vermietbarkeit zu sichern.



Abb. 2.1-4: Kartenausschnitt mit den Gebäuden Rotlintstraße 116-128 (Quelle: www.openstreetmap.de)

2.2 Zustand vor der Sanierung

Die Gebäude waren vor der Sanierung voll vermietet, das äußere Erscheinungsbild der Gebäude war durch die grau-gelbe Farbe der Fassaden und den Zahn der Zeit als trist zu bezeichnen, die Balkone wiesen nennenswerte Schäden mit Betonabplatzungen auf. Die Wohnungen waren von der ABG Frankfurt Holding bei Mieterwechsel zwar teilweise saniert worden (Fenster austausch, Gasetagenheizungen, neue Bäder), zentrale Installationen stammten jedoch teilweise noch aus der Errichtungszeit. Sowohl an den Außenfassaden als auch in den Treppenhäusern zeigten sich deutliche Risse in den Wänden. Hier wurde im Vorfeld eine Baugrunduntersuchung durchgeführt und die Entwicklung der Risse kontrolliert, um grundlegende statische Probleme auszuschließen bzw. Ertüchtigungsmaßnahmen ergreifen zu können.

Wände und Decken

Die Außenwände der Gebäude wurden aus 30 cm starken Hohlblocksteinen der Trümmer-Verwertungs-Gesellschaft (TVG) erstellt, die Haustrennwände im Dachgeschoss bestanden aus Ziegel und TVG-Reststeinen mit einer vertikalen Dachpappelage und einem kleinem Luftspalt. Die Innenwände wurden mit TVG-Vollsteinen von 11,5 und 24 cm Stärke ausgeführt, der Putz wies Dicken von 1,5 bis 2 cm auf und sandete. Die Kelleraußenwände bestehen aus 36,5 cm Stampfbeton mit einer äußeren Ziegelabmauerung bis auf ca. halbe Kellerhöhe. Die Innenwände im Keller wurden mit Wandstärken zwischen 7 und 36,5 cm ausgeführt. Die Kellerdecke besteht aus einer Flachkappendecke, die lichte Raumhöhe im Keller betrug ca. 2,30 m. Der Keller war durch einen Abgang vom Treppenhaus und durch eine Außentür zugänglich. Größere Feuchteprobleme waren im Keller nicht zu erkennen.

Auf den Rohdecken aus ca. 16 cm Beton waren ca. 1 cm Mineralfaser als Trittschall-dämmung und ca. 5 cm Estrich vorhanden, was durch Kernbohrungen im Vorfeld der Sanierungen ermittelt wurde. Die Stufen im Treppenhaus bestehen aus grauen Kunststeinen und waren noch in gutem Zustand, allerdings wurden die heutigen Schallschutzanforderungen nicht erfüllt. Im Eingangsbereich waren Natursteinplatten aus Kalkstein bis in die Mitte der Wand als Bekleidung vorhanden.

Der obere Abschluss der Treppenhäuser war in verputzten, zementgebundenen Holzwolleplatten ausgeführt, die Seitenwände sind mit TVG-Steinen gemauert. Die Balkone in den Wohnzimmern waren an die Geschosdecke ohne thermische Trennung anbetoniert.

Dach

Das Dach der Gebäude war mit Bieberschwanz-Ziegeln ohne Unterspannbahn gedeckt, wies eine Dachneigung von ca. 30° auf und es waren deutliche Altersschäden vorhanden. Das Sparrenmaß lag bei ca. 14 x 8 cm. In einer weiter zurückliegenden Maßnahme war die oberste Geschosdecke mit ca. 4 cm Mineralfaserdämmung und einer zusätzlichen Estrichschicht versehen worden. Im Dachgeschoss waren Trockenböden für die Mieter vorhanden.

Fenster und Türen

Die Fenster in den Wohnungen waren in den letzten 25 Jahren sukzessive durch isolierverglaste Kunststofffenster ersetzt worden, wobei zahlreiche dieser Fenster aufgrund von Abnutzungen (z. B. an den Beschlägen) nicht mehr einwandfrei funktionierten. Sie saßen mit einem Außenanschlag etwa mittig in der Bestandswand, die Innenfensterbänke waren aus Kunststoff gefertigt. Die Treppenhausfenster waren durchweg noch einfach verglast und in einen Holzrahmen eingebaut. Die Erdgeschosswohnungen besaßen Holzrollläden mit Gurtabwickler, die oberen Stockwerke hatten keine bauseitigen äußeren Verdunkelungsmöglichkeiten, diese waren aber teilweise von den Mietern nachgerüstet worden. Die Wohnungseingangstüren bestanden aus Holztüren mit Spion. Der Eingangsbereich war seitlich mit Betonsteinen eingefasst, in voller Breite überdacht und mit einer hölzernen, einfach verglasten Haustür mit daneben liegender Briefkastenanlage aus Metall abgeschlossen.

Sonstiges

Für jeden Raum waren Kamine der früheren Einzelofenheizungen vorhanden, die Beheizung erfolgte vor der Sanierung über Gasetagenheizungen, die Verteilung war auf Putz als 2-Rohr-System ohne Dämmung verlegt. Heizkörpernischen waren nicht vorhanden. Auch die Warmwasserbereitung erfolgte über die Gasthermen im Durchlauferhitzerprinzip. Die Belüftung erfolgte über Fensterlüftung, in der Küche waren zusätzliche Entlüftungsgitter nach draußen vorhanden, die teilweise von den Mietern übertapeziert worden waren.

Die folgende Tabelle 2.2-1 zeigt die Aufbauten der Außenbauteile und die berechneten U-Werte.

Tabelle 2.2-1: Übersicht über die Bauteile der thermischen Hülle der Gebäude vor der Sanierung

Bauteil	Aufbau	U-Wert [W/(m ² K)]
Außenwand	2 cm Innenputz 30 cm Trümmerhohlblockstein ($\lambda=0,61$ W/(mK) nach Hummel, 1947) 2 cm Außenputz	1,4
Treppenhauswand im DG	2 cm Innenputz 24 cm TVG-Vollziegel	1,5
Wand gegen Keller	2 cm Innenputz 24 cm Trümmerhohlblockstein	1,5
Decke im Treppenhaus	1 cm Innenputz 5 cm Holzwolle-Bauplatte	1,6
Oberste Geschossdecke	1 cm Innenputz (Decke) 16 cm Betondecke mit Bewehrungsstahl 6 mm 1 cm Polystyrol-Trittschalldämmung ca. 4 cm Estrich 4 cm Mineralfaser-Wärmedämmung 4 cm Estrich	0,6
Kellerdecke	16 cm Betondecke mit Bewehrungsstahl 6 mm 1 cm Mineralfaser-Trittschalldämmung ca. 5 cm Estrich 1 cm Bodenbelag	1,4
Fenster	<u>Wohnungen</u> : Kunststofffenster mit 2-Scheiben-Isolierverglasung (einzelne Fenster mit Wärmeschutzverglasung) <u>Treppenhaus</u> : Holzfenster mit Einscheibenverglasung	2,9 4,5
Türen	<u>Hauseingangstür</u> : Holztür mit Einsatz aus Einscheibenverglasung und Briefkastenanlage <u>Keller- und Dachbodentüren</u> : Holztüren, 3 cm	4,5 2,0

2.3 Luftdichtheitsmessungen vor Sanierung

Vor Beginn der Sanierungsarbeiten wurden vom Ingenieurbüro n50 in Kassel am 21.07.2008 in den Häusern Rotlintstraße 116, 118 und 120 Dichtheitsmessungen der Gebäudehülle mit dem Blower-Door-Test durchgeführt. Alle Wohnungen waren zu diesem Zeitpunkt unbewohnt, die ursprünglich vorhandenen Gasetagenheizungen waren bereits überwiegend ausgebaut und die Kaminanschlüsse vermörtelt. Die Messungen wurden nach EN 13829, Verfahren A (Messung im Nutzungszustand) vorgenommen, wobei Abwassersiphons und noch offene Abgasrohre ebenso wie im Zuge der Voruntersuchung durchgeführte Kernbohrungen verschlossen wurden. In den Küchen vorhandene Lüftungsgitter blieben in dem vorgefundenen Zustand (offen bzw. übertapeziert). Eine weitere Messung wurde mit abgeklebter Briefkastenanlage an der Hauseingangstür, abgeklebter Kellertür sowie mit abgeklebten Dachbodentüren durchgeführt, um die Situation ohne diese Anschlüsse zu erfassen, die im Zuge der Sanierung grundlegend geändert werden. Die Messung des zweiten Blockes (Rotlintstraße 122-124) erfolgte am 30.03.2009, ebenfalls durch das Büro n50.

Tabelle 2.3-1 zeigt die Ergebnisse dieser Messungen. Im Nutzungszustand ergibt sich vor Sanierung im Mittel ein n_{50} -Wert von 3,2 1/h, wobei die Einzelergebnisse der verschiedenen Treppenhäuser nur wenig voneinander abweichen. Werden die beschriebenen zusätzlichen Abklebungen vorgenommen, reduziert sich der n_{50} -Wert im Mittel für den ersten Block auf 2,0 1/h. Beide Ergebnisse sind für Bestandsgebäude als vergleichsweise günstig einzustufen und bilden eine gute Voraussetzung für das Erreichen eines Wertes von 0,6 1/h nach der Sanierung.

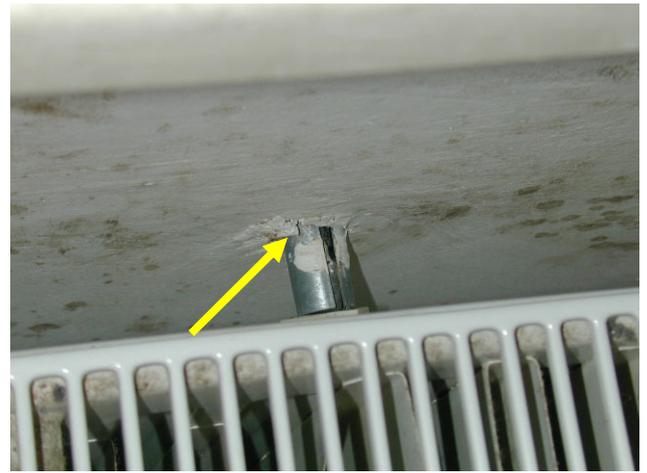
Tabelle 2.3-1: Messergebnisse Blower-Door-Tests Rotlintstraße 116-124 vor Sanierung [n₅₀]

Gebäude	Volumen	n_{50} -Wert (Verfahren A)	n_{50} -Wert (Abklebung an Eingang, Kellertür und Dachbodentüren)
Rotlintstraße 116	945 m ³	3,5 1/h +/- 6%	2,3 1/h +/- 7%
Rotlintstraße 118	945 m ³	2,9 1/h +/- 6%	1,9 1/h +/- 6%
Rotlintstraße 120	945 m ³	3,1 1/h +/- 6%	1,9 1/h +/- 6%
Rotlintstraße 122	1305 m ³	3,5 1/h +/- 6 %	
Rotlintstraße 124	1308 m ³	2,8 1/h +/- 7 %	
Mittelwert	1090 m ³	3,2 1/h	2,0 1/h

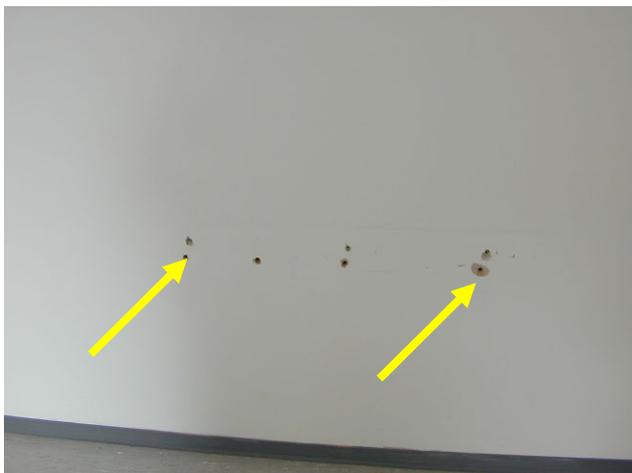
Bei der Leckageortung während der Drucktests wurden typische Undichtigkeiten in der Gebäudehülle gefunden wie Rollladenkästen und Gurtabwickler, Fenster, Anschlüsse Fenster-Fensterbank, Steckdosen und Dübellöcher in den Außenwänden, Vorwandinstallationen im Bad sowie Risse in den Wandflächen. Besonders letztere zeigten, dass das Mauerwerk der Gebäude selbst nicht luftdicht ist und der Innenputz als luftdichte Ebene lückenlos bei allen Arbeiten im Sanierungsprozess geschlossen werden muss. Zusätzlich muss beim Einbau von Installationen in die Wände auf eine luftdichte Verlegung geachtet werden. Zum Keller und zum Dachboden wurden keine nennenswerten Undichtigkeiten gefunden, so dass von einem weitgehend luftdichten Anschluss der Geschossdecken ausgegangen werden kann. Abb. 2.3-1 zeigt einige Details mit Undichtigkeiten vor der Sanierung.



Undichter Rolladenkasten mit Gurtabwickler



Undichte Heizkörperhalterung



Undichte Dübellöcher in der Außenwand



Risse im Innenputz führen zu Undichtigkeiten

Abb. 2.3-1: Exemplarische Darstellung von Undichtigkeiten in der Gebäudehülle vor der Sanierung

3 Vorstellung des Sanierungskonzepts

3.1 Übersicht

Im Zuge der Sanierung sollen die Gebäude energetisch, schallschutztechnisch, optisch sowie vom Grundrissangebot auf den neuesten Stand gebracht werden. Die Bestandswohnungen weisen Wohnflächen zwischen 50 m² und 65 m² mit 2 bzw. 3 Zimmern auf und wurden in ihren Grundrissen nur bedingt verändert. So wurde die Trennwand zwischen Küche und Badezimmer versetzt, um den Einbau einer modernen Badewanne zu ermöglichen und gleichzeitig Raum zur Montage des Lüftungsgerätes und der Lüftungsleitungen zu schaffen. In einem Teil der Wohnungen wurde die Küche in einen großen Wohn-Essraum integriert oder nicht tragende Innenwände versetzt. Die alten Balkone wurden abgebrochen und durch neue, vergrößerte Balkonanlagen ersetzt.



Abb. 3.1-1: Grundriss Rotlintstraße 116-120 Keller-, Erd- und Dachgeschoss

Die Erdgeschosswohnungen besitzen zusätzlich kleine Mietergärten mit einem direkten Zugang vom Balkon aus. Die neu geschaffenen 3 bzw. 4 Zimmer-Wohnungen in den aufgesetzten Staffelgeschosswohnungen erhalten eine großzügige Aufteilung und Dachterrassen, die nicht von Nachbarn einsehbar sind. Abb. 3.1-1 und Abb. 3.1-2 zeigen exemplarisch die Grundrisse verschiedener Wohnungsgrößen. Die beiden Blöcke Rotlintstraße 122-124 und 126-128 erhalten in jedem Treppenhaus einen Personenaufzug. Fahrradabstellplätze werden entweder im Keller (116-120) oder überdacht außen bereit gestellt.

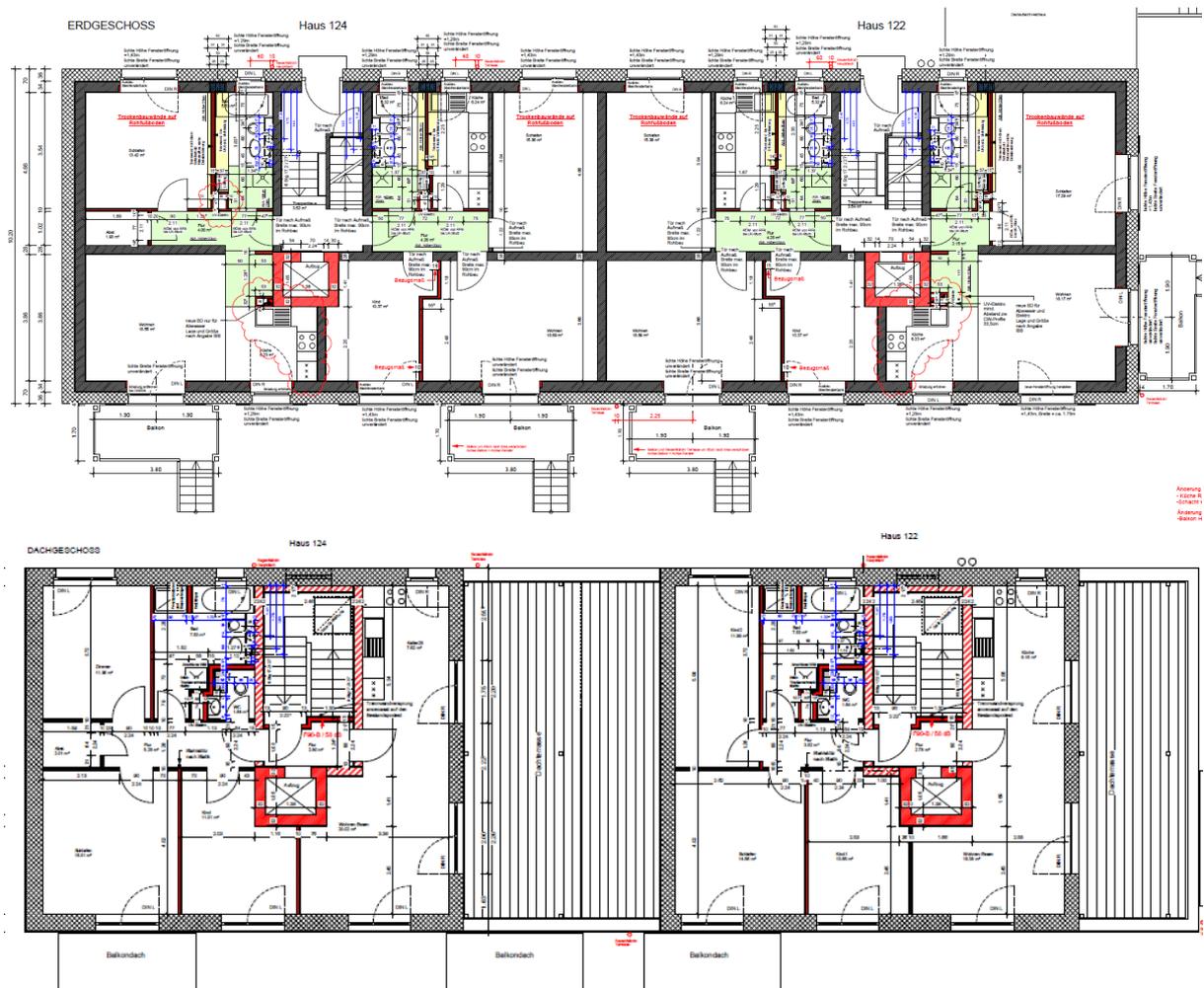


Abb. 3.1-2: Grundriss Rotlintstraße 122-124 Erdgeschoss und Dachgeschoss

Im Vorfeld der Sanierung wurden vom Büro ITA Messungen zum Schallschutz der Wohnungen und der Treppenhäuser durchgeführt. Als Resultat dieser Messungen wurde ab dem Haus 118 der vorhandene alte Estrich entfernt und ein neuer mit 2 cm Trittschalldämmung eingebracht. Die Treppenstufen wurden durch einen Zusatzbelag in ihrem Schallschutz verbessert.

Für die Außenanlagen wurde ein Grünraumkonzept (siehe Abb. 3.1-3) erstellt, das den vorhandenen Baumbestand erhalten bzw. sinnvoll ergänzen soll.



Abb. 3.1-3: Grünraumkonzept der Gesamtanlage mit Mietergärten und Stellplätzen (Quelle: freiraum)

Für die Sanierungsarbeiten wurden die Gebäude leer gezogen, wobei den Mieter von der Wohnungsbaugesellschaft gleichwertiger Wohnraum angeboten wurde, einige Mieter werden anschließend wieder in der Anlage wohnen. Die Arbeiten werden in drei Bauabschnitte unterteilt, die jeweils den Blöcken Rotlintstraße 116-120, 122-124 sowie 126-128 entsprechen. Der erste Bauabschnitt wurde im Herbst 2008 begonnen und im Herbst 2009 bezogen, die beiden anderen schließen sich daran an.

3.2 Energetisches Konzept

3.2.1 Gebäudehülle

Das energetische Konzept sieht vor, dass die Gebäude nach der Sanierung im Mittel über die gesamte Wohnfläche den Passivhausstandard erreichen. Dazu ist eine möglichst lückenlose Dämmung der Gebäudehülle und aller Anschlussdetails erforderlich. Bei Bestandsgebäuden gilt dies umso mehr, da hier besonders im Kellerbereich Wärmebrücken an Kellerdeckenaufleger und Kellerinnenwänden nicht vollständig entschärft und die Ausrichtung des Gebäudes sowie die Fensterflächen nur noch begrenzt für eine passive Solarenergienutzung optimiert werden können. Somit muss die thermische Hüllfläche in besonders hoher Qualität ausgeführt werden, um das „Handicap“ des Bestandsgebäudes zumindest teilweise zu kompensieren.

Im Folgenden wird das Sanierungskonzept, beginnend mit dem Dachgeschoss, vorgestellt.

Dachgeschoss

Bei den Gebäuden werden die alten Dächer komplett abgetragen und an deren Stelle wird neuer Wohnraum im Dachgeschoss in Form einer Aufstockung mit attraktiven Dachterrassen geschaffen. Dazu werden der vorhandene Estrich und die Zusatzdämmung auf der obersten Geschossdecke entfernt und eine Bitumenschweißbahn zur Abdichtung aufgebracht. Danach wird ein Staffelgeschoss mit einer vorgefertigten Holzkonstruktion errichtet, das vor Ort mit Zelluloseflocken ausgeblasen wird. Im Bereich der Außenwände im Dachgeschoss gibt es zwei unterschiedliche Konstruktionen. Die Wände, die an die neu entstehenden Dachterrassen grenzen, bestehen aus einer Holzständerwand mit 14 cm Dämmung aus Zelluloseflocken und einem zusätzlichen Wärmedämmverbundsystem in 20 cm Stärke aus Polystyrol. Die Wände im Dachgeschoss, die über der Bestandsfassade errichtet werden, bestehen aus einer Holzkonstruktion mit FJI-Holz-Trägern mit 40 cm Stärke, die vor Ort mit Zelluloseflocken ausgeblasen wird und einer äußeren zementgebundenen Holzspanplatte als Putzträger.

Die Dächer besitzen ebenfalls eine Holzkonstruktion mit FJI-Trägern mit einer Stärke von 40 cm, die mit Zelluloseflocken vor Ort gefüllt wird. Den oberen Abschluss des Daches bildet ein Gründach auf einer Holzfaserplatte, unter dem eine 8 cm hohe Hinterlüftung angeordnet ist. Im Bereich der Dachterrassen wird eine Holzkonstruktion aus OSB-Platte, Holzbalken (24 x 12) im Raster 62,5 cm und Distanzhölzern mit 6 - 8 cm Höhe (für die Gefälledämmung) auf einer 3 cm starken Mineralfaserdämmung aufgelegt. Der Hohlraum wird ebenfalls mit Zelluloseflocken vor Ort ausgeblasen. Abb. 3.2-1 zeigt die verschiedenen Konstruktionen im Dachbereich.

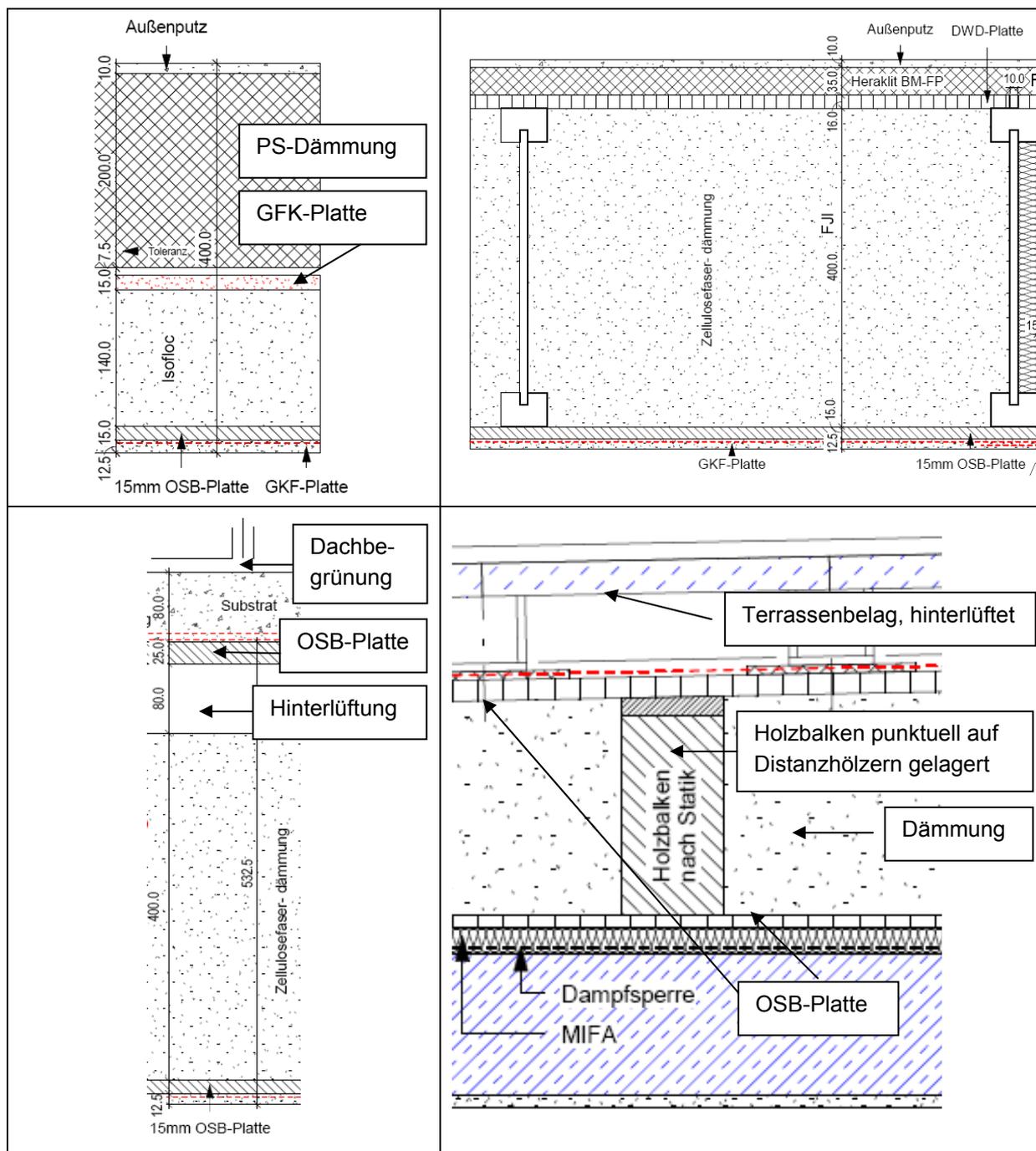


Abb. 3.2-1: Aufbau der Konstruktionen im Dachgeschoss (oben links: Wand mit WDVS, oben rechts: Wand mit FJI-Träger und Holzspan-Platte, unten links: Dach, unten rechts: Dachterrasse)

Außenwand

Bei der Außenwanddämmung wurden zwei unterschiedliche Konzepte verwirklicht. Die Außenwände im ersten Bauabschnitt erhalten ein Fassadensystem mit vorgefertigten Tragelementen aus Holzwerkstoffen und eine Zellulosedämmung als Füllung der Dämmschicht. Abb. 3.2-2 zeigt den Aufbau der Fassade bei den Gebäuden Rotlintstraße 116-120. Die aussteifenden Elemente bestehen aus senkrecht zur Wand montierten OSB-Platten, die über Konstruktionsvollholzrahmen an drei Seiten miteinander verbunden sind und mit Winkeln 5 cm vor die Bestandswand montiert werden. Die Details zur Fassade werden in Kapitel 4.1 ausgeführt.

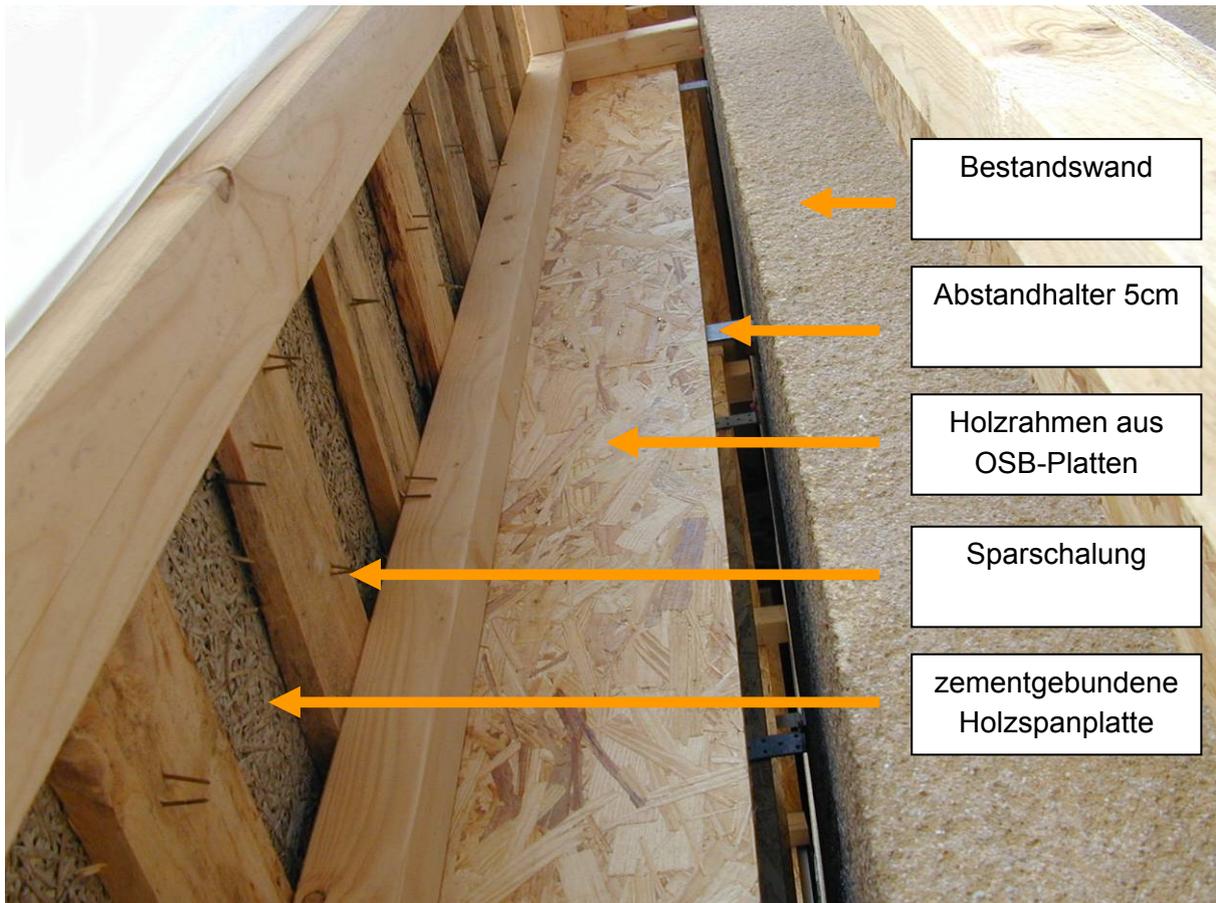


Abb. 3.2-2: Blick in den Innenaufbau der Fassadenkonstruktion des ersten Bauabschnitts

Die Außenwände des zweiten und dritten Blocks erhalten eine Fassade aus einer Holzkonstruktion, die aus vorgefertigten Konsolen und außen liegenden Kanthölzern besteht, die mit einem Raster von ca. 68 cm an Metallschienen an der Bestandswand befestigt werden und die Unterkonstruktion für die zementgebundenen Holzspanplatten bildet (Abb. 3.2-3). Aufgrund des geringeren Holzanteiles konnte bei dieser Konstruktion die Dämmdicke um 2 cm reduziert werden (Details zu dieser Fassade sind in Kapitel 4.1.3 ausgeführt). Tabelle 3.2-1 vergleicht den Aufbau der Konstruktion dieser Fassade mit dem ersten Bauabschnitt.

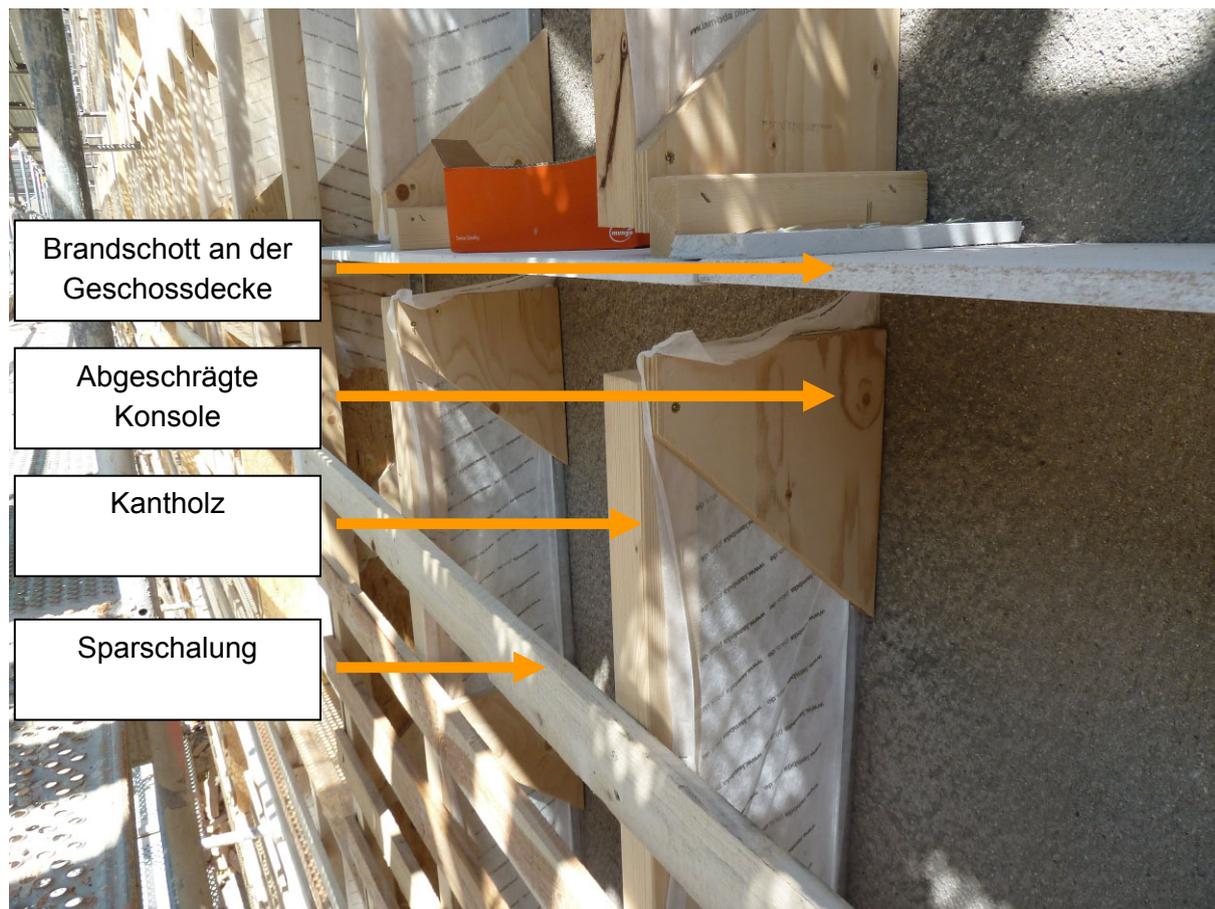


Abb. 3.2-3: Ansicht der Fassadenkonstruktion des zweiten/dritten Bauabschnitts vor Montage der Putzträgerplatten

Tabelle 3.2-1: Aufbau der Fassadendämmung an den verschiedenen Gebäuden

Schicht	Ausführung Rotlintstraße 116-120	Ausführung Rotlintstraße 122-128
Dicke der Zellulosedämmung und Tragkonstruktion	29 cm Dämmung Holzrahmen aus OSB-Platten mit Winkeln 5 cm vor der Fassade befestigt	27 cm Dämmung Tragkonsolen über Metallschiene direkt auf die Bestandswand montiert
Zwischenschicht zur Befestigung des Putzträgers	2,5 cm Sparschalung aus sägerauhen Nadelholzbrettern (Zwischenräume mit Zellulose gefüllt)	2,5 cm Sparschalung aus sägerauhen Nadelholzbrettern (Zwischenräume mit Zellulose gefüllt)
Putzträger	3,5 cm zementgebundene Holzspanplatte	3,5 cm zementgebundene Holzspanplatte
Außenputz	1 cm	1 cm

Fenster und Türen

Als Fenster kommen im ersten Bauabschnitt Passivhaus-geeignete Fenster vom Typ Kochs eco1 zum Einsatz, im zweiten/dritten Bauabschnitt Fenster vom Typ Kochs eco2. Sie werden vor das Bestandsmauerwerk montiert. Der alte Außenanschlag wird nicht entfernt, sondern in Trockenbau geschlossen. Beim Hauseingang werden zertifizierte, Passivhaus-geeignete

Haustüren vom Typ Variotec Thermosafe 100 mit Fensterausschnitt eingesetzt. Die Kellerabgangstüren sind gedämmte Stahltüren.

Keller

Die Kellerdecke wird um 26 cm abgehängt und der entstandene Hohlraum mit Zellulosefasern ausgeblasen. Die horizontale Verteilung für Heizung und Warmwasser wird in der Kellerdeckendämmung verlegt. Die Unterseiten der Treppen, die zwischen Treppenhaus und Keller liegen, werden mit 8 cm Polyurethan-Platten (PU) gedämmt, die seitlichen Wände am Kellerabgang mit 4,5 cm PU-Dämmplatten. Die Perimeterdämmung wird unterhalb der Außenfassade mit 30 cm Stärke bis in das Erdreich gezogen, daran schließen sich 10 cm dicke Perimeterdämmplatten bis zum Fundament an.

Gebäudehülle - sonstige Maßnahmen

Die alten durchbetonierten Balkone werden komplett abgeschnitten und durch vorgestellte, thermisch getrennte Balkone ersetzt, die zusätzlich mehr Nutzfläche bieten.

Tabelle 3.2-2 zeigt die Zusammenstellung der Bauteilaufbauten und die U-Werte

Tabelle 3.2-2: Übersicht über die Wandaufbauten nach Sanierung und die resultierenden U-Werte

Bauteil	Aufbau	U-Wert [W/(m ² K)]
Kellerwand unterirdisch	<ul style="list-style-type: none"> • 36,5 cm Stampfbeton ($\lambda=1,65$ W/(mK)) • 10 cm Perimeterdämmung ($\lambda=0,038$ W/(mK)) 	0,298
Kellerwand oberirdisch	<ul style="list-style-type: none"> • 36,5 cm Stampfbeton + Ziegelvormauerung ($\lambda=1,65$ W/(mK)) • 30 cm Perimeterdämmung ($\lambda=0,035$ W/(mK)) 	0,107
Kellerdecke	<ul style="list-style-type: none"> • 1,3 cm Parkettboden ($\lambda=0,130$ W/(mK)) • 0,3 cm Trittschalldämmung ($\lambda=0,040$ W/(mK)) • 4 cm Estrich ($\lambda=1,40$ W/(mK)) • 2 cm Trittschalldämmung ($\lambda=0,040$ W/(mK)) • 16-17 cm Betondecke ($\lambda=1,65$ W/(mK)) • 26 cm Zellulosedämmung ($\lambda=0,040$ W/(mK)) • 2 x 1,5 cm Gispfaser-Platten ($\lambda=0,320$ W/(mK)) 	0,133
Kellertür		1,06
Treppe gegen Keller	<ul style="list-style-type: none"> • 16 cm Beton • 8 cm Polyurethandämmung ($\lambda=0,025$ W/(mK)) mit 5 mm Kaschierung aus Holzwerkstoffplatten 	0,272
Wand gegen Keller (im Treppenhaus)	<ul style="list-style-type: none"> • 1 cm Natursteinfliesen ($\lambda=3,5$ W/(mK)) • 1 cm Innenputz ($\lambda=0,8$ W/(mK)) • 24 cm Trümmer-Hohlblock ($\lambda=0,61$ W/(mK)) • 4,5 cm PU-Dämmung ($\lambda=0,025$ W/(mK)) mit Kaschierung 	0,399

Wand gegen Keller (zw. Kellerabgang und -aufgang zum EG)	<ul style="list-style-type: none"> • 1 cm Natursteinfliesen ($\lambda=3,5$ W/(mK)) • 1 cm Kalkzementmörtel ($\lambda=0,8$ W/(mK)) • 10 cm Bimssteinplatten ($\lambda=0,68$ W/(mK)) • 4,5 cm Wärmedämmung ($\lambda=0,025$ W/(mK)) auf der Kellertreppenseite • 5 mm Holzwerkstoffplatte 	0,443
Außenwand 1. Bauabschnitt (Stützkonstruktion mit vorgefertigten Kästen aus OSB-Platten und Konstruktionsvollholz)	<ul style="list-style-type: none"> • 34 cm Bestandswand ($\lambda=0,61$ W/(mK)) • 29 cm Zellulosedämmung ($\lambda=0,040$ W/(mK)) und Holzkonstruktion • 2,5 cm Sparschalung (λ im Mittel 0,076 W/(mK)) • 3,5 cm zementgebundene Holzspan-Platte ($\lambda=0,090$ W/(mK)) • 1 cm Außenputz ($\lambda=0,70$ W/(mK)) 	0,131
Außenwand 2. Bauabschnitt (Stützkonstruktion mit Schichtholzkonsolen an Metallschienen)	<ul style="list-style-type: none"> • 34 cm Bestandswand ($\lambda=0,61$ W/(mK)) • 27 cm Zellulosedämmung ($\lambda=0,040$ W/(mK)) und Holzkonstruktion • 2,5 cm Sparschalung (λ im Mittel 0,076 W/(mK)) • 3,5 cm zementgebundene Holzspan-Platte ($\lambda=0,090$ W/(mK)) • 1 cm Außenputz ($\lambda=0,70$ W/(mK)) 	0,130
Fenster 1. Bauabschnitt	3-Scheiben-Wärmeschutzverglasung ($U_g=0,50$ W/(m ² K), g-Wert 0,51) in Passivhausfensterrahmen vom Typ Kochs eco1 ($U_f=0,91$ W/(m ² K)) mit thermisch getrenntem Randverbund	0,74 (im Mittel)
Fenster 2. Bauabschnitt	3-Scheiben-Wärmeschutzverglasung ($U_g=0,60$ W/(m ² K), g-Wert 0,51) in Passivhausfensterrahmen vom Typ Kochs eco2 ($U_f=0,74$ W/(m ² K)) mit thermisch getrenntem Randverbund	0,74 (im Mittel)
Haustür	Passivhaus-Haustür Variotec Thermosafe 100 mit Fensterausschnitt	0,78
Dachterrasse	<ul style="list-style-type: none"> • 3 cm Mineralfaser ($\lambda=0,040$ W/(mK)) auf Geschossdecke • 1,5 cm OSB-Platte ($\lambda=0,130$ W/(mK)) • 24 cm Zellulosedämmung ($\lambda=0,04$ W/(mK)) mit Holzbalken 12 cm im Raster 62,5 • 4 cm (im Mittel) Zellulosedämmung ($\lambda=0,04$ W/(mK)) mit punktuellen Distanzhölzern 12 cm • 2,5 cm OSB-Platte mit Gefälle + Abdichtung 	0,149
Außenwand Dachgeschoss WDVS (an Dachterrassen)	<ul style="list-style-type: none"> • 1,25 cm Gipskarton-Platte ($\lambda=0,25$ W/(mK)) • 1,5 cm OSB-Platte ($\lambda=0,13$ W/(mK)) • 14 cm Zellulosedämmung mit 6 cm Rahmenhölzern im Raster 62,5 cm • 1,5 cm Gipsfaser-Platte ($\lambda=0,32$ W/(mK)) • 20 cm Polystyrol-Dämmung ($\lambda=0,035$ W/(mK)) • 1 cm Außenputz (λ 0,7 W/(mK)) 	0,109

Außenwand Dachgeschoss	<ul style="list-style-type: none"> • 1,25 cm Gipskarton-Platte ($\lambda=0,25$ W/(mK)) • 1,5 cm OSB-Platte ($\lambda=0,13$ W/(mK)) • 40 cm Zellulosedämmung mit FJI-Träger im Raster 62,5 cm • 1,6 cm DWD-Platte ($\lambda=0,09$ W/(mK)) • 3,5 cm zementgebundene Holzspan-Platte ($\lambda=0,090$ W/(mK)) • 1 cm Außenputz ($\lambda=0,7$ W/(mK)) 	0,098
Dach	<ul style="list-style-type: none"> • 1,25 cm Gipskarton-Platte ($\lambda=0,25$ W/(mK)) • 1,5 cm OSB-Platte ($\lambda=0,13$ W/(mK)) • 40 cm Zellulosedämmung ($\lambda=0,04$ W/(mK)) bzw. FJI-Träger im Raster 62,5 cm • 8 cm Hinterlüftung • 2,5 cm OSB-Platte mit Abdichtung und Gründachsubstrat 	0,105

3.2.2 Anlagentechnik

Jede Wohnung erhält eine individuell einstellbare mechanische Lüftungsanlage mit Zu- und Abluft und Wärmerückgewinnung. Das Lüftungsgerät wird im Badezimmer montiert, die Verteilung der Luft erfolgt in der abgehängten Decke im Flur. Frischluftansaugung und Fortluftausblasung erfolgen über kurze Leitungen zur Außenwand. Neben dem Heizregister für Zuluftnacherwärmung besitzt jede Wohnung einen Heizkörper im Badezimmer, in den großen Dachgeschosswohnungen sind ggf. weitere Heizkörper vorhanden.

Die Treppenhäuser werden mechanisch mit einer Zu-Abluftanlage mit Wärmerückgewinnung belüftet, wobei die Zuluft im Bereich des ersten Treppenpodestes eingblasen und im Dachgeschoss abgesaugt wird. Das Lüftungsgerät ist teilweise in die Außenwand eingelassen.

Im Keller befindet sich eine Abluftanlage, um die Belüftung der Kellerräume zu gewährleisten. Ein Regler, der die absolute Feuchtedifferenz Innen-Außen berechnet, steuert die Betriebszeiten der Kellerlüftung, um sommerliche Auffeuchtung zu vermeiden.

Die Wärmeversorgung aller drei Blöcke erfolgt über eine neu errichtete Heizzentrale, in der ein Rapsöl-betriebenes Blockheizkraftwerk und ein Erdgas-Brennwertkessel als Spitzenlast-erzeuger einen Pufferspeicher speisen. Von dort wird die Wärme, überwiegend in der Kellerdeckendämmung, in die blockweise angeordneten Technikzentralen verteilt. Auf jedem Block befindet sich zusätzlich eine 32 m² große thermische Solaranlage, die über die Hälfte des Wärmebedarfs für die Warmwasserbereitung decken soll und die Solarspeicher im Keller erwärmt. Ein Rohr-in-Rohr-System bei der vertikalen Warmwasserverteilung reduziert die Bereitschaftsverluste der Warmwasserzirkulation.

Um die Warmwasserversorgung auf niedriger Temperatur (ca. 48 °C) betreiben zu können, wird das Trinkwasser chemisch desinfiziert. Jede Wohnung erhält außerdem einen Trockenschrank im Badezimmer, Standby-Abschalter für das Wohnzimmer sowie eine Erstinstantion an Energiesparlampen, um den Verbrauch an elektrischer Energie möglichst zu reduzieren. Für den Hilfs- und Allgmeinestrom wird zertifizierter Strom aus regenerativen Energiequellen eingesetzt und auch die Mieter sollen möglichst einen solchen „grünen“ Strom beziehen.

3.3 Nicht energetisch bedingte Sanierungsmaßnahmen

Zur Verbesserung des Schallschutzes wurde der alte Estrich entgegen der ursprünglichen Planungen in den Wohnungen entfernt und durch einen neuen mit Trittschallschutz nach heutigem Standard eingebracht. Weiterhin werden die Treppenstufen mit einem schallschluckenden Belag versehen.

Um einen Grundbruch im Kellerboden zu verhindern, wurden an kritischen Stellen im Keller Betonplatten im Bereich der Kellerwände aufbetoniert bzw. weitere Stützungsmaßnahmen durchgeführt. Weiterhin wird der ursprünglich vorhandene Durchgang zwischen dem zweiten und dritten Block (ab dem 1. OG) ersatzlos abgebrochen.

In den Wohnungen wird die Trennwand zwischen Küche und Bad entfernt und durch eine Leichtbauwand ersetzt, um die veränderten neuen Bäder montieren zu können. Die Bäder besitzen eine Duschwanne und ein Badelement mit Wasserinstallationen, Waschbecken und Spiegel, das im ersten Bauabschnitt teilweise vormontiert auf die Baustelle geliefert wurde (Abb. 3.3-1). Die Elektro-, Kaltwasser-, Warmwasser- sowie Abwasserinstallation wird im ganzen Haus komplett erneuert.



Abb. 3.3-1: Blick in das Badezimmer: links Ausführung im ersten Bauabschnitt mit Corian-Platten, rechts Ausführung zweiter / dritter Bauabschnitt mit Fliesen

Die Dachgeschosswohnungen erhalten großzügige Terrassen und Jalousien an den Fenstern zur Verschattung. An den meisten Fenstern der unteren Stockwerke sorgen speziell entwickelte Schiebeläden für die sommerliche Verschattung und die Verdunklung der Räume, im Erdgeschoss sind teilweise Vorbaurollläden vorhanden (Abb. 3.3-2). Alle Verdunklungseinrichtungen werden elektrisch von der Wohnung aus bedient.



Abb. 3.3-2: Ansicht der elektrisch betriebenen Schiebeläden für Verdunklung und Verschattung der Süd-, West- und Ostfenster im Bestandsgeschoss

Im zweiten und dritten Bauabschnitt wird an Stelle des alten Lastenaufzugs ein neuer Personenaufzug in jedem Treppenhaus eingebaut. Im ersten Bauabschnitt erhalten die Keller Fahrradräume, im zweiten und dritten Bauabschnitt werden Fahrradabstellplätze außen geschaffen, so dass der äußere Kellerabgang entfallen kann. Weiterhin werden Eingangsbereich und Außenanlagen der Gebäude neu gestaltet (siehe Abb. 3.1-3).

4 Planungsdokumentation Sanierung zum Passivhaus

Das folgende Kapitel dokumentiert die umgesetzten Maßnahmen im Detail sowie durchgeführte Analysen zur energetischen Optimierung der Gebäude.

4.1 Fassadenkonstruktion

Die Gebäude der Rotlintstraße sollten eine neu entwickelte, ganz oder in Teilen vorgefertigte Außenwanddämmung erhalten, die überwiegend aus nachwachsenden Materialien besteht. Die Unterkonstruktion besteht dabei aus Holz, die Dämmung übernimmt eine Ausflockung mit Zellulosefasern und den äußeren Abschluss bildet eine Putzfassade. Die unterschiedlichen Anforderungen, die die Neuentwicklung erfüllen muss, entstammen folgenden Bereichen:

- Energieeffizienz (Passivhaus-geeignete Konstruktion)
- Statik (Befestigung an der Bestandswand)
- Brandschutz (Einsatz von brennbaren Materialien in der Außenwanddämmung)
- Kosten (die neue Fassade soll zu darstellbaren Mehrkosten gegenüber einem Wärmedämmverbundsystem herstellbar sein)

Die Entwicklung der Fassade¹ lag beim Ingenieurbüro bauart sowie Büro faktor10. Es wurden verschiedene Varianten entwickelt, die vom IWU energetisch bewertet wurden. Letztendlich wurden zwei verschiedene Fassadenkonstruktionen umgesetzt: im ersten Bauabschnitt besteht die Fassade aus vor die Wand montierten Kästen aus OSB-Platten, im zweiten und dritten Bauabschnitt aus Konsolen, die an Metallprofilen an die Bestandsfassade geschraubt werden. Nachfolgend werden die umgesetzten Varianten beschrieben.

4.1.1 Konstruktion im 1. Bauabschnitt

Die Fassadenkonstruktion besteht im ersten Bauabschnitt (Gebäude 116-120) aus dreiseitig geschlossenen, Geschoss hohen, vorgefertigten Kästen aus OSB-Platten mit aussteifenden Massiv-Kanthölzern. Diese werden mit Metallwinkeln vor der Bestandswand montiert, wobei die Kanthölzer und die Metallwinkel einen Abstand der Kästen von 5 cm vom Bestandsmauerwerk sicherstellen. Horizontal werden diese Kästen auf Vollholzträger der Dimension 120 x 120 mm aufgestellt, die an die Bestandswand montiert werden. Auf die Kästen wird außen eine Vollholz-Sparschalung mit 25 mm Dicke und 250 mm Rastermaß bei 100 mm Bretthöhe montiert. Die Sparschalung soll die Wärmebrücke der OSB-Platten entschärfen. Anschließend werden 35 mm dicke zementgebundene Holzspan-Platten als Putzträger aufgebracht. Dadurch ergeben sich Gefache zwischen Bestandswand und Holzspan-Platte, die mit Zellulosefasern ausgeblasen werden.

Die folgenden Abbildungen zeigen Details der Fassadenkonstruktion aus der Bauphase (Musterfassade).

¹ der Begriff „Fassade“ wird im Folgenden auch als Synonym für die Außenwanddämmung verwendet



Abb. 4.1-1: Ansicht der Fassadenunterkonstruktion an der Gebäudeecke mit Fenster, links Bekleidung der Unterkonstruktion durch Holzspan-Platten



Abb. 4.1-2: Detail der Befestigung der OSB-Platten mit 5 cm Abstand vor der Bestandsfassade durch Metallwinkel



Abb. 4.1-3: Befestigung des unteren horizontalen Trägers an der Geschosdecke (Blick von unten gegen Horizontalträger und Abschluss Gefach)



Abb. 4.1-4: Blick von oben auf Horizontalträger und Abschluss Gefach

4.1.2 U-Wert der Fassade im 1. Bauabschnitt

Bei der Berechnung des Gesamt-U-Wertes der Fassade müssen einige Punkte beachtet werden. Die Fassade besitzt zwar ein regelmäßiges Grundrastermaß von 625 mm, bei den vertikalen Trägern, im Bereich der Fenster und den Gebäudekanten muss davon aber abgewichen werden.

Um die Fenster herum finden sich immer vertikale und horizontale Träger. Unter den Fenstern werden ggf. zusätzliche vertikale Träger zur Abtragung der Lasten aus dem Fensterbereich angeordnet. Die Träger um das Fenster herum müssen bei der Wärmebrückenberechnung am Fensteranschluss berücksichtigt werden, die Versteifungen unter dem Fenster bei der Fassade. Dies hat zur Folge, dass bei der Berechnung des Gesamt-U-Wertes der Fassade nur ein Teil der in ihr vorhandenen Träger berücksichtigt wird, die übrigen müssen in der Wärmebrückenberechnung einfließen. Ähnlich wurde bei

den Gebäudekanten mit den äußeren Trägern verfahren, die in der separaten Wärmebrückenberechnung für dieses Detail berücksichtigt wurden.

In der Konsequenz bedeutet dies, dass der angegebene U-Wert der Gesamtfassade nicht alleine verwendet werden darf, sondern nur in Verbindung mit den zugehörigen Wärmebrückendetails. In der Summe ergibt sich dann der korrekte Wärmeverlust über Außenwände inklusive der Wärmebrücken.

Bei den Berechnungen wurden die Metallwinkel auf der Mauerwerksseite der vorgefertigten Kästen sowie die Befestigungen der horizontalen Träger vernachlässigt, da beide nur punktförmig auftreten, auf der warmen Seite der Fassade liegen und mit mindestens 25 cm überdämmt werden.

Die Berechnung des U-Wertes der Fassade wurde in mehreren Schritten vorgenommen. Zuerst wurde ein typischer Ausschnitt der Konstruktion mit dem Rastermaß 625 mm und halber Geschosshöhe betrachtet (Abb. 4.1-5). Für diesen wurden 7 Ebenen definiert (Abb. 4.1-6), in denen, gemessen ab Außenkante der Bestandswand, neben der Dämmung auch unterschiedliche Anteile von Konstruktionsholz angeordnet sind. Dabei wurde unterschieden, ob der Wärmestrom im Holz senkrecht zur Faserrichtung (Wärmeleitfähigkeit 0,13 W/(m²K) oder in Faserrichtung verläuft, da der Wert der Wärmeleitfähigkeit dann mit 2,2 zu multiplizieren ist.

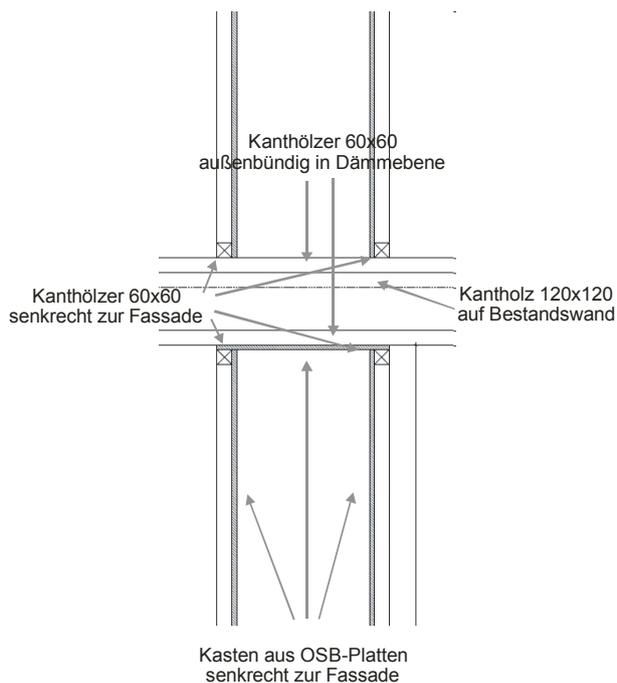


Abb. 4.1-5: Vertikalschnitt durch die Fassade im Bereich der Geschosdecke (Blick von außen auf die Fassade)

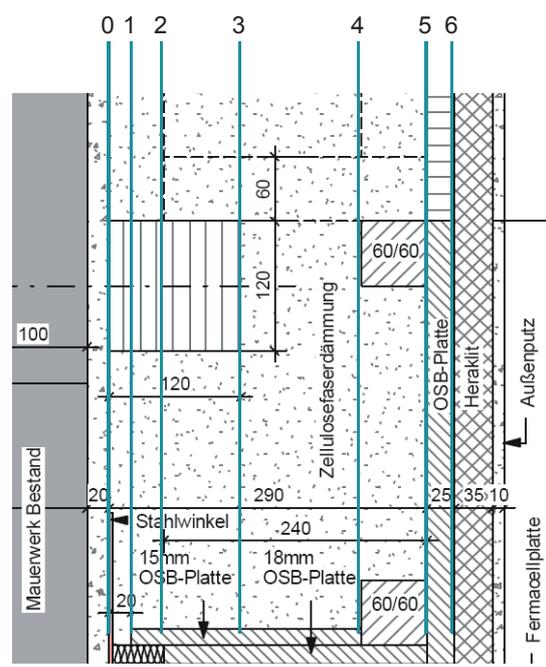


Abb. 4.1-6: Vertikalschnitt durch die Wand mit Lage der Schnittebenen in der Dämmfassade

Die in der Fassade angeordneten Hölzer (Tabelle 4.1-1) liegen in einer oder mehreren Schnittebenen der Fassade und besitzen unterschiedliche Höhen. Im nächsten Schritt werden alle in den einzelnen Schnittebenen vorhandenen Hölzer zusammengefasst (Tabelle 4.1-2) und anschließend der Holzanteil in der Ebene sowie die mittlere Wärmeleitfähigkeit bestimmt. Mit dem Verfahren der DIN EN ISO 6946:4_2008 wird dann der U-Wert für inhomogene Wandaufbauten berechnet. Hierfür wurde das U-Wert-Blatt des PHPP so

verändert, dass für jede Schicht ein separater Holzanteil angegeben werden kann. Für das Ergebnis, das in Abb. 4.1-7 zu sehen ist, wurde auch der maximale relative Fehler nach DIN EN ISO 6946 ausgegeben.

Tabelle 4.1-1: Definition der Elemente der Fassadenkonstruktion

Bauteil	Horizontaler Träger (12x12cm) an Bestandswand	OSB-Platte Kasten (1,8 cm) senkrecht zu Wand	Aussteifung Kasten mit 6x6 senkrecht zu Wand	Aussteifung Kasten mit 6x6 Außenseite Kasten (vert.+horz)	OSB-Platte (1,8 cm) horizontaler Abschluss oben	OSB-Platte (1,5 cm) unterer Abschluss	OSB-Platte (2,5 cm) vertikal in Sparschalung
von Schnitt	0	2	0	4	1	3	5
bis Schnitt	3	5	5	5	5	5	6
Wärmeleitfähigkeit [W/(mK)]	0,13	0,286	0,286	0,13	0,286	0,286	0,13
Höhe [m]	0,12	0,02	0,06	0,06	0,02	0,02	0,37
Kürzel	Bauteil A	Bauteil B	Bauteil C	Bauteil D	Bauteil E	Bauteil F	Bauteil G

Tabelle 4.1-2: Vorhandene Bauteile in den Schnitten

	Bauteil	Dicke der Schicht [cm]	ab Außenwand [cm]
ab Schnitt 0		0	0
bis Schnitt 1	A+C	2	2
bis Schnitt 2	A+C+E	3	5
bis Schnitt 3	A+B+C+E	7	12
bis Schnitt 4	B+C+E+F	11	23
bis Schnitt 5	B+C+D+E+F	6	29
bis Schnitt 6	G	2,5	31,5

1 Fassade Rotlintstraße, Ausschnitt mit Standard-Rastermaß 625 mm							
Bauteil Nr. Bauteil-Bezeichnung							
Wärmeübergangswiderstand [m ² K/W] innen R _{si} : 0,13							
außen R _{se} : 0,04							
Teilfläche 1	∑W/(m ² K)	Teilfläche 2 (optional)	∑W/(m ² K)	Anteil Fläche 2	Teilfläche 2 (optional)	∑W/(m ² K)	Anteil Fläche 3
1. Innenputz	0,800						20
2. Trümmer-Hohlblock	0,470						30,0
3. Außenputz	1,000						20
4. Einblasdämmung	0,040	Träger 12x12 horiz.	0,130	4,3%	Aussteifung 6x6 senkr.	0,286	0,4%
5. Einblasdämmung	0,040	Träger 12x12 horiz.	0,130	4,3%	Aussteifung+OSB senkr.	0,286	0,4%
6. Einblasdämmung	0,040	Träger 12x12 horiz.	0,130	4,3%	Aussteifung+OSB senkr.	0,286	3,2%
7. Einblasdämmung	0,040				Aussteifung+OSB senkr.	0,286	3,7%
8. Einblasdämmung	0,040	Träger 6x6 außen	0,130	12,0%	Aussteifung+OSB senkr.	0,286	3,7%
9. Einblasdämmung	0,040	Sparschalung	0,130	40,0%	OSB-Platte	0,130	13,3%
10. Heraklith EM 35	0,090						35
11. Außenputz	1,000						10
Summe							70,0 cm
Fehler der Berechnung 2,7%							
U-Wert: 0,134 W/(m ² K)							

Abb. 4.1-7: Berechnung des U-Wertes für einen Standardausschnitt der Fassade

Es ergibt sich ein U-Wert von 0,134 W/(m²K). Der maximale relative Fehler liegt bei 2,7 %. Um die Berechnungen nach DIN EN ISO 6946 zu überprüfen, wurde mit dem Programm HEAT 3D [Blocon] der identische Ausschnitt der Fassade dreidimensional modelliert und der U-Wert berechnet (Abb. 4.1-8). Das Detail zeigt einen 1,25 m breiten und 2,78 m hohen Ausschnitt im Bereich der Geschosdecke (und somit unter Berücksichtigung des horizontalen Trägers). Es ergibt sich ein U-Wert von 0,130 W/(m²K). Die Ergebnisse der beiden Berechnungen weichen somit um 3,7 % voneinander ab. Der tatsächliche Fehler liegt somit 1 % höher als der Faktor e nach DIN EN ISO 6946 vorhersagt, wenn unterstellt wird, dass die numerische Lösung das korrekte Ergebnis widerspiegelt.

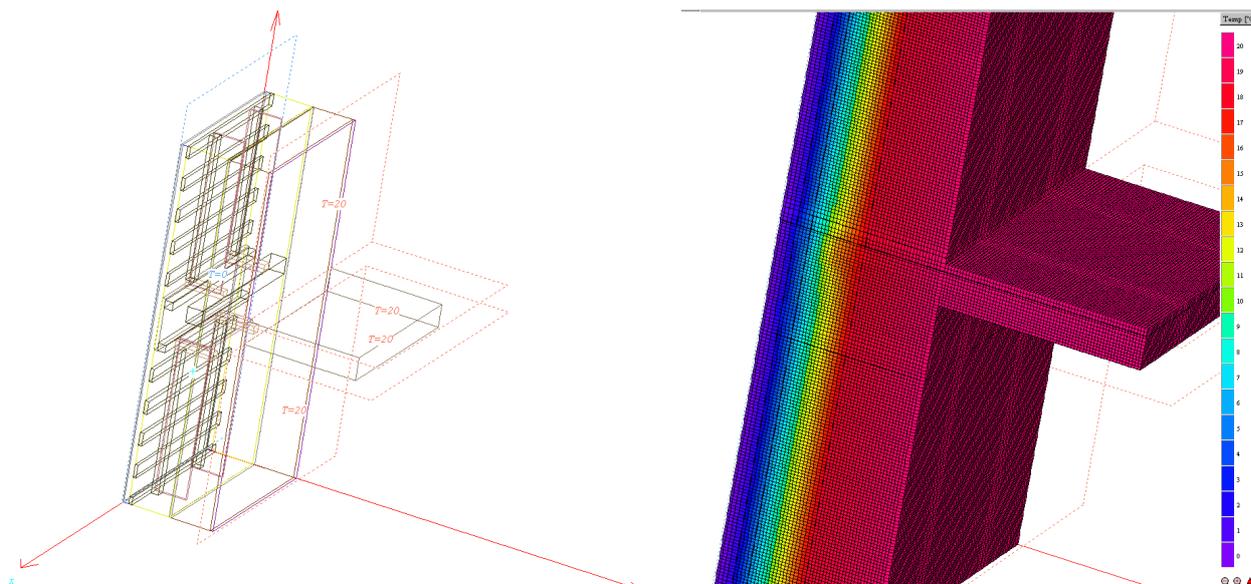


Abb. 4.1-8: Dreidimensionales Wärmebrückendetail der Fassade bei Rastermaß 625 mm, links Gittermodell mit Fassade im Bereich der Geschossdecke, rechts Isothermendarstellung

Der tatsächliche Aufbau der Fassadenkonstruktion ist von der Lage der Fenster, zusätzlichen Durchbrüchen (für Lüftungsleitungen) oder Aussparungen und den Gebäudeabmaßen abhängig, so dass sich für jede Fassade eine unterschiedliche Anzahl von Konstruktionshölzern in den verschiedenen Ebenen ergeben. Im Folgenden werden für die drei Außenfassaden des Gebäudes Rotlintstraße 116 die U-Wert nach DIN EN ISO 6946 berechnet.

Die Abbildungen Abb. 4.1-9, Abb. 4.1-11 und Abb. 4.1-13 zeigt die Ansichten der jeweiligen Fassadenseite, die Abb. 4.1-10, Abb. 4.1-12 und Abb. 4.1-14 die zugehörigen U-Wertberechnungen (ohne Berücksichtigung von Hölzern um die Fenster, die bei den Anschlussdetails der Fenster enthalten sind).

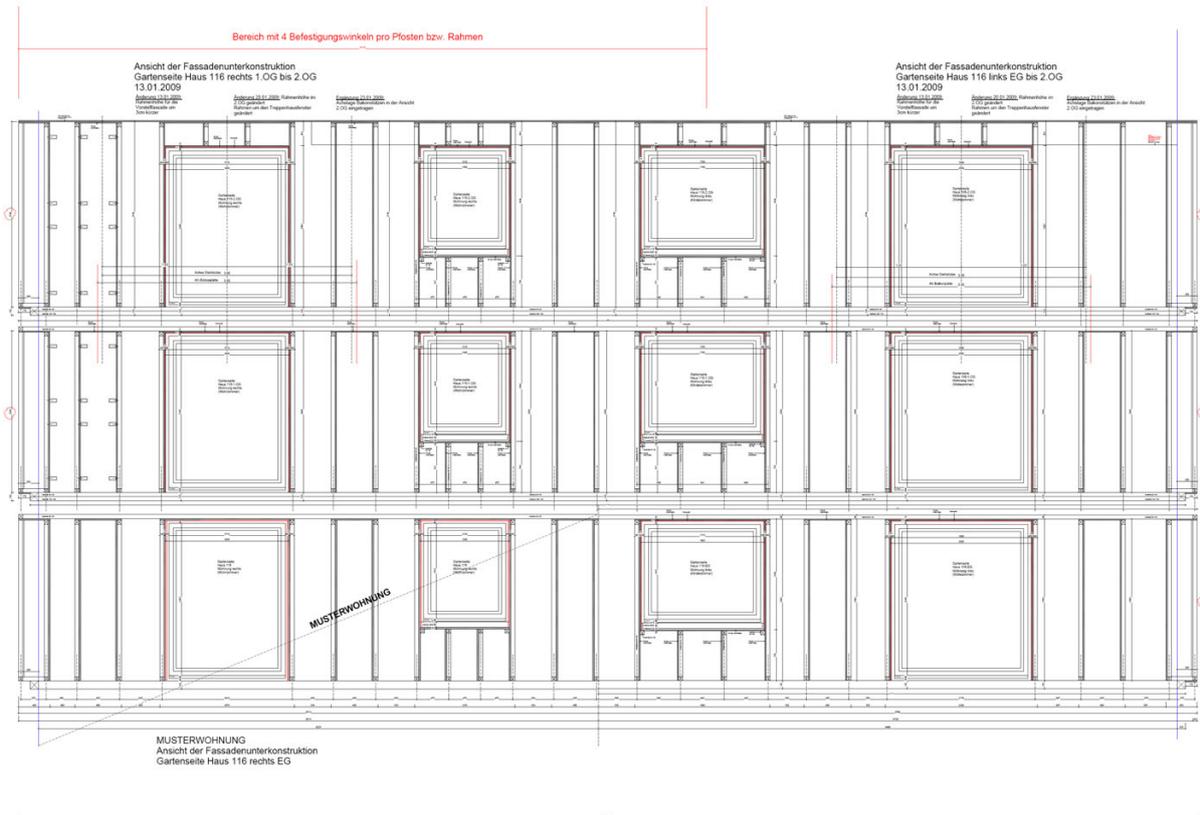


Abb. 4.1-9: Fassadenkonstruktion an der Südseite des Hauses 116

3 Fassade Rotlintstraße 116 Südseite									
Bauteil Nr. Bauteil-Bezeichnung									
Wärmeübergangswiderstand [m ² K/W] innen R _{si} : 0,13									
								außen R _{se} : 0,04	
Teilfläche 1	λ[W/(mK)]	Teilfläche 2 (optional)	λ[W/(mK)]	Anteil Fläche 2	Teilfläche 2 (optional)	λ[W/(mK)]	Anteil Fläche 3	Summe Breite	Dicke [mm]
1. Innenputz	0,800							20	
2. Trümmer-Hohlblock	0,470							300	
3. Außenputz	1,000							20	
4. Einblasdämmung	0,040	Träger 12x12 horiz.	0,130	4,4%	Aussteifung 6x6 senkr.	0,286	0,5%	20	
5. Einblasdämmung	0,040	Träger 12x12 horiz.	0,130	4,4%	Aussteifung+OSB senkr.	0,286	0,7%	30	
6. Einblasdämmung	0,040	Träger 12x12 horiz.	0,130	4,4%	Aussteifung+OSB senkr.	0,286	2,3%	70	
7. Einblasdämmung	0,040				Aussteifung+OSB senkr.	0,286	2,4%	110	
8. Einblasdämmung	0,040	Träger 6x6 außen	0,130	7,7%	Aussteifung+OSB senkr.	0,286	2,4%	60	
9. Einblasdämmung	0,040	Sparschalung	0,130	40,0%	OSB-Platte	0,130	8,9%	25	
10. Heraklith EM 35	0,090							35	
11. Außenputz	1,000							10	
Fehler der Berechnung								2,0%	
U-Wert:								0,129	W/(m ² K)
Summe								70,0	cm

Abb. 4.1-10: U-Wert-Berechnung für die Südseite des Hauses 116

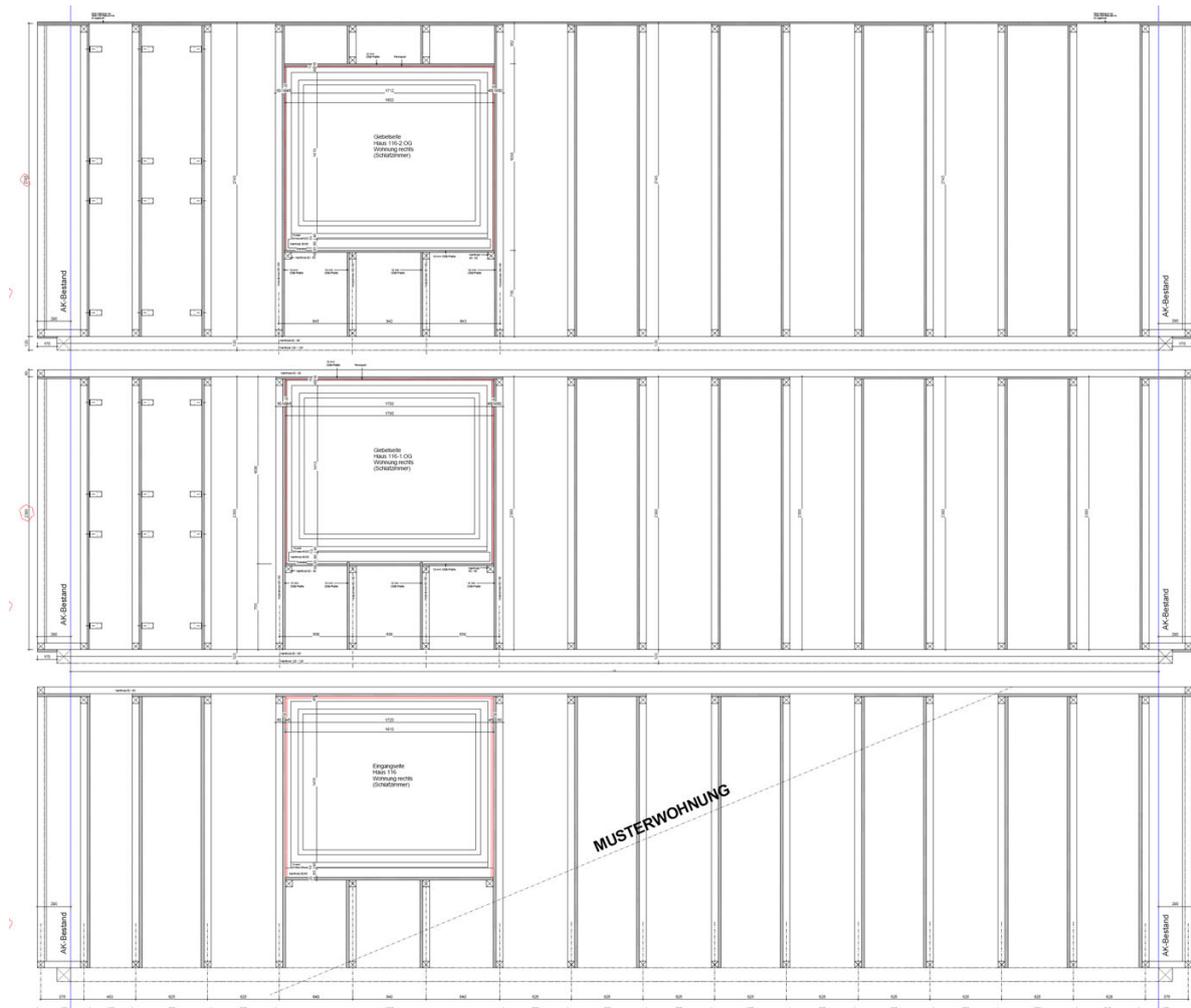


Abb. 4.1-11: Fassadenkonstruktion am Westgiebel des Hauses 116

2 Fassade Rotlintstraße 116 Westgiebel								Summe Breite	
Bauteil Nr. Bauteil-Bezeichnung								Dicke [mm]	
Wärmeübergangswiderstand [m ² K/W] innen R _{si} : 0,13									
außen R _{se} : 0,04									
Teilfläche 1	∑W[m ² K]	Teilfläche 2 (optional)	∑W[m ² K]	Anteil Fläche 2	Teilfläche 2 (optional)	∑W[m ² K]	Anteil Fläche 3		
1. Innenputz	0,800							20	
2. Trümmer-Hohlblock	0,470							300	
3. Außenputz	1,000							20	
4. Einblasdämmung	0,040	Träger 12x12 horiz.	0,130	4,4%	Aussteifung 6x6 senkr.	0,286	0,5%	20	
5. Einblasdämmung	0,040	Träger 12x12 horiz.	0,130	4,4%	Aussteifung+OSB senkr.	0,286	0,7%	30	
6. Einblasdämmung	0,040	Träger 12x12 horiz.	0,130	4,4%	Aussteifung+OSB senkr.	0,286	3,0%	70	
7. Einblasdämmung	0,040				Aussteifung+OSB senkr.	0,286	3,2%	110	
8. Einblasdämmung	0,040	Träger 6x6 außen	0,130	8,8%	Aussteifung+OSB senkr.	0,286	3,2%	60	
9. Einblasdämmung	0,040	Sparschalung	0,130	40,0%	OSB-Platte	0,130	8,9%	25	
10. Heraklith EM 35	0,090							35	
11. Außenputz	1,000							10	
Fehler der Berechnung 2,8%								Summe 70,0 cm	
U-Wert: 0,131 W/(m ² K)									

Abb. 4.1-12:U-Wert-Berechnung für den Westgiebel des Hauses 116

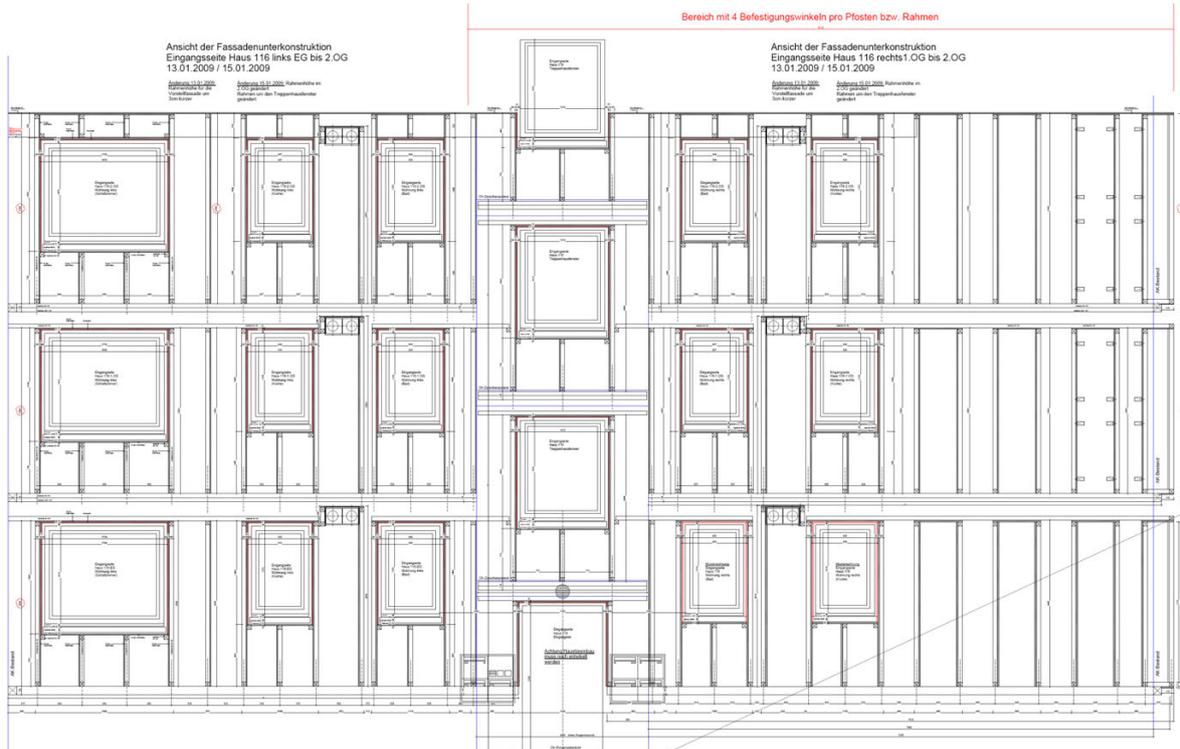


Abb. 4.1-13: Fassadenkonstruktion an der Nordseite des Hauses 116

4 Fassade Rotlintstraße 116 Nordseite								
Bauteil Nr. Bauteil-Bezeichnung		Wärmeübergangswiderstand [m ² K/W]		innen R _s : 0,13		außen R _s : 0,04		
Teilfläche 1	∫[W/(m ² K)]	Teilfläche 2 (optional)	∫[W/(m ² K)]	Anteil Fläche 2	Teilfläche 2 (optional)	∫[W/(m ² K)]	Anteil Fläche 3	
1. Innenputz	0,800							
2. Trümmer-Hohlblock	0,470							
3. Außenputz	1,000							
4. Einblasdämmung	0,040	Träger 12x12 horiz.	0,130	4,1%	Aussteifung 6x6 senkr.	0,286	0,6%	
5. Einblasdämmung	0,040	Träger 12x12 horiz.	0,130	4,1%	Aussteifung+OSB senkr.	0,286	0,8%	
6. Einblasdämmung	0,040	Träger 12x12 horiz.	0,130	4,1%	Aussteifung+OSB senkr.	0,286	2,7%	
7. Einblasdämmung	0,040				Aussteifung+OSB senkr.	0,286	2,9%	
8. Einblasdämmung	0,040	Träger 6x6 außen	0,130	7,9%	Aussteifung+OSB senkr.	0,286	2,9%	
9. Einblasdämmung	0,040	Sparschalung	0,130	40,0%	OSB-Platte	0,130	8,1%	
10. Heraklith BM 35	0,090							
11. Außenputz	1,000							
Fehler der Berechnung							2,6%	
U-Wert:							0,130	W/(m ² K)
Summe							70,0	cm

Abb. 4.1-14: U-Wert-Berechnung für die Nordseite des Hauses 116

Obwohl die einzelnen Fassaden sehr unterschiedliche Raster aufgrund der Fensteranzahl und -größe aufweisen, liegen die U-Werte der Fassaden sehr nahe zusammen (Tabelle 4.1-3). Der Mittelwert liegt bei 0,131 W/(m²K). Auf den ersten Blick erstaunlich scheint die Tatsache, dass die realen Fassaden scheinbar niedrigere U-Werte aufweisen als die Standardkonstruktion. Der Grund liegt aber darin, dass die Teile der Konstruktion der realen Fassaden, die direkt um die Fenster herum gruppiert sind, nicht in die Berechnung des Gesamt-U-Wert eingeflossen sind, sondern bei der Wärmebrückenberechnung für die Fenstereinbausituation berücksichtigt werden.

Tabelle 4.1-3: Übersicht der Fassaden-U-Werte für die Rotlintstraße 116

Berechnungsergebnis / Fassadeorientierung	U-Wert [W/(m ² K)]
Südfassade	0,129
Westgiebel	0,131
Nordfassade	0,130
Mittelwert der realen Fassaden	0,131

Der maximale relative Fehler e liegt bei allen Berechnungen in der gleichen Größenordnung wie bei der Standardkonstruktion, so dass von vergleichbaren Abweichungen zwischen DIN EN ISO 6946-Berechnungen und Wärmebrückenberechnung ausgegangen werden kann.

In der Energiebilanzberechnung für die Gesamtgebäude wird der Mittelwert aller Fassaden von 0,131 W/(m²K) verwendet. Da die DIN EN ISO 6946-Berechnungen zu höheren U-Werten führen als die zugehörige Wärmebrückenberechnung, wird das Berechnungsergebnis ohne weitere Aufschläge verwendet. Weiterhin wird auf eine Flächengewichtung verzichtet.

4.1.3 Konstruktion 2. und 3. Bauabschnitt

Die Montage der Fassade im ersten Bauabschnitt zeigte, dass die Konstruktion in Herstellung und Montage aufwändiger ist, als geplant. Aus diesem Grund wurde für die Fassade im 2. und 3. Bauabschnitt eine andere, preisgünstigere Lösung gesucht. Recherchen führten zum Produkt „Lambda plus“ der Firma Altbauplus (Nürtingen).

Dieses besteht aus Konsolen aus Baufurnierschichtholz (BFU) und einer abgewinkelten Metallschiene. Die Konsolen besitzen auf der Wandseite eine Nut, in die die Metallschiene eingeschoben und verschraubt wird (Abb. 4.1-15). Schienen und Konsolen werden vorgefertigt und an der Bestandswand befestigt (Abb. 4.1-16). Entlang der Konsolen befindet sich eine dünne (Unterspann-)Bahn als Abgrenzung der Gefache, die verhindern soll, dass beim Füllen mit Zelluloseflocken sich diese zwischen den Gefachen verteilen. Von außen werden Kanthölzer an die Konsolen angeschraubt, wie in Abb. 4.1-17 gezeigt. Der weitere Aufbau erfolgt wie bei der Fassade im ersten Bauabschnitt: auf den Kanthölzern werden eine Sparschalung und zementgebundene Holzspan-Platten befestigt. Letztere dienen als Abschluss der Fassade und als Putzträger.



Abb. 4.1-15: Detailansicht von Befestigungsschiene und Konsole

Für dieses Produkt lagen beim Einsatz in der Rotlintstraße jedoch kaum Erfahrungswerte aus Mehrfamilienhäusern vor, so dass auch hierfür eine intensive Planung für Statik, Brandschutz, Bauphysik und Montage erforderlich war.



Abb. 4.1-16: Ansicht Konsolen, Befestigungsschiene sowie Trennbahn

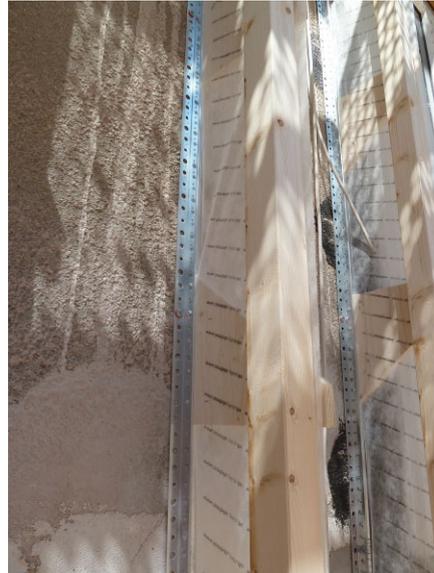


Abb. 4.1-17: Kantholz, außenbündig auf den Konsolen aufsitzend



Abb. 4.1-18: Sparschalung auf der Fassade vor Montage der Heraklith-Bekleidung



Abb. 4.1-19: Kasten um die Fenster herum

Ebenfalls fehlten detaillierte Berechnungen zum U-Wert einer Fassade mit dieser Konstruktion vor. Aus diesem Grund wurden vom IWU Parameteruntersuchungen durchgeführt, um den Einfluss verschiedener Ausführungen (Dämmdicke, Rastermaß, Konsolengröße und -form) zu untersuchen. Folgende Varianten wurden untersucht:

- Dämmdicken von 12 bis 34 cm (bei Standardraster und Kantholz 4 x 4)
- Rasterabstand Schienen von 52,5 bis 76 cm (bei Dämmdicke 29 cm)
- Rasterabstand Konsolen von 52,5 bis 76 cm (bei Dämmdicke 29 cm)
- Kantholz außen: 6 x 8; 4 x 4; 2,5 x 4, Aluschiene (bei Dämmdicke 29 cm)
- Konsole rechteckig, dreieckig (bei Standardraster, Kantholz 4 x 4 und Dämmdicken 25 und 29 cm)
- Brett horizontal auf Höhe der Geschosdecke (zur Aufnahme der Gewichtslast der Dämmung und als Brandschott) 20, 25 und 29 cm tief (bei Dämmdicke 29 cm, Standardraster und Kantholz 4 x 4)

Für die Berechnungen wurde ein ungestörter Fassadenausschnitt mit Höhe eines Geschosses (2,75 m; inkl. Geschosdecke 18 cm; Raumhöhe 2,60 m; Höhe Ausschnitt:

1,30 m plus Decke in beide Richtungen) sowie eine Breite von $2 \times 62,5 \text{ cm} = 125 \text{ cm}$ gewählt. Die Basisvarianten wurden parallel dreidimensional mit Heat3D und nach DIN EN ISO 6946 berechnet und anschließend wurden die Berechnungen nach DIN EN ISO 6946 mit den Ergebnissen der 3D-Berechnung abgeglichen. Alle weiteren Berechnungen, außer bei den dreieckigen Konsolen, erfolgten nach DIN EN ISO 6946.

Standardausführung:

- Rastermaß Schienen 62,5 cm,
- Rastermaß Konsolen 62,5 cm (2 cm Dicke),
- Konsolenhöhe gleich Dämmdicke,
- Kantholz außen 4 x 4 cm,
- horizontales Brett auf Höhe der Geschossdecke (2 cm Dicke ohne Kantholz darunter)

Verwendeter Wandaufbau:

- Innenputz (2 cm)
- Bestandswand (30 cm)
- Außenputz Bestand (2 cm)
- Zellulosedämmung/Lambda plus (29 cm)
- Sparschalung (2,5 cm)
- zementgebundene Holzspan-Platte (3,5 cm)
- Außenputz (1 cm)

Ergebnisse:

Einfluss der Dämmdicke

Abb. 4.1-20 zeigt den Einfluss der Dämmdicke auf den U-Wert der Fassade bei der Standardrandausführung. Zum Vergleich wurde der U-Wert der Fassade im ersten Bauabschnitt als Punkt eingezeichnet. Es zeigt sich, dass die Fassade mit Lambda plus mindestens 28 cm Stärke erreichen müsste, um bei diesen Annahmen den gleichen U-Wert der Fassade zu erreichen.

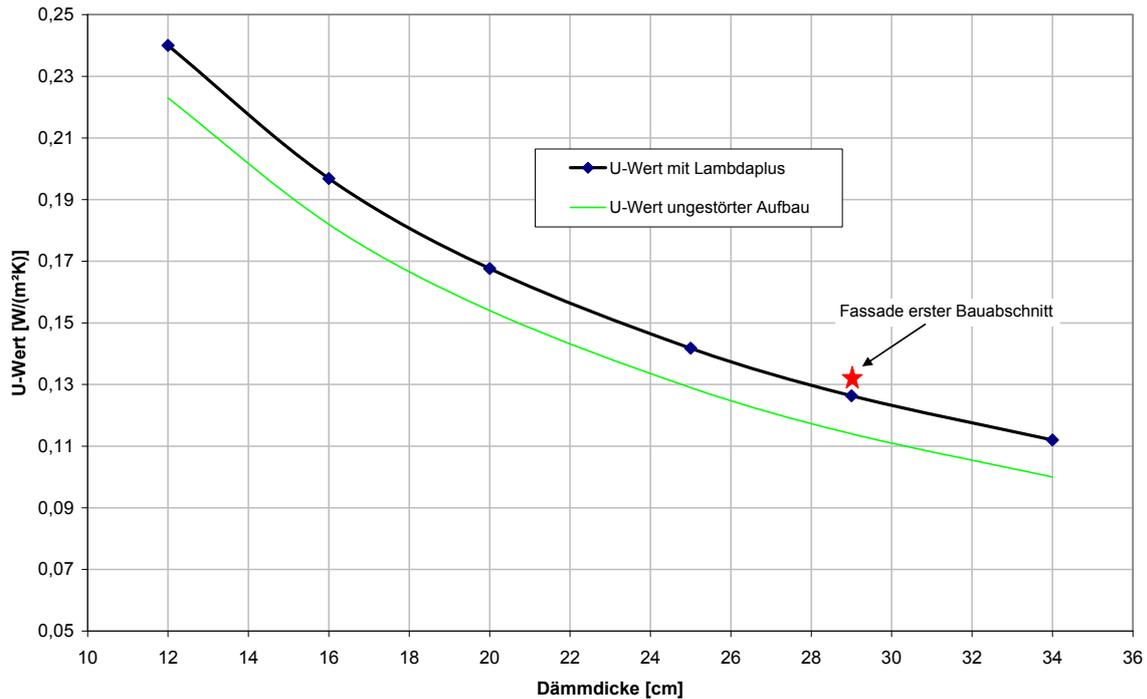


Abb. 4.1-20: Einfluss der Dämmdicke auf den U-Wert der Fassade bei Standardrandbedingungen

Wird das horizontale Brett (erforderlich für den Lastabtrag der Dämmung und als Brandschott) nicht mit punktförmigen Winkeln sondern mit einem durchlaufenden Kantholz befestigt, erhöhen sich die U-Werte um ca. 0,5 %. Die Breite des horizontalen Brettes hat ebenfalls einen Einfluss auf den U-Wert: ist es nur 20 cm Breit (anstatt 25 cm) verbessert sich der U-Wert um 0,25 %, wird es über die gesamte Breite der Dämmebene montiert (29 cm), erhöht sich der U-Wert um 0,2 %.

Veränderungen im Rastermaß der Befestigungsschienen bzw. der Konsolen

Die Abb. 4.1-21 zeigt leichte Veränderungen des U-Wertes durch ein verändertes Rastermaß der Befestigungsschienen für Lambda plus. Ein ähnliches Bild ergibt sich bei einer Variation des Rastermaßes der Konsolen (Abb. 4.1-22).

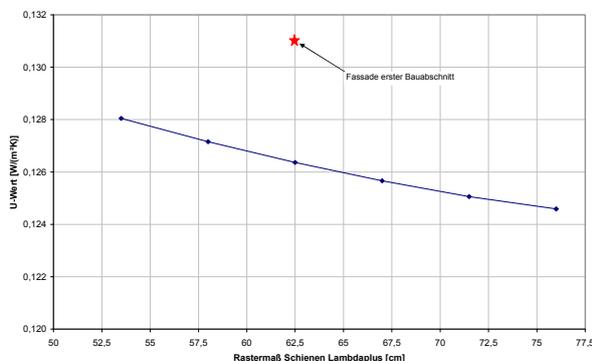


Abb. 4.1-21: Einfluss des Rastermaßes der Schienen auf den U-Wert der Fassade bei Standardrandbedingungen

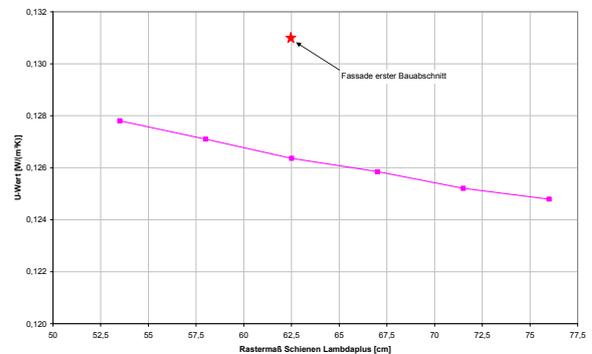


Abb. 4.1-22: Einfluss des Rastermaßes der Konsolen auf den U-Wert der Fassade bei Standardrandbedingungen

Variation der Kanthölzer

Auch die außen liegenden Kanthölzer wirken sich auf den U-Wert aus (siehe Abb. 4.1-23). Je kleiner das äußere Kantholz ausfällt, umso niedriger ist der U-Wert der gesamten Fassade. Das massive 6 x 8 Kantholz führt gegenüber der Dachlatte (2,5 x 4) zu einer Verschlechterung des U-Wertes um 2 %.

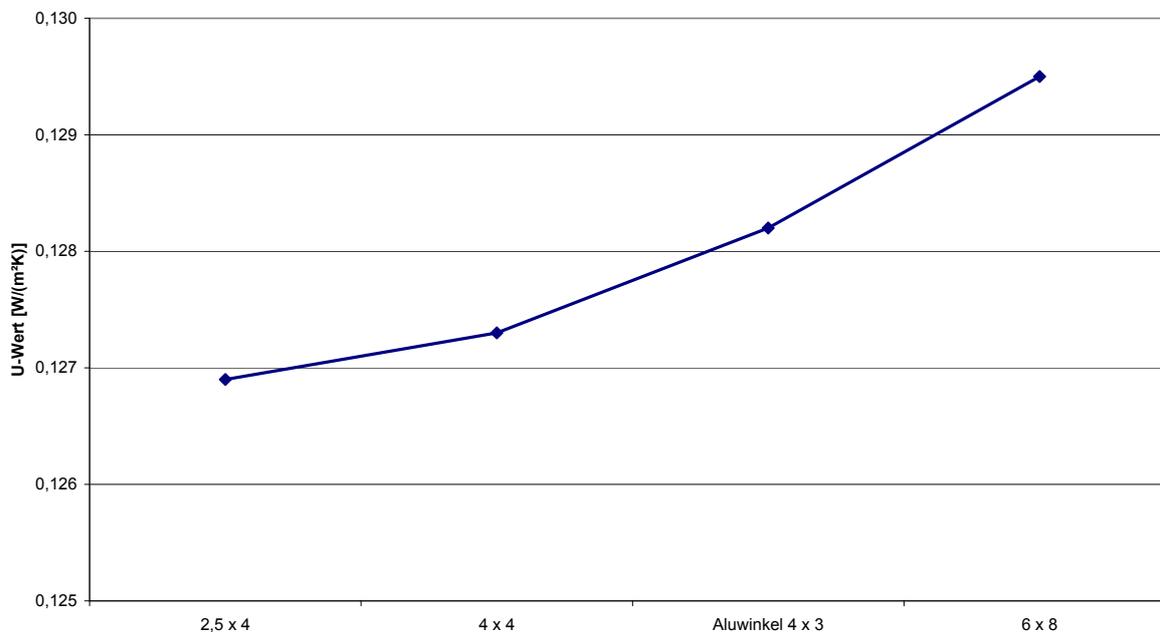


Abb. 4.1-23: Einfluss unterschiedlicher Kanthölzer außen auf den U-Wert der Fassade bei Standardrandbedingungen

Ausführung mit dreieckigen Konsolen

Um die Lasten der Fassade abtragen zu können, ist die Länge der Konsole auf der Wandseite von Bedeutung, nicht jedoch in gleichem Maß die Länge an der Außenseite der Fassade – sie kann somit auch mit einer abgeschrägten Seite ausgeführt werden. Dies kann energetische Vorteile bringen, da der Holzanteil verringert wird. Aus diesem Grund wurden die Auswirkungen einer Veränderung der Konsolenform untersucht. Zur Modellierung wurden die abgeschrägten Konsolen in flächengleiche Rechtecke unterteilt. Der dreieckige Teil der Konsole wurde im 3D-Wärmebrückenprogramm vereinfacht folgendermaßen angenähert: unten 1/3 Gesamthöhe über gesamte Breite, oben 1/2 Tiefe über 2/3 der Höhe (Abb. 4.1-24).

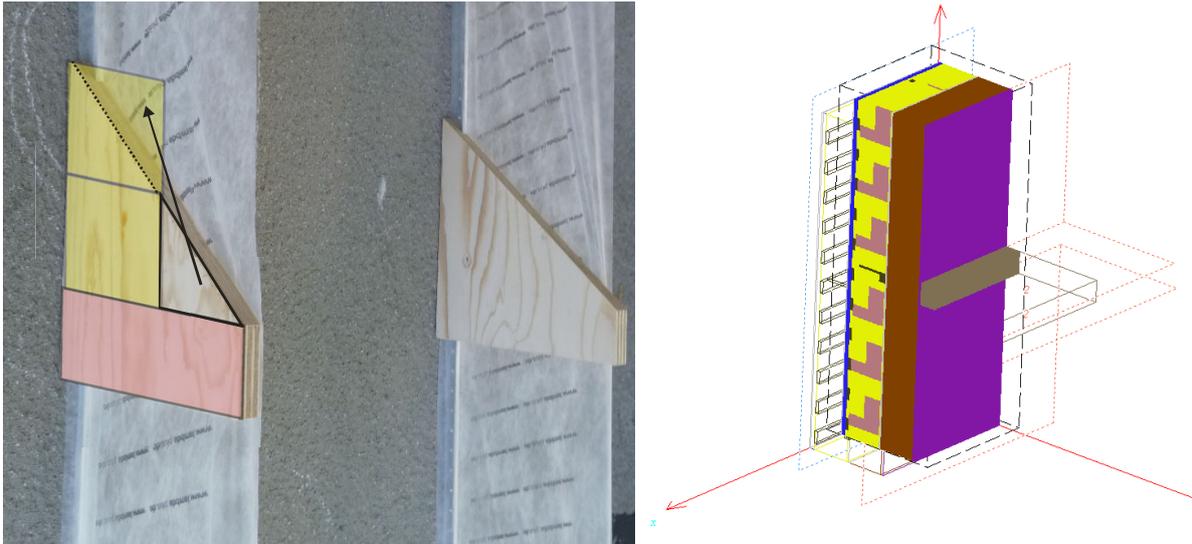


Abb. 4.1-24: Modellierung dreieckiger Konsolen : links Projektion im Foto, rechts Ausschnitt aus dem 3D-Modell

Die dreieckige Ausführung der Konsole führt zu einer Verringerung des U-Wertes der Fassade um ca. 3,1 % (bei Standardabmessungen), bei Kombinationen mit geringerem Ausgangs-U-Wert kann die Verbesserung auch darunter liegen.

Die Ergebnisse dieser Berechnungen wurden von Planungsbüro und Statiker bei einer angepassten Konstruktion der Fassade für den zweiten und dritten Bauabschnitt in der Rotlintstraße aufgenommen, wobei in einigen Details von den oben vorgestellten Varianten abwichen wurde. Im nächsten Kapitel wird die umgesetzte Ausführung beschrieben und der U-Wert dargestellt.

4.1.4 U-Wert der Fassade im 2. und 3. Bauabschnitt

Die ausgeführte Fassade wurde gegenüber dem ersten Bauabschnitt um 2 cm auf 27 cm Dämmstärke reduziert. Die Konsolen sind abgeschrägt und besitzen an der Innenseite eine Höhe von 27 cm, an der Außenseite eine Höhe von 6 cm. Weiterhin wurde als horizontale Ebene zum Lastabtrag des Gewichts des Dämmstoffs und als Brandschott auf Höhe der Geschossdecke eine 1,5 cm dicke Gipsfaser-Platte und darunter ein 5 cm dicker Streifen aus Mineralfaser angeordnet. Das Rastermaß der Schienen beträgt 65,5 bzw. 71,5 cm, wenn es nicht durch Fenster unterbrochen wird.

Ähnlich wie bei der Fassade im ersten Bauabschnitt wurde für einen ungestörten Ausschnitt der Fassade eine dreidimensionale Wärmebrückenberechnung durchgeführt und das Ergebnis mit Berechnungen nach DIN EN ISO 6946 verglichen. Um die Genauigkeit des Berechnungsergebnisses zu erhöhen, wurde die Konsolenform nicht nur mit zwei, sondern mit drei Rechtecken angenähert. Abb. 4.1-25 zeigt das dreidimensionale Modell der Fassade und den Isothermenverlauf in der Ebene der Konsolen. Die 3D-Berechnung des Standardausschnittes ergibt einen U-Wert von $0,129 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, der wegen der um 2 cm geringeren Dämmstoffdicke trotz des geringeren Holzanteils nur wenig niedriger liegt, als der der Fassade im ersten Bauabschnitt.

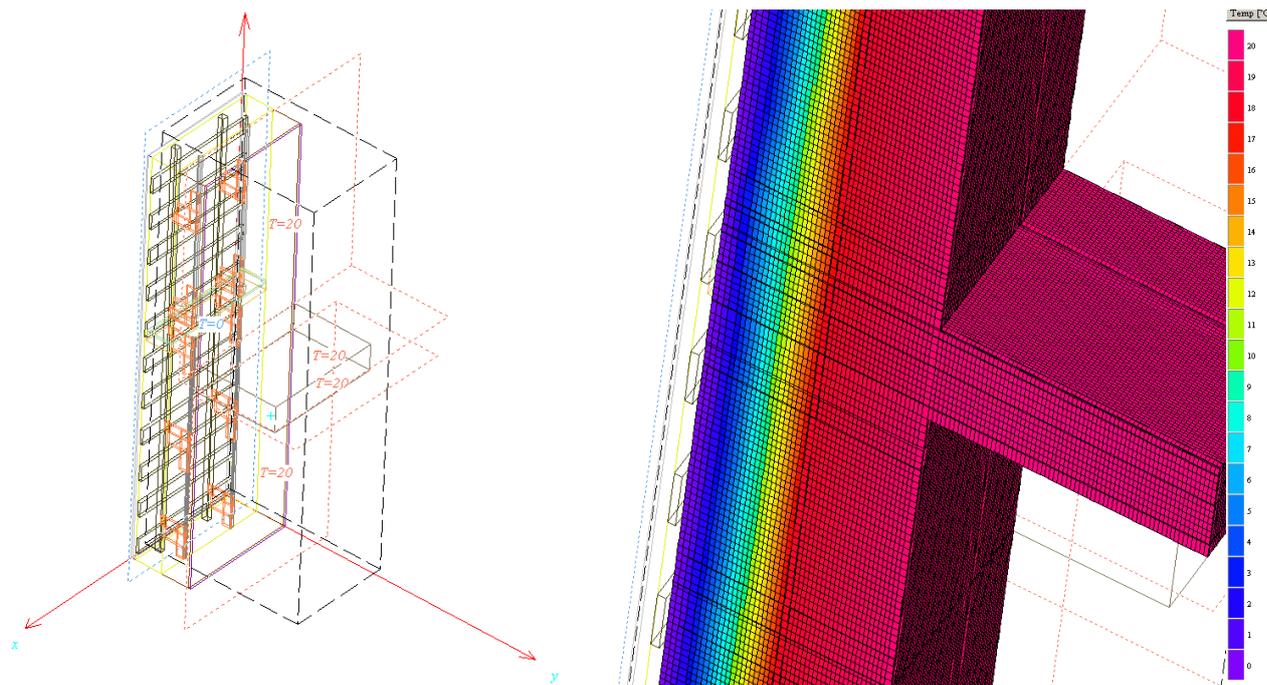


Abb. 4.1-25: 3-D Wärmebrückendetail der Fassade bei Rastermaß 65,5 mm, links Gittermodell, rechts Isothermendarstellung in Konsolenebene

Zur Berechnung des U-Wertes nach DIN EN ISO 6946 wurde die Dämmschicht in drei Ebenen unterteilt:

- hintere Ebene (90 mm tief) mit voller Konsolenhöhe (270 mm)
- mittlere Ebene (120 mm tief) mit 1/3 der Konsolenhöhe (90 mm) und
- vordere Ebene (60 mm) entsprechen der Dicke der vertikalen Kanthölzer mit 1/3 der Konsolenhöhe.

Tabelle 4.1-4: Aufnahme der Holzanteile des Standardfassadenausschnitts im 2. / 3. Bauabschnitt

	Bauteil A	Bauteil B	Bauteil C		Bauteil D
Standardfassade [m]	Konsolen [Stk]	vertikale Kanthölzer [m]	hor. Kanthölzer [Stk]	Summe Holz	Gipsfaser-Platte [m]
über gesamte Fassade	9	5,50	2		1,32
Breite/Höhe [m]	0,02	0,06	0,06		0,015
Breite/Höhe [m]			0,04		
Fläche Ebene 1 [m ²]	0,05		0,005	0,1	0,02
Fläche Ebene 2 [m ²]	0,03		0,005	0,0	0,02
Fläche Ebene 3 [m ²]	0,02	0,3	0,005	0,4	0,02
Flächenanteil Ebene1	1,3%	0,0%	0,1%	1,5%	0,5%
Flächenanteil Ebene2	0,9%	0,0%	0,1%	1,0%	0,5%
Flächenanteil Ebene3	0,4%	9,1%	0,1%	9,7%	0,5%
Wärmeleitfähigkeit	0,13	0,13	0,286		0,32
mittlere Wärmeleitfähigkeit					
Ebene 1	0,144	W/(mK)			
Ebene 2	0,150	W/(mK)			
Ebene 3	0,132	W/(mK)			

Für diese Ebenen wurden der mittlere Holzanteil und die mittlere Wärmeleitfähigkeit ermittelt (Tabelle 4.1-4) und in der U-Wert-Berechnung verwendet. Es ergibt sich ein U-Wert von 0,139 W/(m²K), der somit 7,0 % über der dreidimensionalen Berechnung liegt (Abb. 4.1-26).

Der Fehler der Berechnung e nach DIN EN ISO 6946 liegt unter dem Fehler der 3D-Berechnung. Die im Folgenden berechneten U-Werte der Fassade wurden anschließend um den Fehler zur 3D-Berechnung korrigiert.

1 Fassade Rotlintstraße 2. BA, Ausschnitt mit 2 x Rastermaß 66,5 cm, Dämmdicke 27 cm, Gipskarton-Platte horizontal										
Bauteil Nr. Bauteil-Bezeichnung		Wärmeübergangswiderstand [m ² K/W]		innen R _s :	Höhe	Fläche	3,63 m ²			
				außen R _s :	Breite	Dämmdick	0,27 m			
Teilfläche 1	λ [W/(mK)]	Teilfläche 2 (optional)	λ [W/(mK)]	Anteil Fläche 2	Teilfläche 2 (optional)	λ [W/(mK)]	Anteil Fläche 3	Summe Breite	Dicke [mm]	
1. Innenputz	0,800							20		
2. Trümmer-Hohlblock	0,610							300		
3. Außenputz	1,000							20		
4. Einblasdämmung	0,040	Konsolen, Kanthölzer	0,144	1,5%	Gipsfaser-Platte	0,320	0,5%	90		
5. Einblasdämmung	0,040	Konsolen, Kanthölzer	0,150	1,0%	Gipsfaser-Platte	0,320	0,5%	120		
6. Einblasdämmung	0,040	Konsolen, Kanthölzer	0,132	9,7%	Gipsfaser-Platte	0,320	0,5%	60		
7. Einblasdämmung	0,040	Sparschalung	0,130	40,0%	Gipsfaser-Platte	0,320	0,5%	25		
8. Heraklith EM 35	0,090							35		
9. Außenputz	1,000							10		
10.										
11.										
Fehler der Berechnung								-4,6%		
U-Wert:						0,139	W/(m ² K)	Summe		68,0 cm
U-Wert aus 3D-Berechnung:						0,129	W/(m ² K)			
Korrekturfaktor						-7,0%				

Abb. 4.1-26: Berechnung des U-Wertes des Standardfassadenausschnitts nach DIN EN ISO 6946

Die U-Werte der einzelnen Fassadenseiten weichen von diesem Standard-U-Wert ab, da durch die Fenster unterschiedliche Rastermaße vorhanden sind und zusätzliche Holzanteile im Bereich unter und über den Fenstern vorhanden sind. Im Folgenden wird für das Gebäude Rotlintstraße 122-124 der mittlere U-Wert über alle Fassadenflächen ermittelt und anschließend auf die Gebäude Rotlintstraße 126-128 übertragen, da zum Zeitpunkt der Berichtserstellung noch keine Detailpläne für den 3. Bauabschnitt vorlagen.

Westfassade

Die Westfassade besitzt große Fensterflächen (siehe Abb. 4.1-27) in den Wohnzimmern sowie weitere Fenster, die ein kontinuierliches Raster der Fassadenkonstruktion verhindern. Ober- und unterhalb der Fenster sind weiterhin zusätzliche Kanthölzer erforderlich.

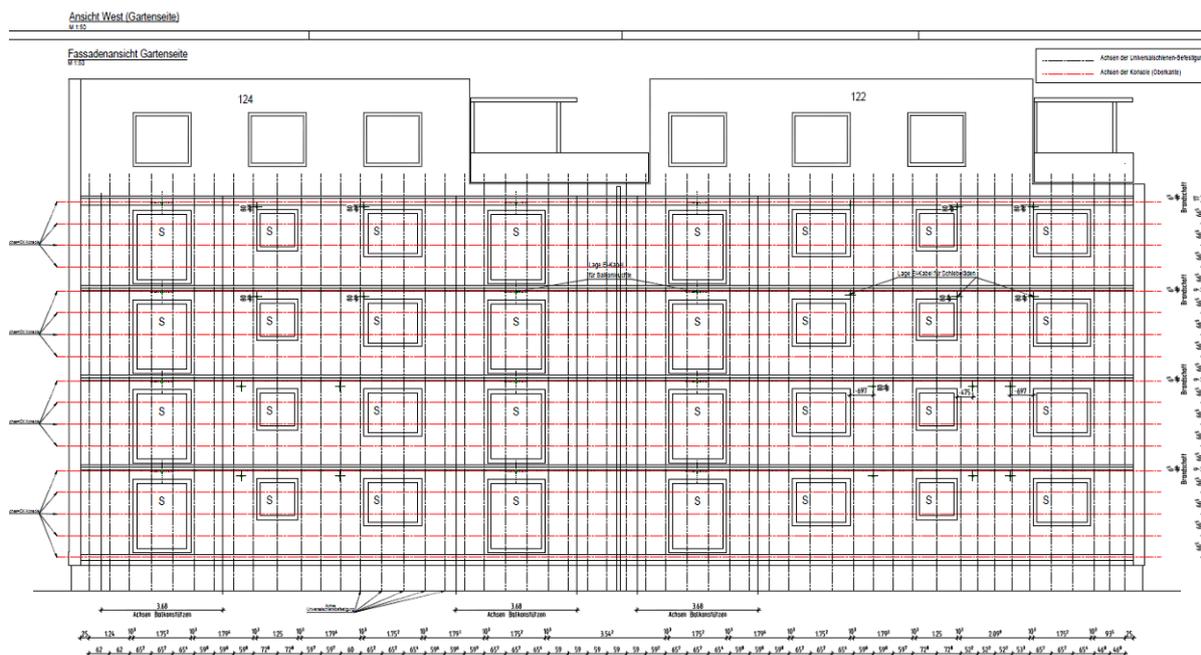


Abb. 4.1-27: Ansicht der Westfassade Rotlintstraße 122-124

In Tabelle 4.1-5 ist exemplarisch die Aufnahme der Holzanteile in den drei Ebenen der Fassadenkonstruktion, in Abb. 4.1-28 die Berechnung des U-Wertes der Westfassade dargestellt. Es ergibt sich eine U-Wert von 0,130 W/(m²K).

Tabelle 4.1-5: Aufnahme der Holzanteile der Westfassade Rotlintstraße 122-124

	Bauteil A	Bauteil B	Bauteil C		Bauteil D
Westfassade [m]	Konsolen [Stk]	vertikale Kanthölzer [m]	hor. Kanthölzer [Stk]	Summe Holz	Gipsfaser-Platte [m]
über gesamte Fassade	440	255,64	88		109,5
zusätzlich EG	116	34,62	96		-13,0
zusätzlich 1.OG	116	34,62	96		-13,0
zusätzlich 2.OG	116	34,62	96		-13,0
zusätzlich 3.OG	116	34,62	96		-13,0
Breite/Höhe [m]	0,02	0,06	0,06		0,015
Breite/Höhe [m]			0,04		
Fläche Ebene 1 [m ²]	4,88		1,13	6,0	0,86
Fläche Ebene 2 [m ²]	3,25		1,13	4,4	0,86
Fläche Ebene 3 [m ²]	1,63	23,6	1,13	26,4	0,86
Flächenanteil Ebene1	1,7%	0,0%	0,4%	2,1%	0,3%
Flächenanteil Ebene2	1,1%	0,0%	0,4%	1,5%	0,3%
Flächenanteil Ebene3	0,6%	8,4%	0,4%	9,3%	0,3%
Wärmeleitfähigkeit	0,13	0,13	0,286		0,32
mittlere Wärmeleitfähigkeit					
Ebene 1	0,159	W/(mK)			
Ebene 2	0,170	W/(mK)			
Ebene 3	0,137	W/(mK)			

2 Westfassade wie ausgeführt									
Bauteil Nr. Bauteil-Bezeichnung								Wärmeübergangswiderstand [m ² K/W] innen R _{si} : 0,13	
								außen R _{se} : 0,04	
Teilfläche 1	λ [W/(mK)]	Teilfläche 2 (optional)	λ [W/(mK)]	Anteil Fläche 2	Teilfläche 2 (optional)	λ [W/(mK)]	Anteil Fläche 3	Summe Breite	Dicke [mm]
1. Innenputz	0,800							20	
2. Trümmer-Hohlblock	0,610							300	
3. Außenputz	1,000							20	
4. Einblasdämmung	0,040	Konsolen, Kanthölzer	0,159	2,1%	Gipsfaser-Platte	0,320	0,3%	90	
5. Einblasdämmung	0,040	Konsolen, Kanthölzer	0,170	1,5%	Gipsfaser-Platte	0,320	0,3%	120	
6. Einblasdämmung	0,040	Konsolen, Kanthölzer	0,137	9,3%	Gipsfaser-Platte	0,320	0,3%	60	
7. Einblasdämmung	0,040	Sparschalung	0,130	40,0%	Gipsfaser-Platte	0,320	0,3%	25	
8. Heraklith EM 35	0,090							35	
9. Außenputz	1,000							10	
10.									
11.									
Fehler der Berechnung -5,1%								U-Wert (DIN EN ISO 6946): 0,140 W/(m ² K)	
Korrekturfaktor -7,0%								U-Wert korrigiert: 0,130 W/(m ² K)	
								Summe 68,0 cm	

Abb. 4.1-28: Berechnung der Westfassaden-U-Wertes nach DIN EN ISO 6946

Südfassade

Die Südfassade erreicht eine U-Wert von 0,129 W/(m²K), da die Fassade ein gleichmäßiges Raster der Unterkonstruktion erlaubt (Abb. 4.1-29 und Abb. 4.1-30).

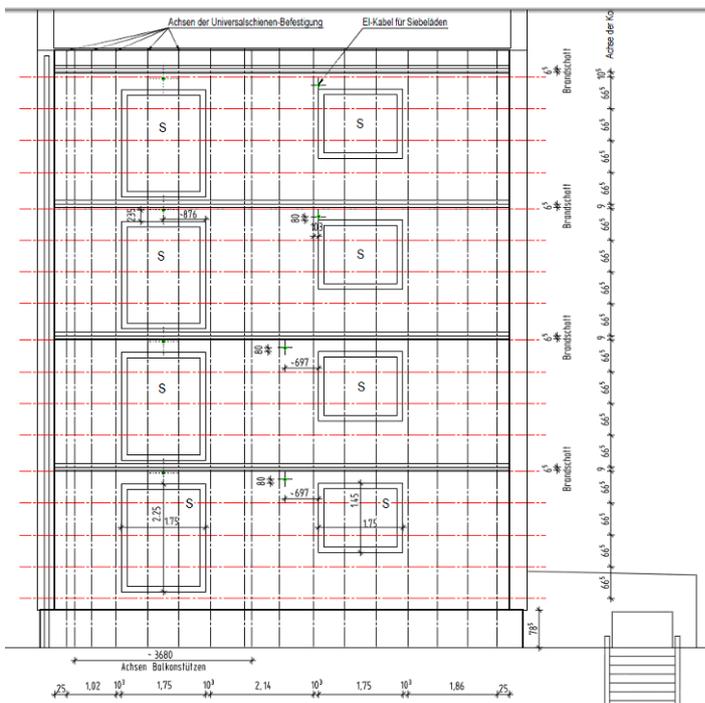


Abb. 4.1-29: Ansicht der Südfassade Rotlintstraße 122-124

4 Südfassade wie ausgeführt								Summe Breite	
Bauteil Nr. Bauteil-Bezeichnung		Wärmeübergangswiderstand [m ² K/W]		innen R _s :		außen R _s :		Dicke [mm]	
				0,13		0,04			
Teilfläche 1	λ [W/(mK)]	Teilfläche 2 (optional)	λ [W/(mK)]	Anteil Fläche 2	Teilfläche 2 (optional)	λ [W/(mK)]	Anteil Fläche 3		
1. Innenputz	0,800							20	
2. Trümmer-Hohlblock	0,610							300	
3. Außenputz	1,000							20	
4. Einblasdämmung	0,040	Konsolen, Kanthölzer	0,158	1,3%	Gipsfaser-Platte	0,320	0,4%	90	
5. Einblasdämmung	0,040	Konsolen, Kanthölzer	0,169	0,9%	Gipsfaser-Platte	0,320	0,4%	120	
6. Einblasdämmung	0,040	Konsolen, Kanthölzer	0,135	7,7%	Gipsfaser-Platte	0,320	0,4%	60	
7. Einblasdämmung	0,040	Sparschalung	0,130	40,0%	Gipsfaser-Platte	0,320	0,4%	25	
8. Heraklith EM 35	0,090							35	
9. Außenputz	1,000							10	
10.									
11.									
Fehler der Berechnung -5,2%								U-Wert (DIN EN ISO 6946): 0,138 W/(m ² K)	
Korrekturfaktor -7,0%								U-Wert korrigiert: 0,129 W/(m ² K)	
								Summe 68,0 cm	

Abb. 4.1-30: Berechnung der Südfassaden-U-Wertes nach DIN EN ISO 6946

Ostfassade

Die Ostseite stellt den kompliziertesten Fassadenaufbau dar, da durch die Treppenhausfenster, die Durchdringungen der Frisch- und Fortluftleitungen jeder Wohnung und die kleinen Fenster ein sehr inhomogenes Fassadenraster entsteht (Abb. 4.1-31). Werden diese Abweichungen von der Standardkonstruktion berücksichtigt, ergibt sich ein U-Wert von 0,131 W/(m²K) (Abb. 4.1-32).



Abb. 4.1-31: Ansicht der Ostfassade Rotlintstraße 122-124

3 Nordfassade wie ausgeführt									
Bauteil Nr. Bauteil-Bezeichnung								Wärmeübergangswiderstand [m ² K/W] innen R _{si} : 0,13	
								außen R _{se} : 0,04	
Teilfläche 1	λ [W/(mK)]	Teilfläche 2 (optional)	λ [W/(mK)]	Anteil Fläche 2	Teilfläche 2 (optional)	λ [W/(mK)]	Anteil Fläche 3	Summe Breite	Dicke [mm]
1. Innenputz	0,800							20	
2. Trümmer-Hohlblock	0,610							300	
3. Außenputz	1,000							20	
4. Einblasdämmung	0,040	Konsolen, Kanthölzer	0,143	1,5%	Gipsfaser-Platte	0,320	0,4%	90	
5. Einblasdämmung	0,040	Konsolen, Kanthölzer	0,148	1,0%	Gipsfaser-Platte	0,320	0,4%	120	
6. Einblasdämmung	0,040	Konsolen, Kanthölzer	0,132	9,2%	Gipsfaser-Platte	0,320	0,4%	60	
7. Einblasdämmung	0,040	Sparschalung	0,130	40,0%	Gipsfaser-Platte	0,320	0,4%	25	
8. Heraklith BM 35	0,090							35	
9. Außenputz	1,000							10	
10.									
11.									
Fehler der Berechnung -4,7%								U-Wert (DIN EN ISO 6946): 0,138 W/(m ² K)	
Korrekturfaktor -7,0%								U-Wert korrigiert: 0,128 W/(m ² K)	
								Summe Dichte: 68,0 cm	

Abb. 4.1-34: Berechnung der Nordfassaden-U-Wertes nach DIN EN ISO 6946

Gesamt-U-Wert der Fassade im 2. Bauabschnitt

Insgesamt ergeben sich für die einzelnen Fassaden nur geringe Abweichungen von den Ergebnissen einer ungestörten Fassade, da Holzanteile in die Wärmebrückenbetrachtung ausgelagert werden mussten. Bildet man den flächengewichteten Mittelwert aller Fassaden, so ergibt sich ein U-Wert von 0,130 W/(m²K), der in der Folge im PHPP für die Bilanzierung für die Häuser Rotlintstraße 122-128 verwendet wird.

Tabelle 4.1-6: Berechnung der Gesamt-U-Wertes der Fassade

Fassadenseite	Fläche m ²	U-Wert W/(m ² K)
Nord	117,8	0,128
Ost	309,5	0,131
Süd	92,6	0,129
West	283,2	0,130
mittlerer U-Wert	803,1	0,130

4.1.5 Wärmebrücken im Fassadenbereich

Im Folgenden sollen die wichtigsten Anschlusssituationen und Wärmebrücken bei den beiden Fassadenkonstruktionen betrachtet werden. Hierbei muss beachtet werden, dass bei der Wärmebrückenberechnung grundsätzlich vom Gesamtwärmestrom des jeweiligen Details (z. B. Fenstereinbau in Fassade) der ungestörte Wärmestrom der zugehörigen Bauteile abgezogen wird. Hier ergibt sich das Problem, dass in dem zweidimensionalen Ausschnitt eines Wärmebrückendetails U-Wert-bestimmende Teile u. U. nicht vorkommen (z. B. die horizontalen Kanthölzer bei der Fassade in einem horizontalen Schnitt außerhalb der Ebene der Kanthölzer) und somit die Verwendung des Gesamt-U-Wertes zu einer Fehlinterpretation führen würde. Aus diesem Grund wurde für die Bestimmung des ungestörten Anteils der Fassade in einem Wärmebrückendetail der U-Wert der Wand für einen Ausschnitt der jeweiligen Schnittebene und dem Rastermaß (z. B. 62,5 cm) berechnet, das im Detail auch modelliert wurde.

Die OSB-Platten am Fenster können entweder zur Fassade oder zur Wärmebrücke gerechnet werden. Bei der Berücksichtigung im Wärmebrückenverlustkoeffizient dürfen jedoch bei der U-Wert-Berechnung für die Gesamtfassade die seitlich oder über/unter den Fenstern angeordneten OSB-Platten und Kanthölzer nicht berücksichtigt werden (siehe Kapitel 4.1.2 und Kapitel 4.1.4).

Für die Sparschalung aus Holz und Zellulose wurde eine mittlere Wärmeleitfähigkeit von $0,076 \text{ W/(mK)}$ angesetzt, damit diese dreidimensionale Struktur in der zweidimensionalen Wärmebrückenberechnung berücksichtigt werden kann. Für OSB-Platten und Kanthölzer senkrecht zur Außenwand (in Wärmestromrichtung) wurde eine Wärmeleitfähigkeit vom 2,2-fachen des Wertes quer zur Faserrichtung angesetzt, d. h. $0,286 \text{ W/(mK)}$.

4.1.5.1 Einbausituation der Fenster

Der Fenstereinbau in die Fassadenkonstruktion unterscheidet sich in einigen Details deutlich vom Einbau in ein Wärmedämmverbundsystem. Besonders die aus Brandschutzgründen um die Fenster angeordneten Gipsfaser-Platten und die Setzhölzer, die den Einbau der Fenster erleichtern sollen, erschweren wärmebrückenarme Lösungen.

Seitlicher Anschluss, Konstruktion 1. Bauabschnitt

In Abb. 4.1-35 ist exemplarisch der seitliche Anschluss des Fensters an das Bestandsmauerwerk und die Fassade dargestellt. Die Fassadenkonstruktion schließt mit einem Kasten aus OSB-Platten um das Fenster herum und eine Gipsfaser-Platte ab. Um eine gewisse thermische Entkopplung zu erreichen, verbleibt ein Spalt von 20 mm zwischen Gipsfaser-Platte und Bestandswand, der mit Mineralfaserdämmung gefüllt wird. Ebenso ist grundsätzlich ein Abstand von 50 mm zwischen Kasten der Fassadenkonstruktion und Bestandswand vorhanden. Es schließt sich eine Überdämmung aus Steinwolle in der Fensterlaibung an. Bei einem Dämmstreifen mit 70 mm Breite ergibt sich eine Überdämmung des Rahmens von 30 mm und ein Wärmebrückenverlustkoeffizient (Ψ -Wert) von $0,028 \text{ W/(mK)}$.

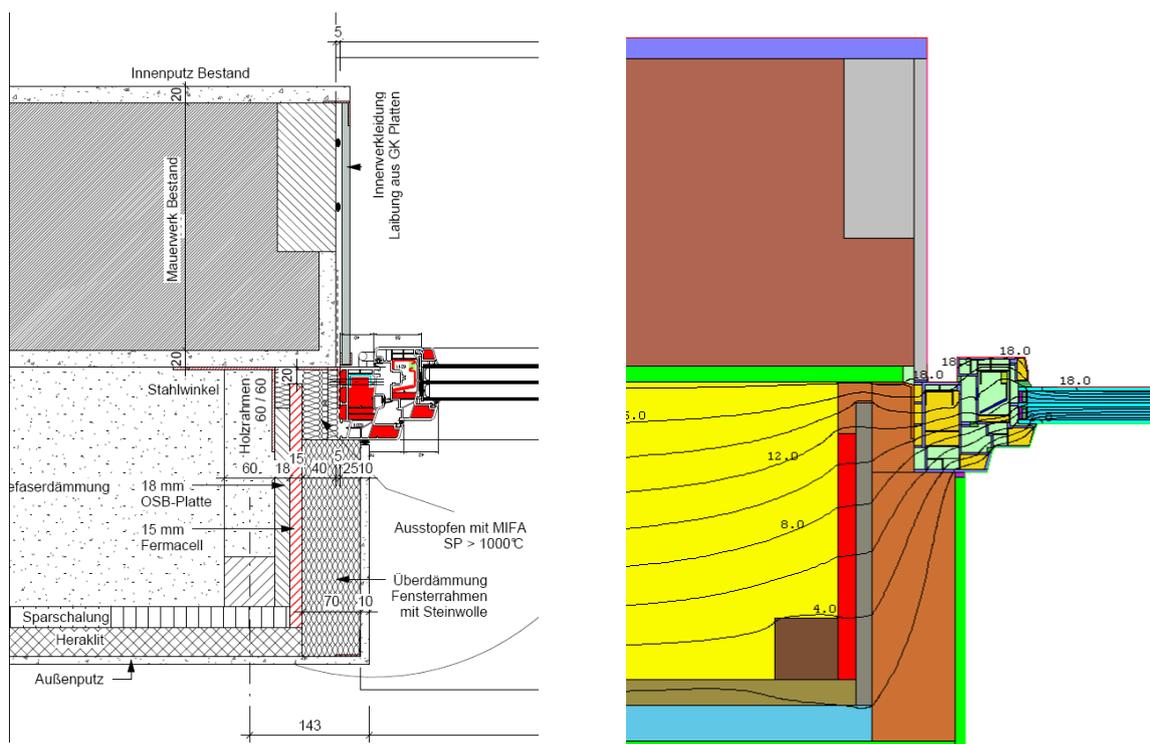


Abb. 4.1-35: Detail 1. Bauabschnitt: seitliche Einbausituation der Fenster in die Fassade (links Konstruktionszeichnung, rechts Isothermendarstellung)

Grundsätzlich stehen bei diesem Rahmen ca. 70 mm Blendrahmenstärke zur Überdämmung zur Verfügung. In Abb. 4.1-36 ist aus diesem Grund für unterschiedliche Breiten der Überdämmung und zwei verschiedene Wärmeleitfähigkeiten des Dämmstoffs der Zusammenhang zwischen Überdämmung und Ψ -Wert dargestellt. Würde die Überdämmung bis auf 60 mm erhöht und ein Dämmstoff mit der einer Wärmeleitfähigkeit von $\lambda = 0,035$ W/(mK) eingesetzt, so reduziert sich der Ψ -Wert auf 0,016 W/(mK). Der Heizwärmebedarf des ersten Bauabschnitts reduzierte sich dadurch um ca. 0,2 kWh/(m²a), auf die gesamte Anlage hochgerechnet entspricht dies ca. 730 kWh/a. Im ersten Bauabschnitt umgesetzt wird eine Überdämmung von 40 mm (Dicke des Dämmstreifens 80 mm) mit $\lambda = 0,040$ W/(mK). Es ergibt sich dann ein Ψ -Wert von 0,024 W/(mK) und eine hochgerechnete Verbesserung des Heizwärmebedarfs der Gesamtanlage von 230 kWh/a.

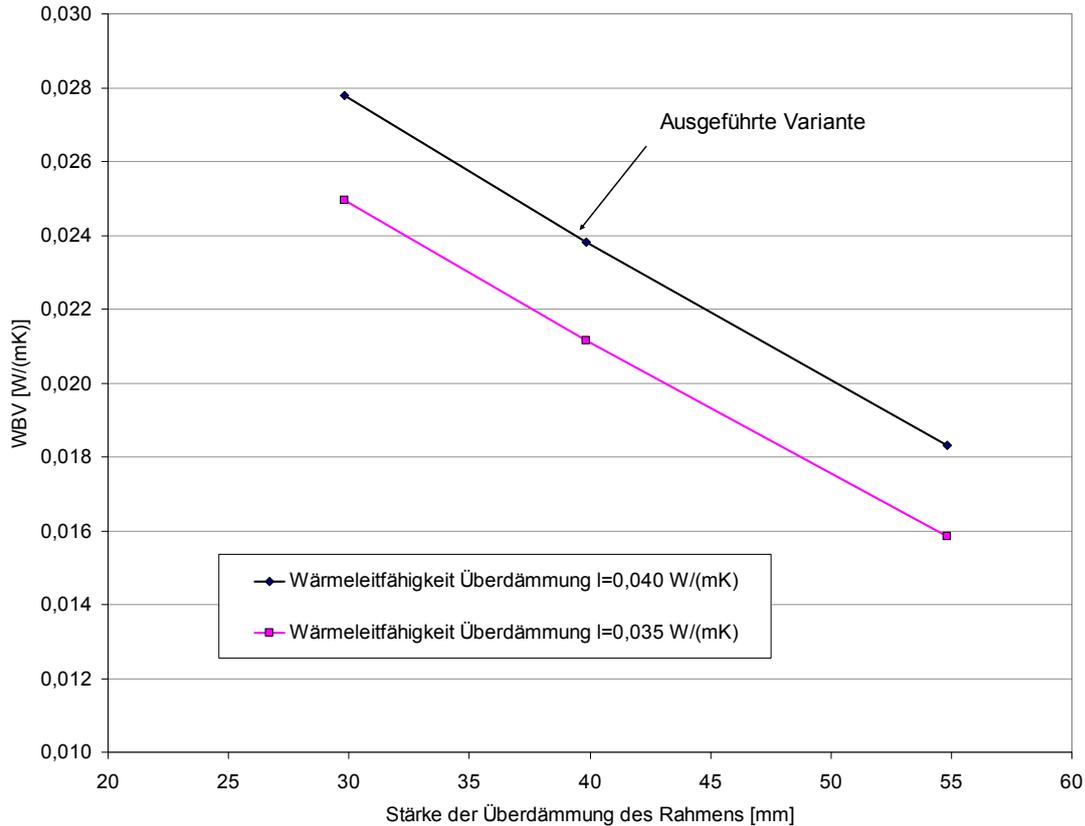


Abb. 4.1-36: Einfluss der Rahmenüberdämmung auf den Ψ -Wert der Fenstereinbaus seitlich

Seitlicher Anschluss, Konstruktion 2./3. Bauabschnitt

Im 2./3. Bauabschnitt wurden die Konsolen ca. 65 mm vom Fensterausschnitt entfernt montiert und mit einer OSB-Platte beplankt. Es entsteht dadurch ein umlaufender Kasten um das Fenster, der vor Ort mit 80 mm Mineralfaserdämmung gefüllt wird, so dass eine Überdämmung des Fensterrahmens von ca. 25 mm erreicht werden kann. Es ergibt sich für diese Ausführungsvariante ein Ψ -Wert von 0,005 W/(mK), das Detail schneidet somit besser ab als im ersten Bauabschnitt.

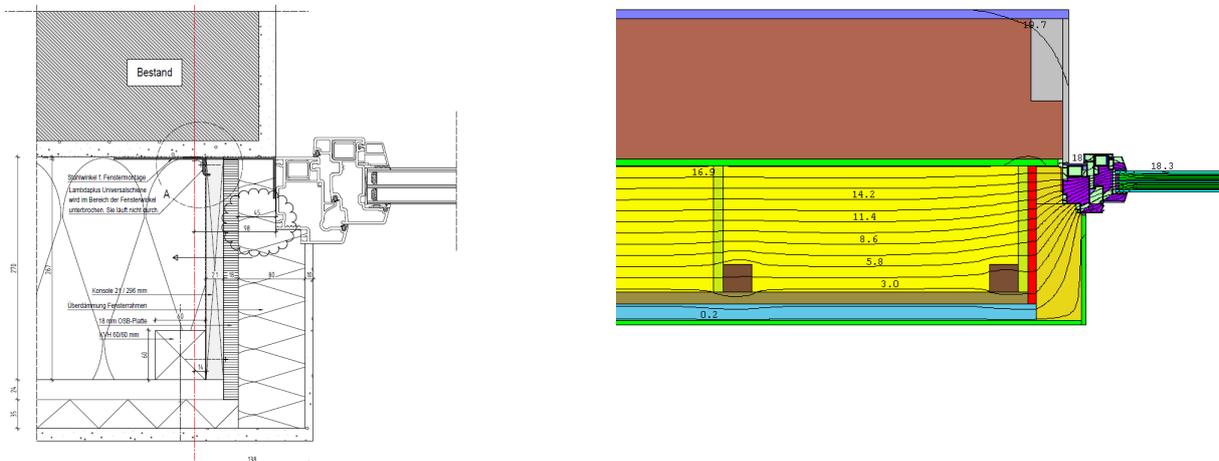


Abb. 4.1-37: Detail 2./3. Bauabschnitt: seitliche Einbausituation der Fenster in die Fassade (links Konstruktionszeichnung, rechts Isothermendarstellung)

Unterer Anschluss, Konstruktion 1. Bauabschnitt

Der untere Fensteranschluss (Abb. 4.1-38) ist wärmetechnisch besonders schwierig, da die Fensterbank von unten in das Rahmenprofil eingreift und dadurch keine Rahmenüberdämmung realisiert werden kann. Der Fensterrahmen wird auf einen druckfesten Streifen aus Purenit aufgesetzt, der seinerseits auf einem Kantholz ruht. Bei dieser Konstruktion ergibt sich ein Ψ -Wert von 0,062 W/(mK). Gelänge es, das Setzholz unter dem Purenitstreifen wegzulassen, verringert sich der Ψ -Wert für dieses Detail auf 0,043 W/(mK) und der Heizwärmebedarf um 0,1 kWh/(m²a).

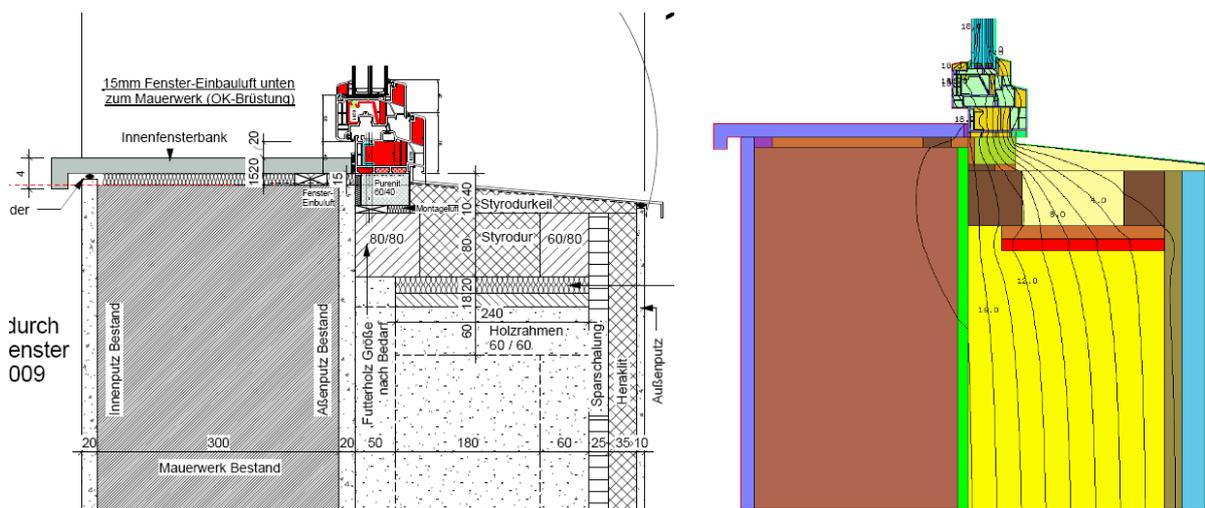


Abb. 4.1-38: Detail (links) und Isothermendarstellung (rechts) des unteren Fensteranschlusses

Unterer Anschluss, Konstruktion 2./3. Bauabschnitt

Im 2./3. Bauabschnitt wurden die Fenster durch einen anderen Typ des gleichen Anbieters ersetzt. Dies führt auch zu einer veränderten Ausführung an den Fenstern. Der Purenit-Streifen ist nicht mehr vorhanden, statt dessen wird ein Formteil aus Polystyrol zwischen Rahmen und OSB-Platte montiert, das eine verbesserte Dämmung des Details erlaubt (Abb. 4.1-39). Der Ψ -Wert liegt bei 0,043 W/(mK).

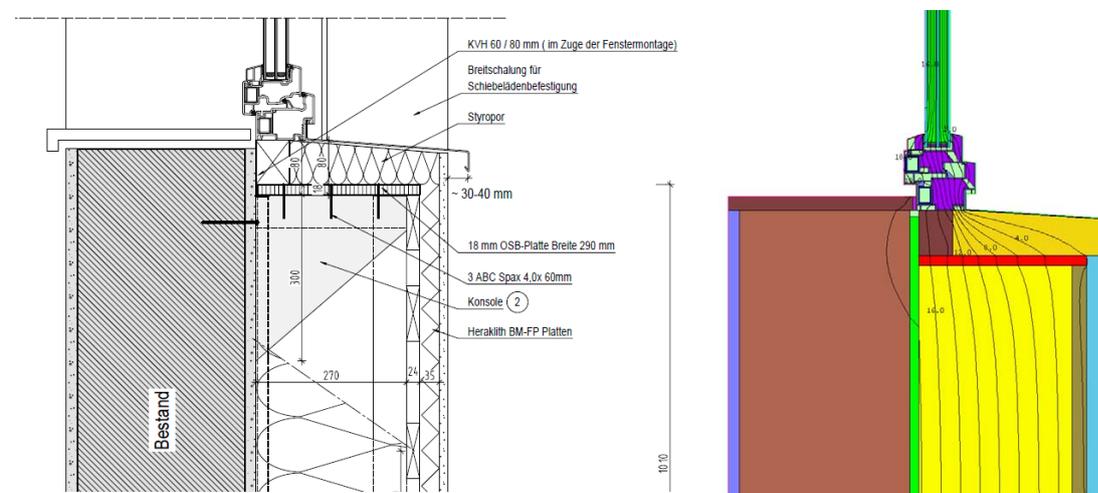


Abb. 4.1-39: Detail 2./3. Bauabschnitt (links) und Isothermendarstellung (rechts) des unteren Fensteranschlusses

Oberer Anschluss, Konstruktion 1. Bauabschnitt

Der obere Fensteranschluss wird nicht einheitlich ausgeführt. Im Erdgeschoss ist teilweise ein außen aufgesetzter Vorbaurollladen vorhanden, für den die Überdämmung des Fensterrahmens ausgespart werden muss. Dies führt dazu, dass der Ψ -Wert sich von 0,039 W/(mK) auf 0,049 W/(mK) mit Rollladenkasten verschlechtert.

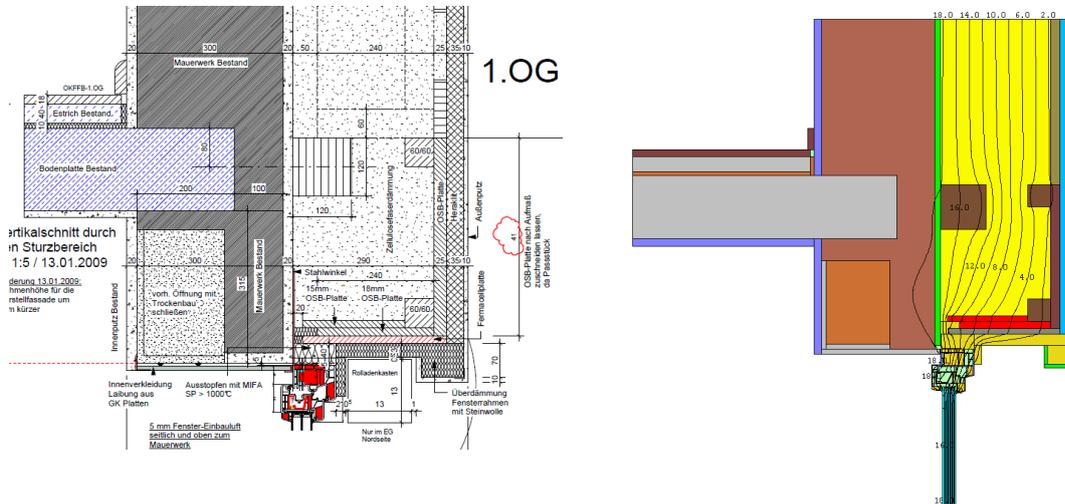


Abb. 4.1-40: Detail 1. Bauabschnitt (links) und Isothermendarstellung (rechts) des oberen Fensteranschlusses im EG (mit Rollladenkasten)

Oberer Anschluss, Konstruktion 2./3. Bauabschnitt

Im 2./3. Bauabschnitt erreicht der obere Fensteranschluss im Obergeschoss (ohne Rollladen) einen Ψ -Wert von 0,024 W/(mK), die Situation ist somit durch den geringeren Holzanteil im Fensterkasten deutlich günstiger. Wenn ein Rollladen vorhanden ist, wird hier eine Rahmenaufdopplung verwendet, wodurch der Ψ -Wert auf 0,040 W/(mK) steigt.

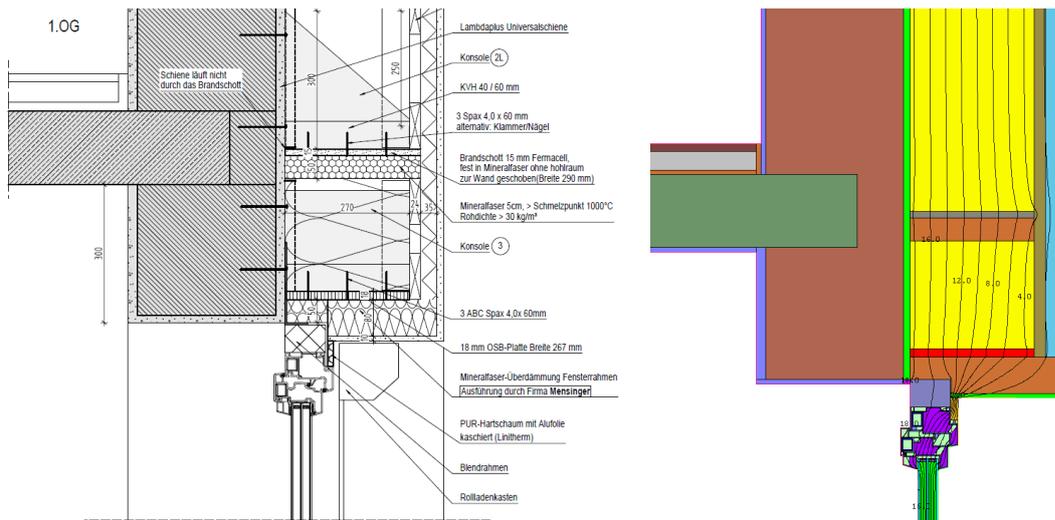


Abb. 4.1-41: Detail 2./3. Bauabschnitt (links) und Isothermendarstellung (rechts) des oberen Fensteranschlusses im EG (Rollladenkasten nicht mitmodelliert, sondern als erhöhter Übergangswiderstand außen berücksichtigt)

4.1.5.2 Außenecke der Fassade

Die Außenecke liefert bei gut wärmedämmten Gebäuden, wenn diese als separate Wärmebrücke betrachtet wird, meist einen „Wärmegewinn“, da die Längen der Ecken bei Außenmaßbezug doppelt berücksichtigt sind. Für den ersten Bauabschnitt ergibt sich ein Ψ -Wert von $-0,079 \text{ W/(mK)}$, für den 2./3. Bauabschnitt ein Wert von $-0,077 \text{ W/(mK)}$ – die beiden Varianten sind somit an dieser Stelle nahezu gleich.

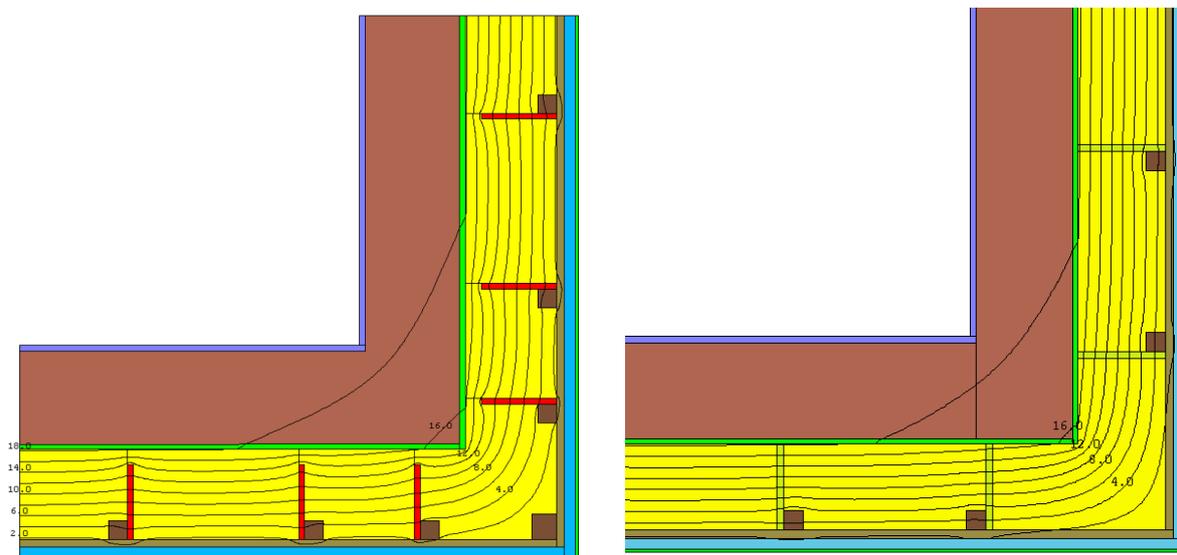


Abb. 4.1-42: Isothermendarstellung der Außenecke: links Ausführung 1. Bauabschnitt; rechts Ausführung 2./3. Bauabschnitt

4.1.5.3 Dachgeschoss an Fassade

Da das Dachgeschoss als vorgefertigte Holzkonstruktion auf der obersten Geschossdecke aufgestellt wird, entsteht auch die Notwendigkeit, den Übergang zwischen der Fassade im obersten Bestandsgeschoss und der Außenwand im Dachgeschoss energetisch zu lösen und zu untersuchen. Abb. 4.1-43 zeigt beide Ausführungsvarianten, wobei zu erkennen ist, dass die um 2 cm schlankere Dämmung im 2./3. Bauabschnitt hier den Vorteil besitzt, dass das Bestandsgeschoss nicht vor die darüberliegende Fassade vorsteht und so die Wasserführung vereinfacht wird (rechtes Bild). Energetisch sind beide Varianten nahezu identisch, der Ψ -Wert liegt im 1. Bauabschnitt bei $0,021 \text{ W/(mK)}$, im 2./3. bei $0,022 \text{ W/(mK)}$.

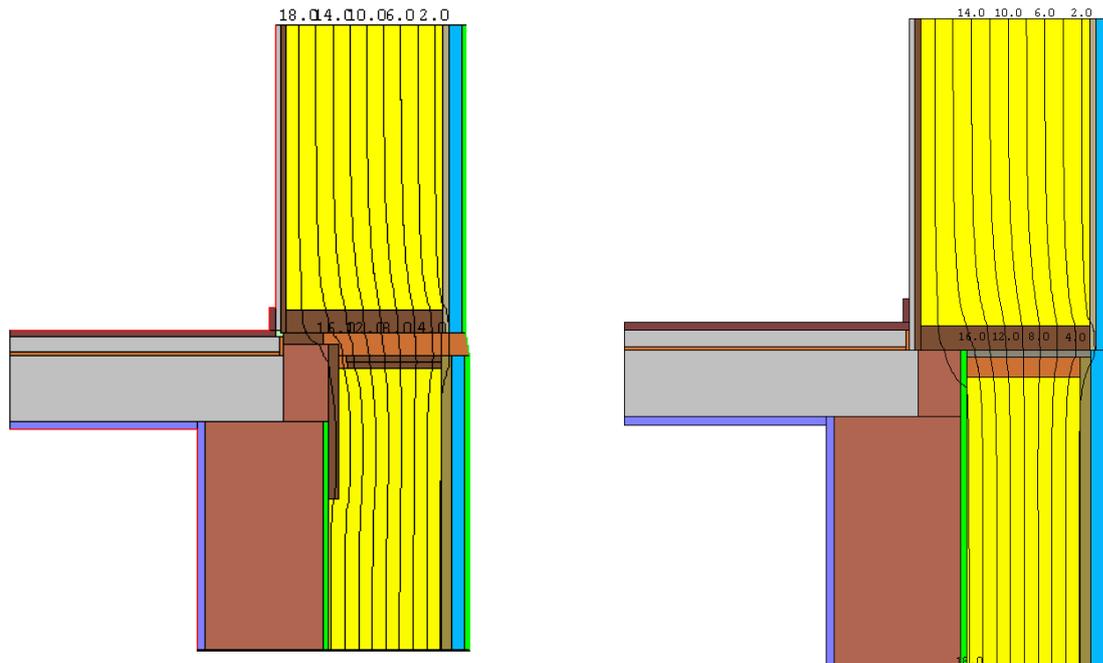


Abb. 4.1-43: Isothermendarstellung des Anschlusses oberstes Bestandsgeschoss an das Dachgeschoss: links 1. Bauabschnitt; rechts 2./3. Bauabschnitt

4.1.5.4 Fassade an Perimeterbereich

Der Anschluss an die Kellerdecke stellt unabhängig von der Ausführung der Fassade energetisch die höchsten Herausforderungen, da die Wärmebrücke am Kellerdeckenaufleger kaum vollständig zu entschärfen ist.

Abb. 4.1-44 zeigt beide Ausführungen des Anschlusses der Fassade am Perimeter. Hier schneidet die Fassade in der Ausführung des 1. Bauabschnitts mit einem Ψ -Wert von $0,059 \text{ W}/(\text{mK})$ besser ab, da die 30 cm dicke Perimeterdämmung, die einen niedrigeren U-Wert aufweist als die Fassade, bis zur Geschossdecke vorhanden ist. Die Fassade des 2./3. Bauabschnitts besitzt einen Ψ -Wert von $0,067 \text{ W}/(\text{mK})$, da die Fassade erst unter der Höhe der Kellerdecke endet. An die Perimeterdämmung mit 30 cm Polystyrol schließt sich bei allen Gebäuden eine 10 cm starke Dämmung der Kelleraußenwände an, die bis zum unteren Ende der Kellerwand vorhanden ist.

Auch die Ausführung der Kellerdeckendämmung und ggf. der Einsatz von seitlichen Dämmschürzen besitzen einen wichtigen Einfluss auf die Wärmeverluste am Kellerdeckenaufleger. Die Kellerdeckendämmung wird in der Rotlintstraße als abgehängte Decke mit 26 cm Zellulose-Dämmung ausgeführt (siehe auch Kapitel 4.2.1), wobei die 26 cm starke Dämmung wie eine kleine Dämmschürze wirkt. Im 1. Bauabschnitt würde sich der Ψ -Wert auf $0,032 \text{ W}/(\text{mK})$ verbessern, wenn Dämmschürzen von 14 cm Dicke und 100 cm Höhe an den Außenwänden vorhanden sind. Dies vermindert den Heizwärmebedarf des Gebäudes um $0,16 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$. Durch diese Dämmung würde die Nutzbarkeit der Kellerräume jedoch eingeschränkt und zusätzlich entstehen zusätzliche Kosten. Da der angestrebte Energiekennwert im ersten und dritten Bauabschnitt auch ohne Schürzen erreicht wird, der zweite Bauabschnitt auch mit Schürzen über dem Kennwert liegt (siehe Kapitel 7.4.3), wurde bei der Planung auf den Einsatz von Dämmschürzen im Keller verzichtet. Feuchteprobleme sind durch die fehlende Schürze nicht zu erwarten.

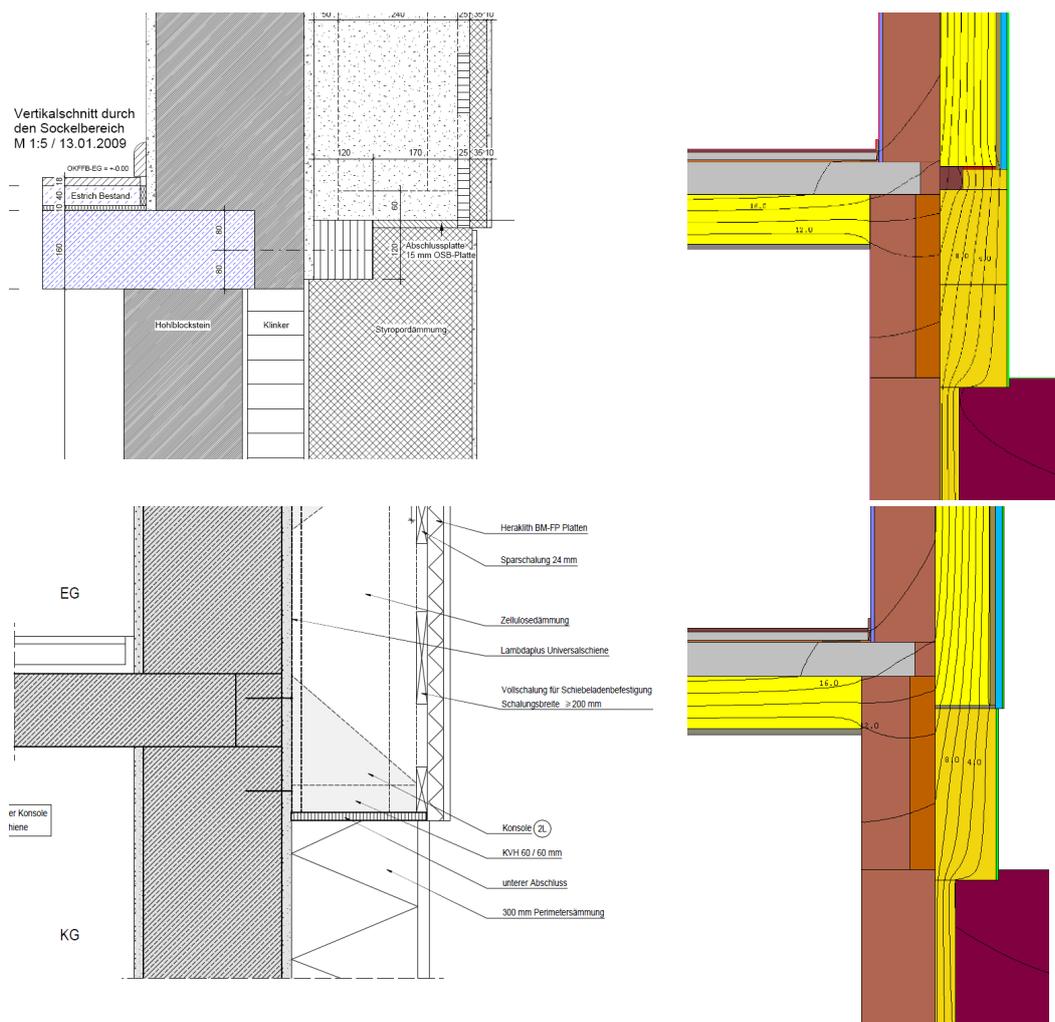
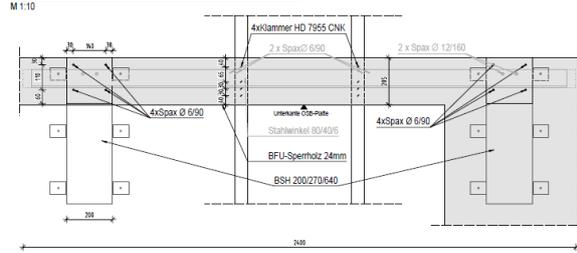


Abb. 4.1-44: Anschluss Fassade an Perimeter: oben Ausführung 1. Bauabschnitt; unten Ausführung 2./3. Bauabschnitt

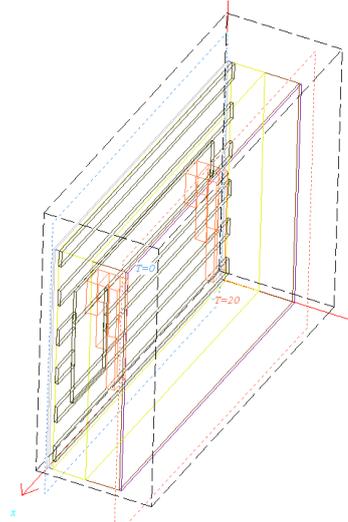
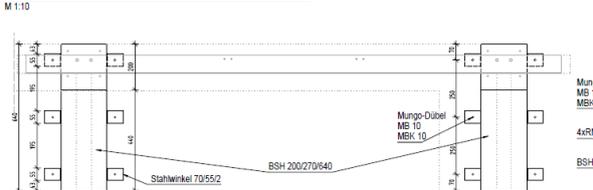
4.1.5.5 Konsolen zur Befestigung der Vordächer

Im ersten Bauabschnitt sind die Vordächer über den Hauseingangstüren an einem Stahlgerüst befestigt, das thermisch getrennt von der Gebäudehülle den Zugangsweg zu den Gebäuden überbrückt. Im zweiten und dritten Bauabschnitt ist die Zugangssituation anders gelöst und die Vordächer werden direkt an der Fassade befestigt. Dazu sind spezielle Konsolen erforderlich, die die Lasten des Vordachs durch die Dämmfassade abtragen können. Zwei abgeschrägte Massivholzkonsolen werden dazu mit Winkeln an der Bestandswand befestigt. Auf die Konsolen wird außen eine 24 mm BFU-Platte zur Aufnahme des Vordachs und der Klingel- und Briefkastenanlage montiert. In Abb. 4.1-45 ist links die Konstruktionszeichnung der Konsolen über dem Hauseingang wiedergegeben, rechts das 3D-Modell der Wärmebrückenberechnung. Es ergibt sich ein χ -Wert (da es sich um eine punktförmige Wärmebrücke handelt) von 0,029 W/K je Hauseingang.

Befestigung der BFU-Platte an den Konselhölzer



Befestigung der Konselhölzer an der Bestandswand


Abb. 4.1-45: Konsole über dem Hauseingang (2./3. Bauabschnitt); links Zeichnung, rechts 3D-Modell

4.1.6 Energetischer Vergleich der beiden Fassadenkonstruktionen

Um die energetische Qualität der beiden Fassadenkonstruktionen miteinander vergleichen zu können, müssen sowohl die U-Werte als auch die separat untersuchten Wärmebrücken an den Anschlüssen der Fassade, vor allem an den Fenster, aber auch an Perimeter, Gebäudekanten und Anschluss zum Dachgeschoss mit betrachtet werden. Insbesondere die Einbindung der Fenster in die Fassade fällt im zweiten Bauabschnitt wärmebrückenärmer aus, was aufgrund der bedeutenden Längen der Fensteranschlüsse in der Energiebilanz Verbesserungen bedeutet (siehe Abb. 4.1-46). Die Einbausituation der Fenster ist deutlich besser, die Anschlüsse an Dach und Perimeter sowie die Außenecken der Fassade weisen etwas höhere Wärmeverluste auf. Insgesamt liegen die Wärmeverluste an den Wärmebrücken der 2. Fassadenkonstruktion um 6,5 W/K niedriger im Vergleich zu einer Ausführung mit der Konstruktion wie im ersten Bauabschnitt.

Kennung	Länge [m]	Anzahl (wenn <1)	Abmind. faktor [-]	Gesamtlänge [m]	1. BA		2. BA		Differenz [W/K]
					Ψ-Wert [W/(mK)]	Wärmeverlust [W/K]	Ψ-Wert [W/(mK)]	Wärmeverlust [W/K]	
Kellerdeckenaufleger	85,60	1	1,000	85,60	0,059	5,050	0,067	5,697	0,647
Außenecke Fassade	76,59	1	1,000	76,59	-0,079	-6,051	-0,077	-5,868	0,183
Fensteranschluss seitlich in Fassade	126,60	2	1,000	253,20	0,024	6,077	0,005	1,242	-4,835
Fensteranschluss unten in Fassade	90,00	1	1,000	90,00	0,062	5,580	0,044	3,961	-1,619
Fensteranschluss oben in Fassade	122,00	1	1,000	122,00	0,039	4,758	0,040	4,850	0,092
Fensteranschluss unten an Balkon	2,00	16	1,000	32,00	0,067	2,144	0,034	1,084	-1,060
Konsolen Vordach	2,00	1	1,000	2,00			0,029	0,058	0,058
DG Wand an OG	57,80	1	1,000	57,80	0,021	1,214	0,022	1,260	0,046
Summe						18,8		12,3	-6,5

Abb. 4.1-46: Zusammenstellung der Unterschiede bei den Wärmebrücken der Fassaden im 1. und 2. Bauabschnitt

Die U-Werte der Fassaden liegen mit 0,130 W/(m²K) im 2. Bauabschnitt und 0,131 W/(m²K) im ersten Bauabschnitt auf nahezu gleichem Niveau, so dass über die Fassadenfläche nur 0,8 W/K weniger an Wärme verloren gehen durch die Variante im 2. Bauabschnitt.

In der Summe schneidet die Lösung im zweiten Bauabschnitt 7,3 W/K günstiger ab, obwohl die Dämmstoffstärke um 2 cm reduziert wurde. Dies entspricht einer Verbesserung um 1,8 %.

4.2 Energetische Betrachtung weiterer Teile der Gebäudehülle

Neben der Außenfassade werden im Folgenden weitere Details der energetischen Sanierung an Außenbauteilen exemplarisch dargestellt.

4.2.1 Kellerdeckendämmung

Die Keller der Gebäude weisen mit einer Raumhöhe von ca. 2,30 m ausreichend Platz auf, um die Kellerdecken mit einer passivhaustauglichen Dämmstoffstärke zu versehen und gleichzeitig die freie Deckenhöhe nicht zu sehr einzuschränken. Zur Sanierung wird die Kellerdecke mit einem Schienensystem mit C-Profilen an punktförmigen Haltern abgehängt und aus Brandschutzgründen mit zwei Lagen Gipsfaser-Platten verkleidet (Gesamtdicke 3 cm). Der entstehende Hohlraum wird anschließend mit Zelluloseflocken ausgeblasen. Es ergibt sich eine Dämmdicke im Keller von mindestens 26 cm, so dass zusammen mit der Verkleidung eine freie Deckenhöhe von ca. 2 m verbleibt. Der ungestörte U-Wert liegt bei $0,134 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Allerdings muss der Einfluss der Abhängung berücksichtigt werden. Dazu wurde ein dreidimensionales Modell der Kellerdeckendämmung mit einem mittleren Rastermaß der Abhängung von 72 cm erstellt und in dem 3-D-Wärmebrückenprogramm Heat3 berechnet (Abb. 4.2-1). Es ergibt sich ein Wärmebrückenaufschlag von $0,004 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ durch die Abhängung.

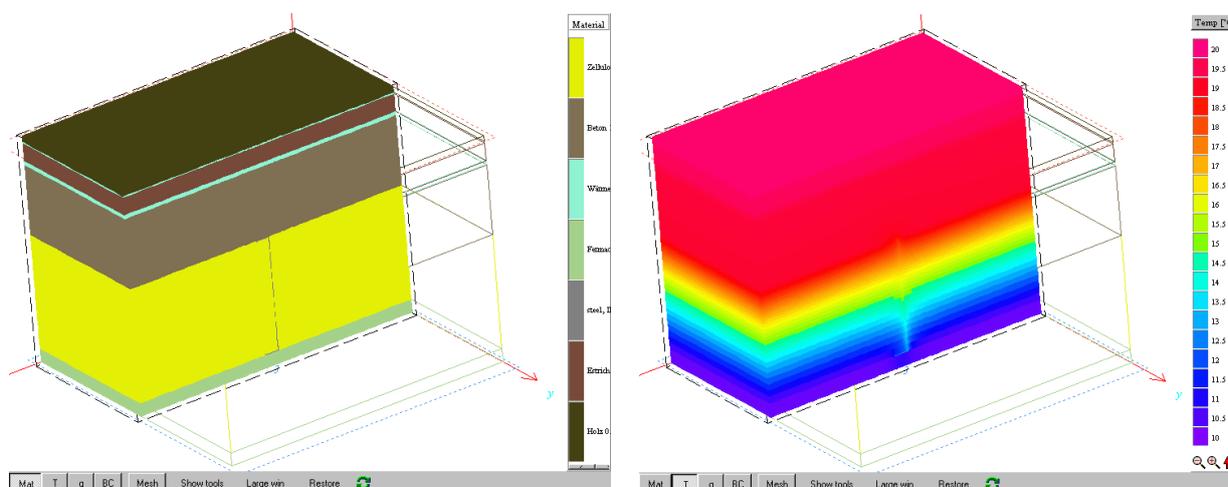


Abb. 4.2-1: Modell der Kellerdeckenabhängung und Isothermenbild

4.2.2 Dämmschürzen an Kellerinnenwänden

Bei energetischen Sanierungen, die einen niedrigen Heizwärmebedarf zum Ziel haben, stellen die Wärmebrücken am Kellerdeckenaufleger und bei den Kellerinnenwänden einen nennenswerten Wärmeverlust dar. Aus diesem Grund wird an den Kellerinnenwänden oft eine Begleitdämmung ab Unterkante der Kellerdeckendämmung angeordnet. Diese Dämmung hat dann neben der Reduktion der Wärmeverluste an den Keller auch die Aufgabe, die minimale Temperatur im Erdgeschoss in Ecken von aufgehenden Wänden zu reduzieren. In der Rotlintstraße ist durch die Kellerdeckendämmung von 26 cm bereits „eine kleine“ Begleitdämmung vorhanden und es ergeben sich in der Gebäudebilanz nur noch geringe Verbesserungen.

Abb. 4.2-2 zeigt den Verlauf des Wärmebrückenverlusts (Ψ -Wert) in Abhängigkeit von Höhe, Dicke und Material der Dämmschürzen. Es ist deutlich zu erkennen, dass die größte Verbesserung innerhalb der ersten 50 cm unterhalb der Kellerdeckendämmung auftritt. Danach gehen die Kurven fast in die Horizontale über, d. h. trotz zusätzlicher Dämmung wird der Ψ -Wert kaum noch verbessert. Einen gewissen Einfluss hat noch die Dämmstoffdicke, so dass durch den Übergang von 6 cm auf 14 cm Dämmung der Ψ -Wert von 0,14 W/(mK) auf 0,098 W/(mK) reduziert werden kann.

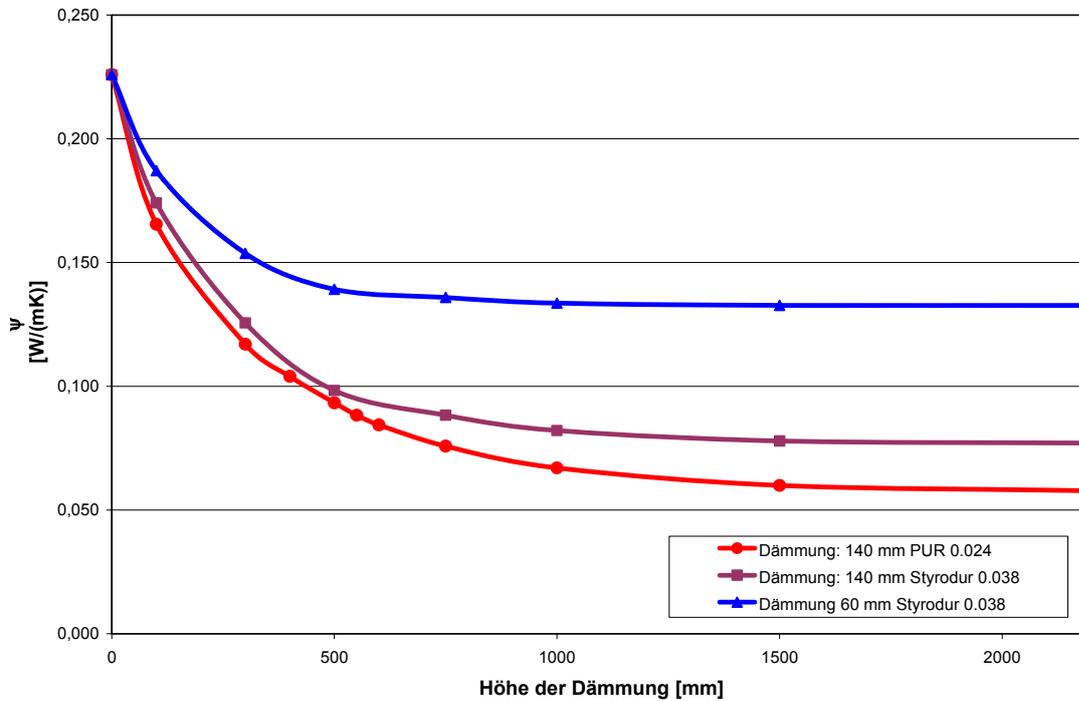


Abb. 4.2-2: Einfluss zusätzlicher Dämmschürzen an den Kellerinnenwänden auf den Wärmebrückenverlustkoeffizienten bei einer Kellerdeckendämmung von 26 cm

In der Gebäudebilanz sind die Auswirkungen von Dämmschürzen an den Kellerinnenwänden in diesem Projekt gering. So kann man durch das Anbringen von Dämmschürzen mit 50 cm Höhe und 14 cm Stärke mit einer Wärmeleitfähigkeit von 0,035 W/(mK) an den 36,5 cm und 24 cm dicken Kellerinnenwänden den Heizwärmebedarf des ersten Bauabschnittes von 15,00 kWh/(m²a) auf 14,80 kWh/(m²a) reduzieren, was einer Verbesserung um 1,3 % entspricht.

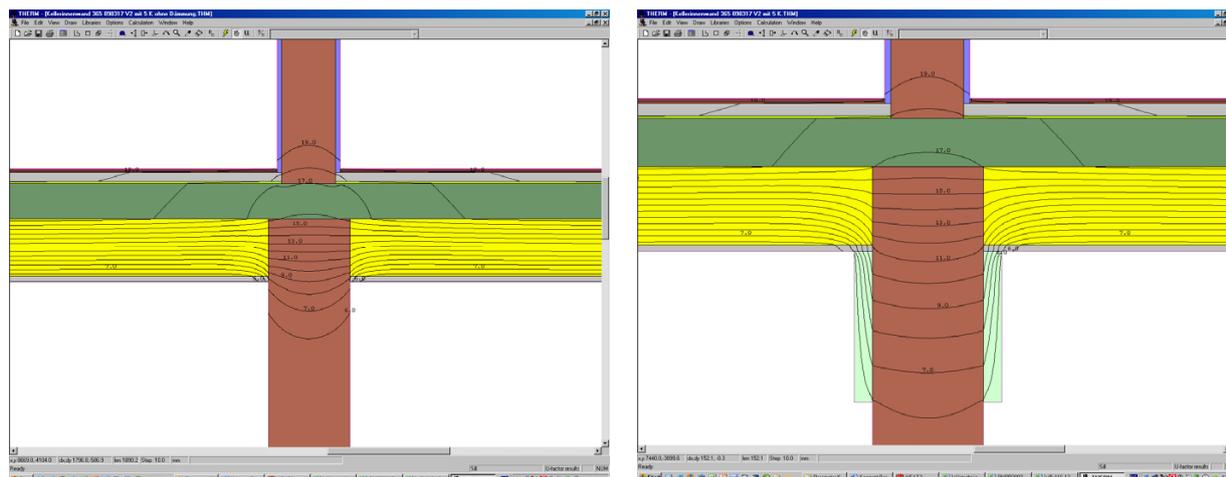


Abb. 4.2-3: Vergleich der Dämmung von Kellerinnenwänden mit und ohne Dämmschürzen

Ein weiterer wichtiger Aspekt der Dämmschürzen sind die minimalen Temperaturen im Erdgeschoss an Ecken von aufgehenden Innenwänden. Ohne die Dämmschürzen ergeben sich Temperaturen von 18,5 °C in der Ecke der Innenwand, mit Dämmschürzen 18,8 °C (bei 5 K Kellertemperatur). Die Auswirkungen auf die minimalen Temperaturen sind durch die ohnehin vorhandene 26 cm starke Kellerdeckendämmung somit gering (Abb. 4.2-3). Wegen der geringen energetischen und feuchtetechnischen Verbesserungen durch die Dämmschürzen wird auf diese in allen Bauabschnitten verzichtet.

4.2.3 Haustüren

Im Projekt werden Passivhaus-taugliche Holz-Haustüren mit einem Dämmkern aus Polyurethan eingesetzt. Laut Zertifikat des Passivhaus Instituts besitzt diese Tür einen U-Wert von 0,71 W/(m²K) im eingebauten Zustand, also inklusive der Einbauwärmebrücken an den seitlichen, oberen und unteren Anschlüssen [Variotec]. Der angegebene U-Wert gilt für einen Einbau in eine Holzbaufassade, einen Betonschalungsstein und ein Wärmedämmverbundsystem. Die Situation an der Schwelle ist mit den Angaben zum Zertifikat vergleichbar (Abb. 4.2-4).

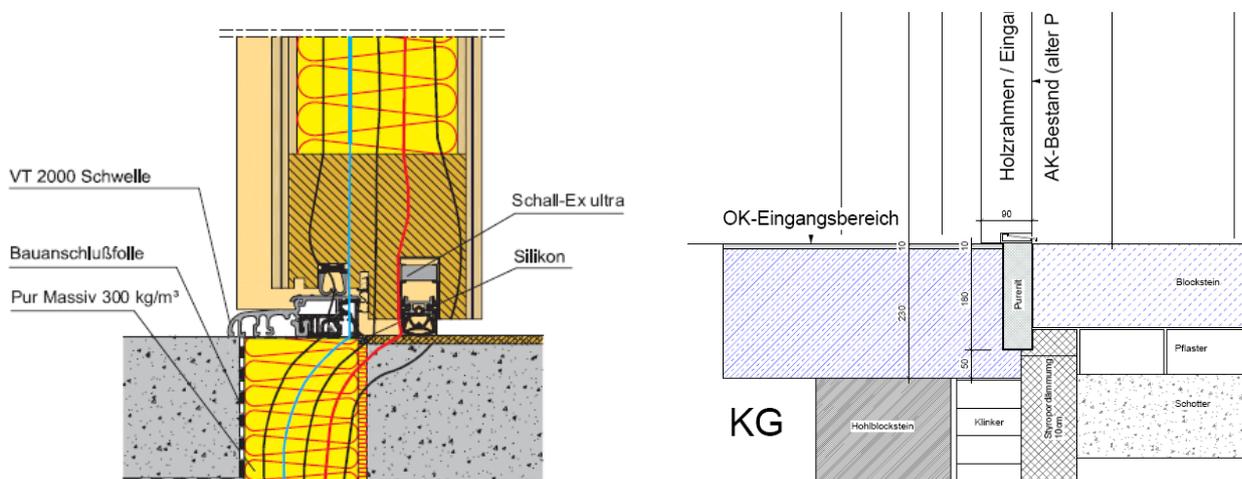
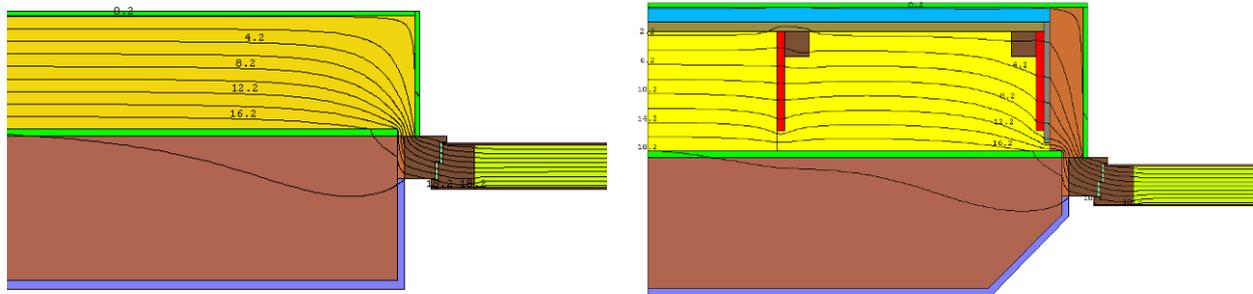


Abb. 4.2-4: Einbausituation der Haustür an der Schwelle: links Detail aus Zertifikat [Quelle: Variotec], rechts Detail aus der Rotlintstraße

Die seitliche und obere Einbausituation, wie sie in der Rotlintstraße vorliegt (vorgefertigte Fassade), ist formal nicht durch das Zertifikat abgedeckt. Da keine Informationen über den Anteil der Einbauwärmeverbrücken beschafft werden konnten, wurde eine Vergleichsrechnung zwischen seitlichem Anschluss wie in der Rotlintstraße ausgeführt und mit der Einbausituation bei einem Wärmedämmverbundsystem ausgeführt (Abb. 4.2-5).



Ψ -Wert = 0,044 W/(mK)

Ψ -Wert = 0,046 W/(mK)

Abb. 4.2-5: Einbausituation der Haustür am seitlichen Anschluss: links mit WDVS, rechts Detail aus der Rotlintstraße

Es zeigt sich, dass die beiden Wärmebrücken nahezu identische Wärmebrückenverlustkoeffizienten aufweisen, so dass für die Haustüren der Rotlintstraße ebenfalls der U_D -Wert von 0,71 W/(mK) (bzw. 0,78 W/(mK) mit Fenster) aus der Zertifizierung eingesetzt wird.

4.2.4 Wärmebrücken im Treppenhaus und am Kellerabgang

Die Situation im Treppenhaus und am Abgang zum Keller stellt eine sehr komplexe geometrische Anordnung dar. Neben den Flächen F 1 – F 6 (siehe Abb. 4.2-6 und Tabelle 4.2-1) treten hier eine Reihe von Wärmebrücken auf (Abb. 4.2-7 und Tabelle 4.2-2). Nicht alle Details können normalerweise exakt berechnet werden, da der Aufwand selten in einem entsprechenden Verhältnis zum ihrem Anteil an den Energieverlusten steht. An dieser Stelle sollen zur Dokumentation jedoch alle Details bilanziert werden, um den Einfluss quantifizieren zu können. Die Flächen F1-6, die U-Werte sowie der mit dem Temperaturgewichtungsfaktor f_t ² bewertete Wärmeverlust H sind in Tabelle 4.2-1 dargestellt. Die Situation an der Außentür ist hier nicht aufgeführt, da diese an anderer Stelle (siehe Kapitel 4.2.3) berücksichtigt wurde.

² Der Temperaturgewichtungsfaktor f_t wird im Blatt „Erdreich“ des PHPP berechnet und wird auf alle Wärmeverluste gegen unbeheizten Keller angewendet. Er liegt bei den drei Bauabschnitten zwischen 0,555 und 0,562

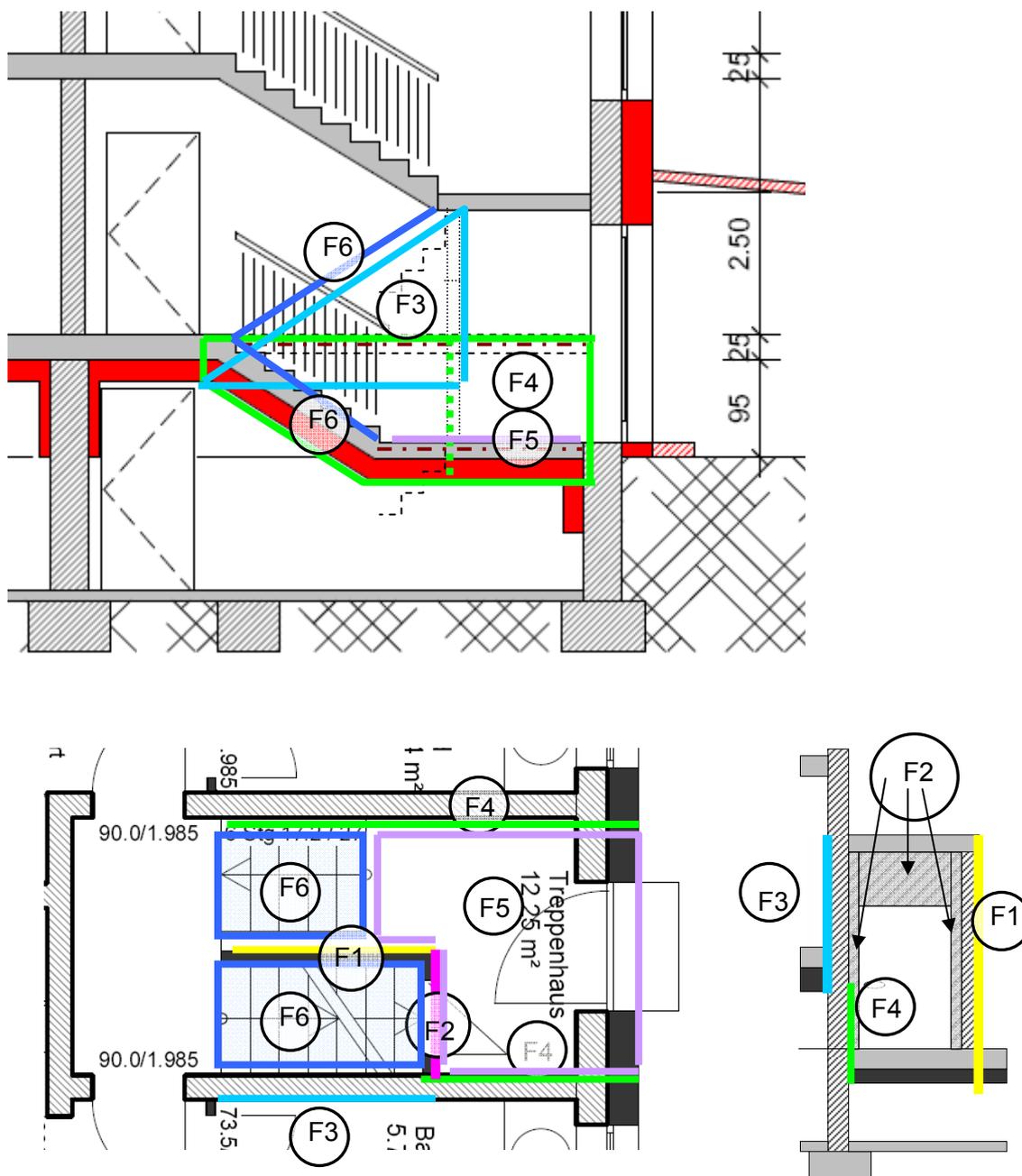


Abb. 4.2-6: Flächen an Treppenhaus und Kellerabgang

Tabelle 4.2-1: Übersicht der Flächen, U-Werte und Wärmeverluste je Treppenhaus

F	Bezeichnung	Fläche [m ²]	U-Wert [W/(m ² K)]	H _f gew. [W/K]
1	Treppenhauswand zum Kellerabgang	2,48	0,275	0,382
2	Wand um die Kellertür	1,08	0,443	0,268
3	Wand linke Wohnung zum Kellerabgang	1,49	0,399	0,333
4	Treppenhaus an Keller	3,36	0,399	0,751
5	Treppenhauspodest	5,69	0,306	0,975
6	Treppe an Keller	4,69	0,275	0,722
-	Kellertür	1,96	1,06	1,163
<i>Summe</i>		20,75		4,594

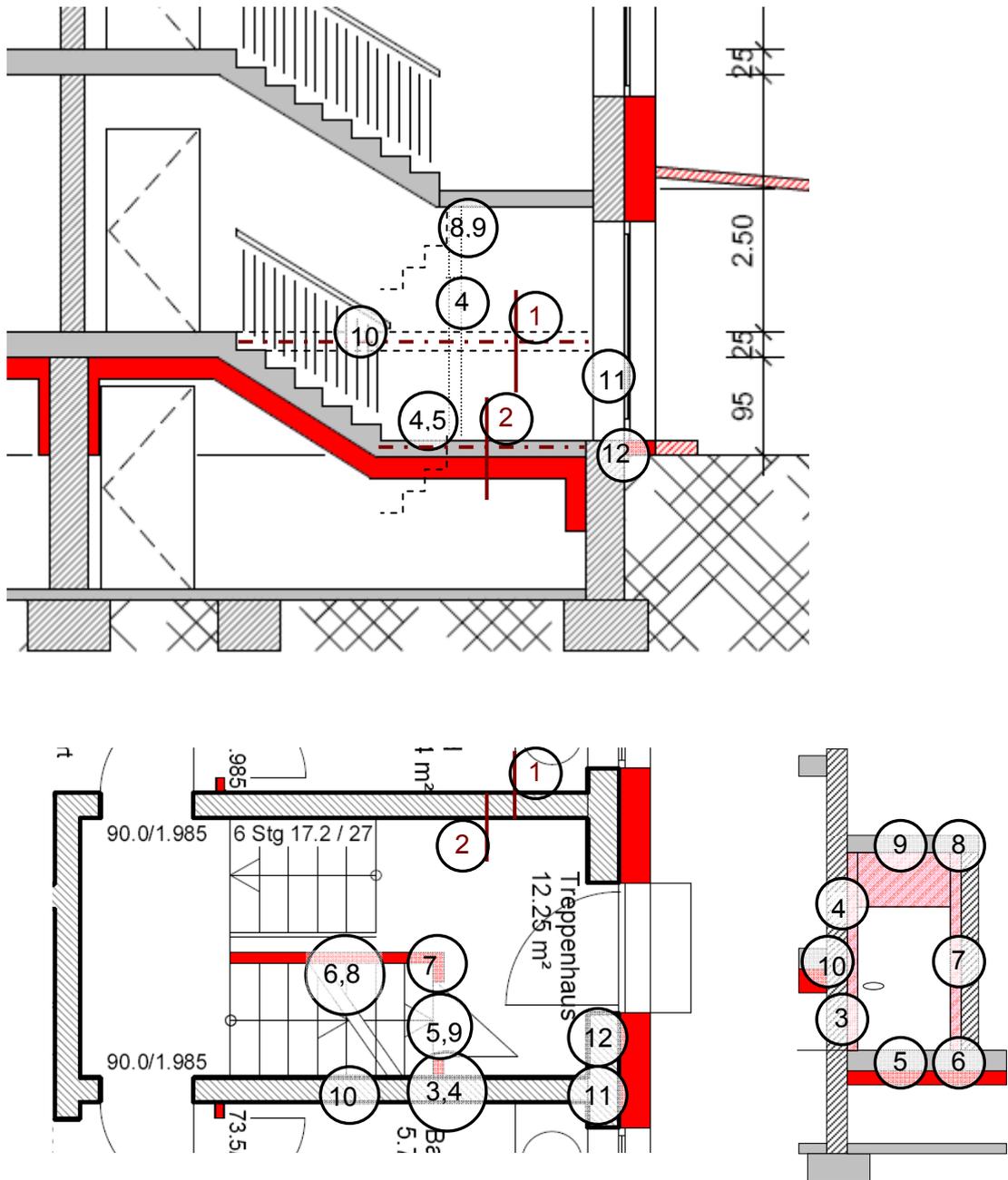


Abb. 4.2-7: Wärmebrücken an Treppenhaus und Kellerabgang

Tabelle 4.2-2: Länge, Ψ -Werte und f_t -gewichteter Wärmeverlust (H) durch Wärmebrücken im Treppenhaus am Kellerabgang (für den ersten Bauabschnitt)

Nr.	Schnitt- richtung	Beschreibung des Details / Anschlusses	Länge je Treppenhaus [m]	Ψ -Wert [W/(mK)]	H je Treppenhaus
					[W/K]
1	Vertikal	Treppenhauswand an Kellerdecke (linke und rechte Seitenwände des	6,2	0,107	0,372
2	Vertikal	Treppenhauspodest und Treppe an Treppenhauswand unten	6,3	0,176	0,621
3	Horizontal	Kellertür an Treppenhauswand zum kalten Keller (linke Seite Kellertür)	0,95	0,167	0,089
4	Horizontal	Kellertür an Treppenhauswand zur EG Wohnung (linke Seite Kellertür)	1,25	0,298	0,209
5	Vertikal	Treppenpodest an Kellerabgang im Bereich der Kellertür unten	0,8	0,576	0,258
6	Vertikal	Seitenwand Treppenabgang (zum Keller) an Treppenpodest	2,4	0,111	0,149
7	Horizontal	Anschluss Kellertür an seitliche (rechte) Wand des Kellerabgangs	2,2	0,361	0,445
8	Vertikal	Seitenwand Treppenabgang (zum Keller) an Treppe zum OG	2,3	0,015	0,019
9	Vertikal	Treppe zum OG an Bereich über Kellertür	1,25	0,151	0,106
10	Vertikal	Kellerdecke im Bereich des Kellerabgangs (Wohnung gegen Keller)	2,2	-0,013	-0,016
11	Horizontal	Treppenhauswand von Treppenpodest bis zur Höhe der Kellerdecke an Außenwand	0,95	0,034	0,032
12	Vertikal	Treppenpodest an Außenwand (links und rechts neben Haustür)	1,25	0,116	0,145
Summe			28,05		2,43
Mittelwert, längengewichtet				0,150	

Je Treppenhaus ergeben sich Wärme abgebende Flächen zwischen Treppenhaus, Wohnungen und Keller sowie Außenwand von 20,75 m², deren mittlerer U-Wert bei 0,395 W/(m²K) liegt. Die Länge der Wärmebrücken summiert sich auf 28,05 m. Bei Wärmeverlusten von 2,43 W/K je Treppenhaus ergibt sich ein Wärmebrückenaufschlag (vergleichbar dem ΔU_{WB} nach EnEV) von 0,117 W/(m²K), was einem Aufschlag von 53 % entspricht.

4.2.5 Einbindung der Aufzüge

Die Gebäude des 2. und 3. Bauabschnitts werden nach der Sanierung 5 bzw. 6 Stockwerke besitzen. Aus diesem Grund suchte das Planungsteam nach Möglichkeiten, Aufzüge in oder an dem Gebäude anzuordnen, um den Mietern einen leichteren Zugang zu ihren Wohnungen zu ermöglichen. Die ursprüngliche Überlegung, die vier Aufzüge (je einer an jedem Treppenhaus) thermisch getrennt vor der Gebäudehülle zu platzieren, hätte zusätzliche Änderungen im Treppenhaus erfordert, damit ein Anschluss des Aufzugsausgangs an das Treppenpodest vor den Wohnungen möglich ist. Diese Lösung wäre jedoch zu aufwändig und zu teuer geworden. Aus diesem Grund wurde eine Lösung gesucht, die bereits in den Bestandsgebäuden an der Treppenhausinnenwand vorhandenen Lastenaufzüge in Personenaufzüge umzubauen. Damit eine ausreichende Grundfläche erreicht wird, wurden die alten Aufzugsschächte abgebrochen und durch etwas vergrößerte Schächte (1,30 m x 1,05 m) ersetzt, in die ein leiser und energieeffizienter Aufzug eingebaut werden kann.

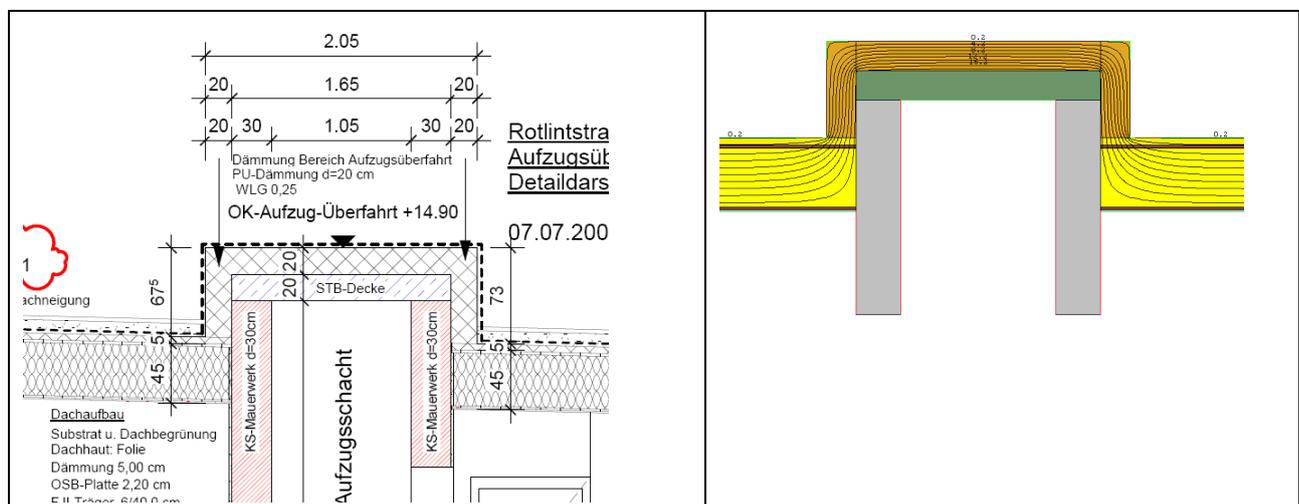


Abb. 4.2-8: Einbindung der Überfahrt des Aufzuges in die thermische Gebäudehülle

Energetisch stellte diese Lösung Herausforderungen an die Anbindung von Über- und Unterfahrt des Aufzuges in die thermische Gebäudehülle sowie die Luftdichtheit des Aufzugsschachtes besonders zum Keller hin. Die Abb. 4.2-8 und Abb. 4.2-9 zeigen Schnitte durch das Gebäude im Bereich des Aufzuges. Man erkennt, dass die Überfahrt gut gedämmt als Höcker aus der Dachdämmung herausragt. Schwieriger ist die Anbindung der Unterfahrt, da der Fahrstuhlschacht innerhalb der thermischen Hülle liegt, diese aber nach unten deutlich durchstößt und seine Lasten in ein verstärktes Fundament einleiten muss. Außerdem binden Kellerwände in den Fahrstuhlschacht im Keller ein, die aus statischen Gründen mit diesem verbunden werden mussten.

Zur Entschärfung der Wärmebrücken im Bereich der Unterfahrt wurde ein Zwischenboden in ca. 1 m Höhe in den Schacht eingebaut und der gesamte darunter liegende Bereich mit einer Feuchte-unempfindlichen Perlite-Schüttung ausgefüllt. Die Wärmebrücken an den einbindenden Kellerwänden konnten jedoch nicht weiter entschärft werden.

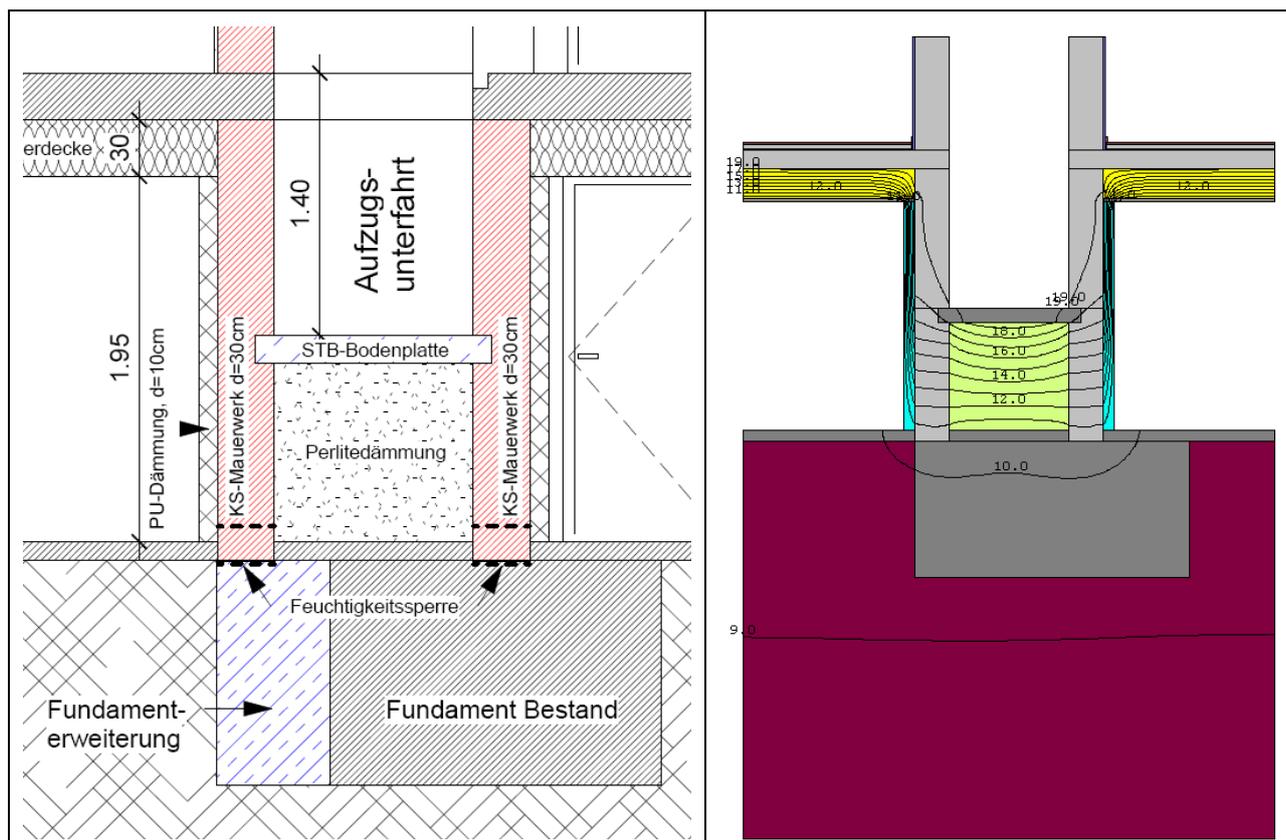


Abb. 4.2-9: Einbindung der Unterfahrt der Aufzuges in die thermische Gebäudehülle

Bei der Bilanzierung wurden Über- und Unterfahrt komplett als Wärmebrücke des Daches bzw. der Kellerdecke behandelt, so dass sich hier sehr hohe Ψ -Werte von 0,2 W/(mK) (Überfahrt) bzw. 1,02 W/(mK) (Unterfahrt) ergaben, die aber nur mit vergleichsweise geringen Längen in die Berechnung einfließen.

4.2.6 Punktförmige Wärmebrücken

Bei dem Projekt wurden zwei Typen von Halteankern eingesetzt, die die thermische Hülle komplett durchstoßen. Das sind einerseits die Balkonhalterungen, an denen die thermisch getrennt auf eigenen Fundamenten vor die Fassade gestellten Balkone mit dem Gebäude verbunden werden, andererseits Gerüstanker, die in die Fassade integriert werden, um für zukünftige Gerüstbauten Haltepunkte an der Fassade zu besitzen.

Balkonhalterungen

Die Balkonhalterungen wurden bereits bei früheren Projekten der ABG zusammen mit einem Wärmedämmverbundsystem eingesetzt – hier musste die Lösung für die Fassaden der Rotlintstraße angepasst werden. Die Haltekonsole besteht aus Edelstahl und wird durch lange Gewindestangen auf der Wandinnenseite verankert. Innerhalb der Dämmung verjüngt sich die Konstruktion und durchstößt nur mit einer Halfenschiene die Dämmebene komplett (Abb. 4.2-10). Für jede Balkonanlage sind vier dieser Halterungen erforderlich.

Die abgeschrägte Konsole innerhalb der Dämmung wurde durch mehrere Rechtecke dreidimensional modelliert. Es ergibt sich ein χ -Wert von 0,059 W/K im ersten Bauabschnitt mit 36 cm Fassadenstärke und 0,064 W/K je Halterung im zweiten Bauabschnitt mit 34 cm Fassadenstärke. In [Kaufmann 2009] ergab sich für eine vergleichbare Halterung in einem

Wärmedämmverbundsystem mit 26 cm Stärke ein χ -Wert von 0,09 W/K, die größere Fassadendicke ist an dieser Stelle somit energetisch von Vorteil.

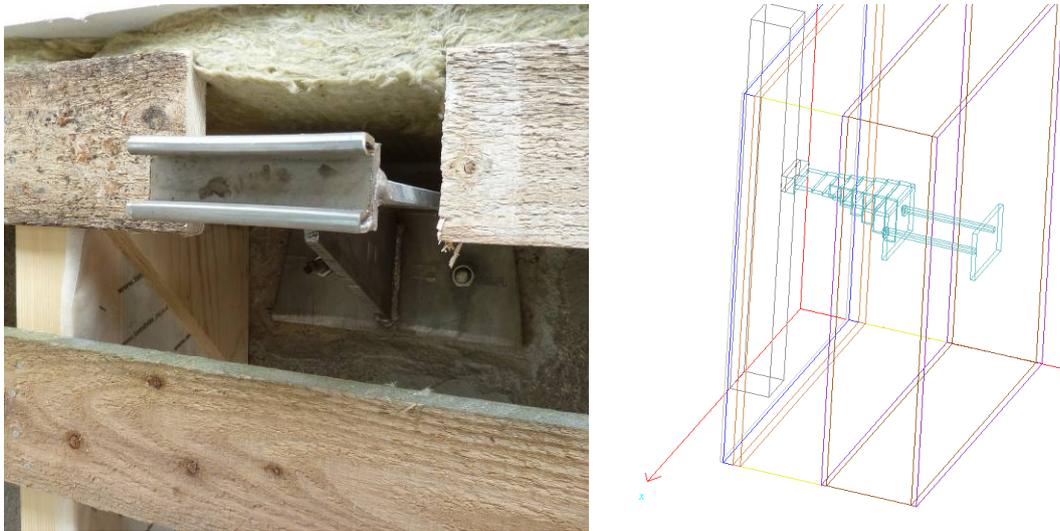


Abb. 4.2-10: Balkonhalter: links Foto vor Verschließen der Fassade, rechts 3D-Modell

Gerüstanker

Die Gerüstanker werden auf die Bestandswand aufgedübelt, wobei zusätzlich 3 cm starke Holzklötze für eine gewisse Entkopplung zwischen Metall und Wand sorgen (Abb. 4.2-11). Die Halter bestehen aus 5 mm dickem Baustahl, außen befindet sich ein M6 Gewindebolzen, der die Dämmebene durchstößt. Im ersten Bauabschnitt wurden 32 dieser Anker montiert, im zweiten und dritten jeweils 38. Es ergibt sich ein χ -Wert von 0,015 W/K je Anker, wobei sich hier kein nennenswerter Unterschied zwischen den beiden Fassadenstärken ergab.

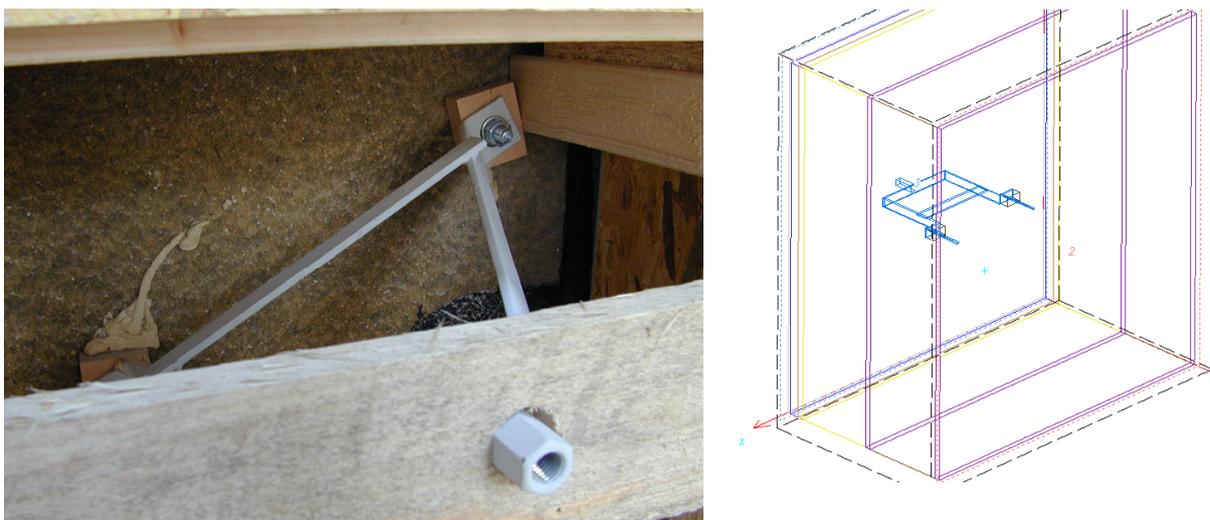


Abb. 4.2-11: Gerüstanker: links Foto des Gerüstankers (vorne Brett der Sparschalung), rechts 3D-Modell

4.3 Luftdichtheitskonzept

Der Passivhaus-Standard fordert eine sehr luftdichte Gebäudehülle, der n50-Wert darf maximal bei 0,6 1/h liegen, um die Energieverluste über Fugen zu minimieren und die Effizienz der Lüftungsanlagen zu gewährleisten. Um dies im Gebäudebestand zu erreichen, ist ein durchgängiges Luftdichtheitskonzept erforderlich (siehe auch Abb. 4.3-1). Dieses sieht für die Gebäude der Rotlintstraße 116-128 vor, dass die luftdichte Hülle von unten beginnend durch folgende Bauteile hergestellt wird:

- Kellerdecke sowie Kellerabgangstür bzw. Innenputz/Fliesen der Treppenhauswände
- Innenputz der Wände sowie Abdichtung der Fenster/Hauseingangstür an den Innenputz (EG bis oberstes Bestandsgeschoss)
- Geschossdecken des Bestandsgebäudes
- Abdichtung der Mauerkrone an der demontierten Fußpfette mit einer Bitumenbahn an die ehemalige oberste Geschossdecke (Estrich wird entfernt)
- Luftdichtungsfolie der Holzkonstruktion im Dachgeschoss umlaufend

Dabei wird unterstellt, dass die Beton-Geschossdecken selbst luftdicht sind und der Innenputz lückenlos an Decke und Fußboden angeschlossen wird. Da der alte Estrich auf den Betondecken entfernt und erneuert wird (ab Haus Nr. 118), um schalltechnisch saubere Anschlüsse und eine gute Trittschallentkopplung zu erreichen, kann auch die kritische Stelle in diesem Bereich vermieden werden.

Aufmerksamkeit muss besonders der Abdichtung der Fenster und der Haustüren gewidmet werden. Die neuen Passivhausfenster werden außen vor das Bestandsmauerwerk über einem Setzholz montiert. Die Bestandsfenster werden nach innen abgebrochen, so dass in diesem Bereich unverputztes Rohmauerwerk zu Tage tritt. Der alte Außenanschlag der Fenster bleibt bestehen. Da der Außenputz in diesem Bereich in einem relativ guten Zustand war, wird er dazu benutzt, die außen angeschlagenen Fenster mit einem Butylklebeband und zusätzlichem Butylkleber auf den Außenputz anzudichten. Die Verbindung zwischen dem Innenputz als luftdichter Ebene und dem Außenputz um die Fenster herum wird mit Gipsputz hergestellt, mit dem die alte Fensterlaibung gefüllt wird, bevor die Ansichtsseite mit Gipskarton verkleidet wird.

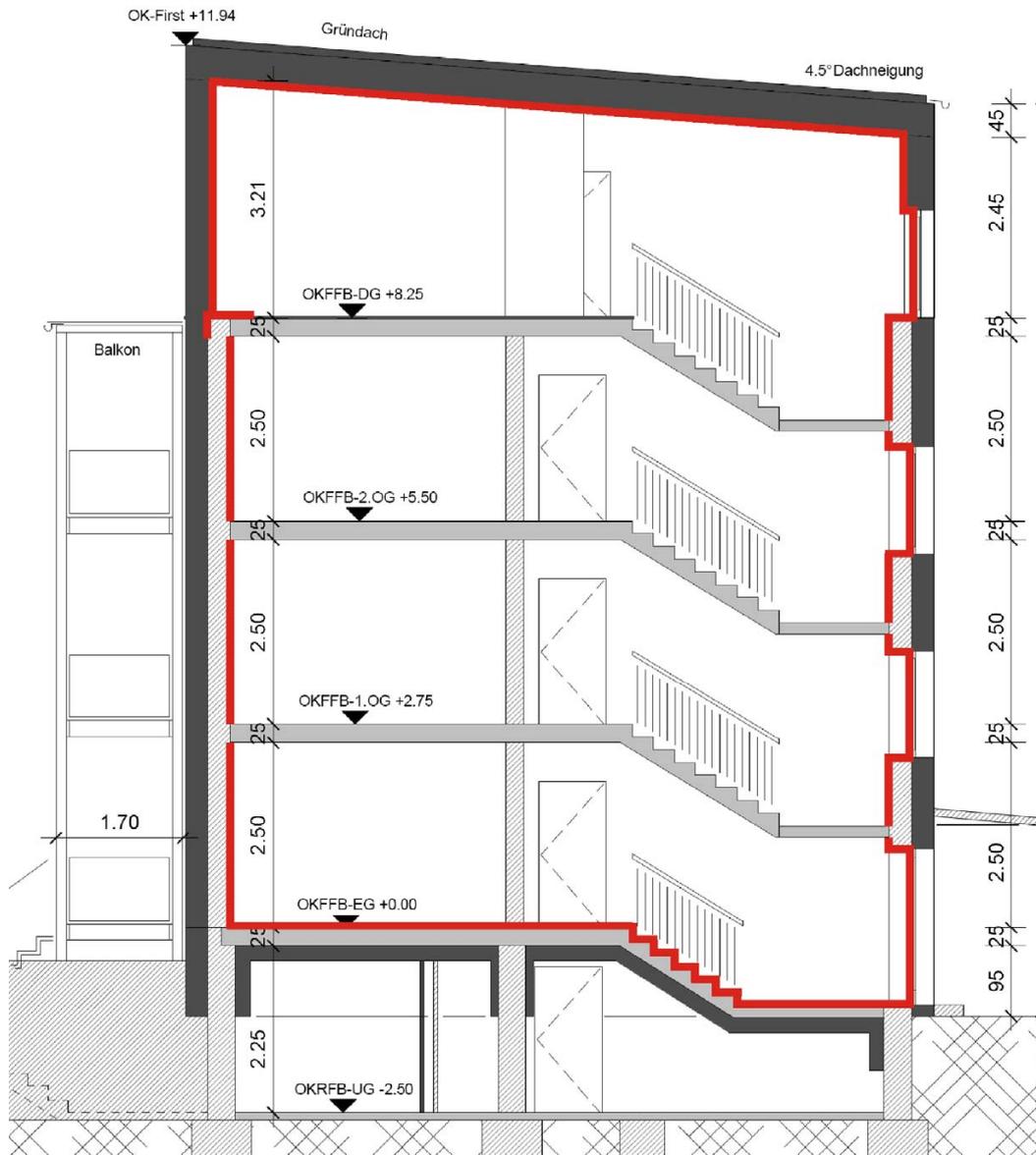


Abb. 4.3-1: Lage der luftdichten Ebene am Beispiel des Gebäudes Rotlintstraße 116

Eine Schwierigkeit im Luftdichtheitskonzept des 2. und 3. Bauabschnitts stellte der Aufzugsschacht dar, da er die Kellerdecke durchstößt. Aufgrund der beengten Verhältnisse konnte das Mauerwerk innen nicht verputzt werden, stattdessen wurde es im Keller außen verputzt. Somit musste die luftdichte Ebene von der Innenseite auf die Außenseite verspringen. Zusätzlich durchbricht die Rauchüberwachung (Lift-Smoke-Controll) im Keller den Aufzugsschacht. Auch dieser muss sorgfältig abgedichtet werden, was sich auch bei den ersten Blower-Door-Messungen zeigte und nachgebessert wurde.

Damit die notwendige Fallrohrentlüftung nicht die luftdichte Hülle durchstößt und damit den n50-Wert des Gebäudes verschlechtert, werden wartungsarme Passivhausgeeignete Fallrohrentlüfter in den obersten Wohnungen der Bestands-geschosse eingesetzt. Abb. 4.3-2 zeigt einen solchen Entlüfter vor Montage der Revisionsklappe.



Abb. 4.3-2: Innen liegender automatischer Fallrohrentlüfter in der Wohnung am oberen Ende des Fallrohrs

4.3.1 Ergebnis der Luftdichtigkeitsmessungen nach Sanierung

Die Gebäude wurden nach Abschluss der Sanierung Luftdichtigkeits-tests gemäß EN 13829 Verfahren A (Messung im Nutzungszustand) unterzogen, die vom Büro n50 in Kassel durchgeführt wurden.

Bei diesen Messungen wurden die Wanddurchbrüche für die Außen- und Fortluft der Lüftungsanlagen bzw. die Außen- und Fortluftöffnungen im Lüftungsgerät abgeklebt. Weiterhin wurden die Siphons der Sanitärinstallationen sowie des Kondenswasserablaufes der Lüftungsgeräte verschlossen.

Im Haus 116 und 122/124 wurden zwei Messungen nach der Sanierung, in den anderen Häusern eine Messung durchgeführt. Dabei waren fast alle Einbauten und Anschlüsse bereits fertig gestellt, die Haustür bzw. die Kellertür oder einige Laibungsverkleidungen im Treppenhaus fehlten teilweise jedoch noch (siehe Angaben in der Tabelle 4.3-1). Während der Messung war die Luftfördereinrichtung an Stelle der Haustür oder der Kellertür eingebaut. Die gemessenen n50-Werte sind in Tabelle 4.3-1 dokumentiert.

Bei der Leckageortung wurden einige kleinere Schwachstellen entdeckt, die bei allen Häusern immer wieder beobachtet werden konnten (Abb. 4.3-3) und hier exemplarisch am Haus 116 aufgezeigt werden. Dazu gehörten die Mittelpfosten der Fenstertüren, bei denen die Fugen teilweise nicht ganz dicht ausgeführt waren, Steckdosen und Schalter in der Außenwand, bei denen eine leichte Luftbewegung feststellbar war sowie einige Fensteranschlüsse (besonders in den Ecken).

Als größere Schwachstellen wurden die Dachausstiegsluken, bei denen entweder die umlaufende Abdichtung komplett fehlte (Haus-Nr. 120) oder die Dichtbänder noch nicht eingebaut waren (Haus-Nr. 116, erste Messung). Im Fall des Ausstiegs in der Nr. 120 strömten über dieses Detail allein über 100 m³/h an Luft nach. Diese Stellen mussten nachgearbeitet werden. Weiterhin wurde bei einer Fenstertür in 116 2. OG rechts ein falsch eingestellter Beschlag festgestellt und von der Fensterfirma sofort behoben. Besonders im Bereich der Unterfahrt der Aufzüge waren anfangs Undichtigkeiten im Schachtmauerwerk sowie unverschlossene Bohrungen vorhanden, die nachgearbeitet werden mussten.

Tabelle 4.3-1: Ergebnisse der Blower-Door-Messungen (Messungen durch Büro n50)

Gebäude	Volumen	n ₅₀ -Wert (Verfahren A)	Anmerkungen
Rotlintstraße 116 (1. Messung 30.06.09)	1285 m ³	0,28 1/h +/- 8%	Haustür und Kellertür fehlten, Blower-Door in Haustür eingebaut, Kellertür abgeklebt
Rotlintstraße 116 (Schlussmessung 29.09.09)	1292 m ³	0,27 1/h +/- 7%	Kellertür fehlte, Blowerdoor in Kellerabgang eingebaut
Rotlintstraße 118 (29.09.2009)	1236 m ³	0,26 1/h +/- 6%	Kellertür fehlte, Blowerdoor in Kellerabgang eingebaut
Rotlintstraße 120 (29.09.2009)	1241 m ³	0,23 1/h +/- 6%	Kellertür fehlte, Blowerdoor in Kellerabgang eingebaut, Dachausstieg abgeklebt
Rotlintstraße 122 (18.03.2010)	1458 m ³	0,47 1/h +/- 5 %	Zwischenmessung, Kellertür, Briefkasten anl Dachausstieg abgeklebt, BD in alte Haustür eingebaut
Rotlintstraße 124 (18.03.2010)	1481 m ³	0,45 1/h +/- 5 %	Zwischenmessung, Kellertür u. Briefkasten anl. abgeklebt, Dachausstieg gesichert, BD in alte Haustür eingebaut
Rotlintstraße 122 (01.06.2010)	1451 m ³	0,37 1/h +/- 6 %	Abschlussmessung, Kellertür, BD in Haustür eingebaut
Rotlintstraße 124 (01.06.2010)	1486 m ³	0,30 1/h +/- 6 %	Abschlussmessung, Kellertür, BD in Haustür eingebaut
Rotlintstraße 126			zum Zeitpunkt der Berichtserstellung noch nicht erfolgt
Rotlintstraße 128			zum Zeitpunkt der Berichtserstellung noch nicht erfolgt
Mittelwert Schlussmessungen	1341 m ³	0,29 1/h	

Insgesamt ergibt sich für die sanierten Gebäude ein sehr geringer n₅₀-Wert von im Mittel 0,29 1/h (ohne 3. Bauabschnitt der zum Zeitpunkt der Berichtserstellung noch nicht fertig gestellt war). Somit kann das Luftdichtigkeitskonzept der Sanierung und dessen Umsetzung als gelungen bezeichnet werden.

In den Energiebilanzberechnungen im PHPP werden für die bereits fertig gestellten Bauabschnitte die Messwerte bei der Undichtigkeit der Gebäudehülle eingesetzt, für den dritten Bauabschnitt wird der Mittelwert der Gebäude Rotlintstraße 122-124 verwendet, die ebenfalls je einen Aufzug besitzen.

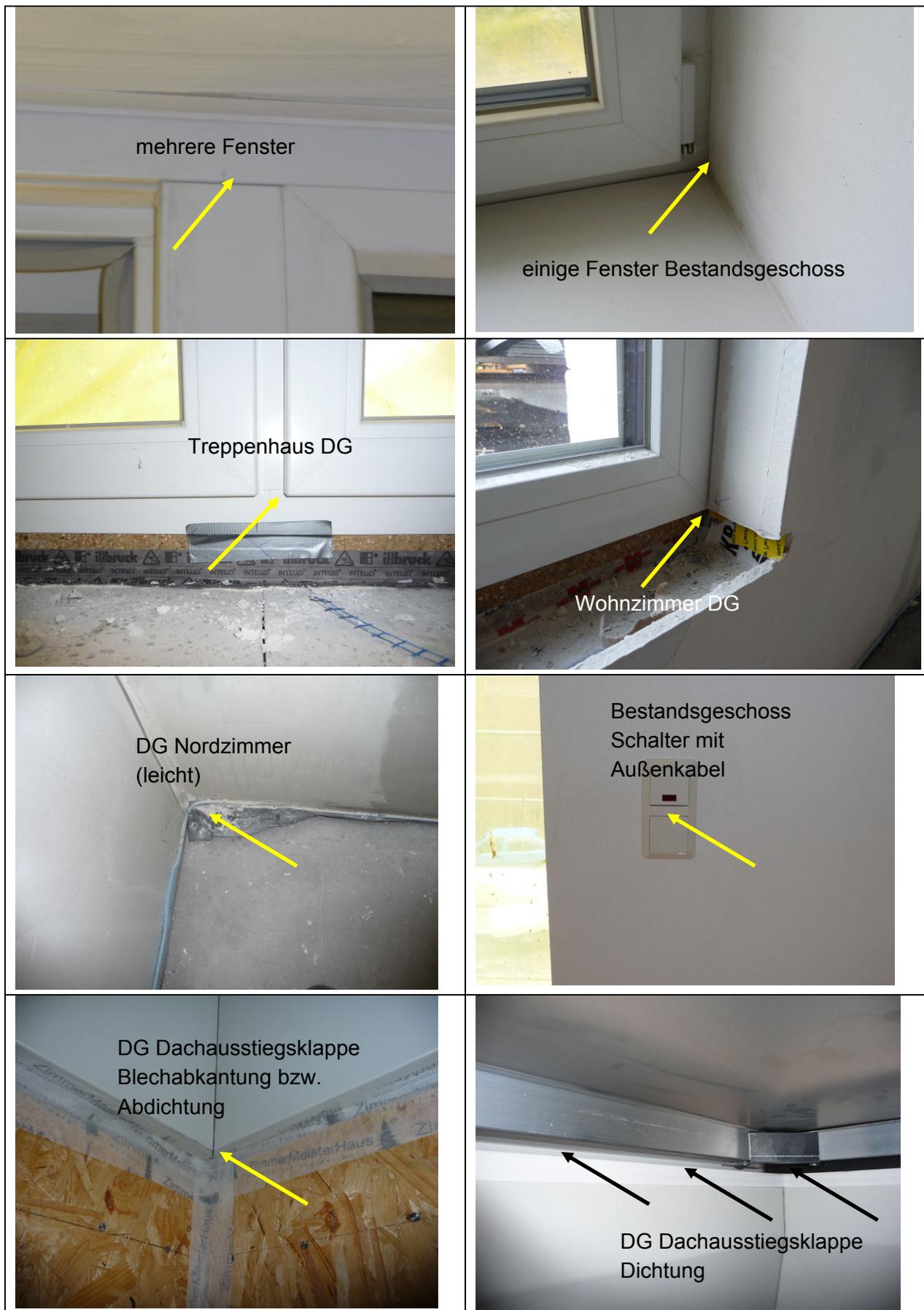


Abb. 4.3-3: Details der verbliebenen Schwachstellen nach Sanierung

4.4 Lüftungskonzept

Bei den Gebäuden Rotlintstraße 116-128 werden nicht nur die einzelnen Wohnungen über mechanische Lüftungsanlagen mit frischer Außenluft versorgt, sondern auch die Treppenhäuser und die Kellerräume. Im Folgenden werden die verschiedenen Konzepte dokumentiert.

4.4.1 Lüftung der Wohnungen

Die Gebäude erhalten wohnungsweise Lüftungsgeräte mit mechanischer Zu- und Abluft und Wärmerückgewinnung. Eingesetzt wird das Gerät KWL 90 SC der Firma Vallox, das hinsichtlich des Stromverbrauchs kürzlich optimiert wurde. Die Frischluftansaugung erfolgt über ein ca. 2,50 m langes Rohr im Trennwandbereich zwischen Küche und Bad direkt von der Außenluft. Parallel verläuft die Fortluftleitung, die zusammen mit der Frischluftleitung in einem Kasten unter der Decke zusammen gedämmt sind. Die Verteilung der Zuluft erfolgt in den Bestandsgeschossen ausschließlich im abgehängten Deckenbereich im Flur, in dem auch die Schalldämpfer untergebracht sind.



Abb. 4.4-1: Ansicht des geöffneten Lüftungsgerätes im Badezimmer (links) und des Lüftungswahlschalters sowie des Temperaturreglers im Wohnzimmer (rechts)

Das eingesetzte Lüftungsgerät besitzt ein Bedienteil mit einem 4-Stufen-Schalter, über den die Mieter die gewünschte Lüftungsstufe einstellen können. Eine vollständige Abschaltung der Lüftungsanlage ist nur über die Sicherung in der Elektroverteilung möglich. Der Volumenstrom in den einzelnen Stufen kann im Lüftungsgerät über Potentiometer voreingestellt werden. Diese Einstellmöglichkeiten sollen die individuelle Anpassung der Volumenströme auch bei den kleinen Wohneinheiten ermöglichen. Die vier Stufen wurden so definiert, dass auf Stufe 1 ein Mindestluftwechsel von 0,2 1/h erreicht wird, der ganzjährig die Untergrenze beim Luftaustausch darstellt. Stufe 2 bildet die Normallüftung, die auf 0,35-fachen Luftwechsel ausgelegt ist. Stufe 3 mit ca. 0,5-fachem Luftwechsel soll die Beheizung der Wohnungen auch an den Tagen mit Auslegungsheizlast gewährleisten, Stufe 4 erhöht

den Volumenstrom um 20 % auf 0,6 1/h, was einer Partylüftung entspricht [Petrausch 2009-1]. Zusätzlich zur Zuluftheizung gibt es in den Badezimmern je Wohnung und einzelnen Räumen im Dachgeschoss noch Heizkörper. Es wird unterstellt, dass die Stufe 2 im Winter als Standardeinstellung gewählt ist und Stufe 3 nur an den Tagen mit der höchsten Heizlast eingestellt wird. In der PHPP-Berechnung wurde aus diesem Grund mit 83 % Stufe 2 und 17 % Stufe 3 (entsprechend 34 Tagen der Heizperiode) gerechnet. Im Mittel über alle Wohnungen ergibt sich ein mittlerer Luftwechsel in der Heizzeit von 0,37 1/h.

Werden Auslegung und Bilanzierung der Lüftungsanlagen über das gesamte Gebäude durchgeführt, können sich nennenswerte Abweichungen ergeben, da in den Wohnungen unter Umständen andere Volumenströme erforderlich sind oder eingestellt werden. In der Bilanzierung der Lüftungsanlagen wurde das PHPP dahingehend erweitert, dass für jeden Bauabschnitt für typische Wohnungsgrößen ein eigenes Berechnungsblatt angelegt wurde, die Anlage für diese Wohnungsgröße berechnet und anschließend ein mittlerer effektiver Wärmebereitstellungsgrad berechnet wird. Weiterhin wurde das Feld „Standardlüftung“ im Lüftungsblatt des PHPP so benutzt, dass sich die oben genannten Volumenströme ergeben.

Tabelle 4.4-1: Auslegung der Lüftungsanlagen für die unterschiedlichen Wohnungsgrößen (WBG: Wärmebereitstellungsgrad nach PHPP)

1. Bauabschnitt Rotlintstraße 116-120

Typ	Wohnungen	V [m ³]	nL [1/h]	WBG
WE klein 57 m ²	9	143	0,37	80,0%
WE normal 65 m ²	9	159	0,38	80,5%
WE groß 90 m ²	3	225	0,38	82,7%
Treppenhäuser	3	123	0,10	74,2%
eta WRG eff				80,6%
nL Mittel [1/h]				0,34

2. Bauabschnitt Rotlintstraße 122-124

Typ	Wohnungen	V [m ³]	nL [1/h]	WBG
WE klein 49,8 m ²	8	129	0,37	79,7%
WE normal 59,9 m ²	8	154	0,37	80,4%
WE groß 83,5 m ²	2	214	0,37	82,6%
Treppenhäuser	2	173	0,10	74,7%
eta WRG eff				80,3%
nL Mittel [1/h]				0,35

3. Bauabschnitt Rotlintstraße 126-128

Typ	Wohnungen	V [m ³]	nL [1/h]	WBG
WE klein 55,6 m ²	5	139	0,37	79,9%
WE mittel 60 m ² Mittelwert	10	150	0,38	80,3%
WE größer 67 m ²	5	168	0,37	80,6%
WE groß 97 m ²	2	243	0,37	82,8%
Treppenhäuser	2	206	0,10	75,1%
eta WRG eff				80,5%
nL Mittel [1/h]				0,35

Für die Berechnung im PHPP stellt sich die Frage, welcher effektive Wärmebereitstellungsgrad (d. h. Anteil aus der Abluft zurück gewonnener Wärme inkl. Ventilatorabwärme und

Wärmeverluste des Gerätes [PHPP2007]) für diese Lüftungsgeräte anzusetzen ist, da keine Zertifizierung für dieses oder ein vergleichbares Gerät existiert. Das Vorgängergerät KWL 90d wurde im Rahmen des Projekts St. Jakob in Frankfurt einer Überprüfung unterzogen. Dabei ergab sich ein Wärmebereitstellungsgrad von 84 %. Das Nachfolgemodell KWL 90 SC ist sowohl bei den Ventilatoren als auch beim Wärmetauscher grundsätzlich mit dem Typ 90d identisch, so dass vom gleichen Wärmebereitstellungsgrad ausgegangen werden kann [Heinemann]. In Tabelle 4.4-1 sind die mittleren Wärmebereitstellungsgrade der einzelnen Bauabschnitte dokumentiert. Durch die Verluste in den Außen- und Fortluftkanälen reduziert sich der effektive Wärmebereitstellungsgrad (inklusive Treppenhäuser) auf 80,4 %.

Wärmeverluste der Außen- und Fortluftleitungen

Die Außen- und die Fortluftleitungen sind im Bereich zwischen Küche und Badzimmer in einem verkleideten Kasten unter der Decke verlegt (Abb. 4.4-2). Die Wickelfalzrohre sind in zwei Lagen von je 19 mm mit einer dampfdichten Kautschuk-Dämmung isoliert („Armaflex“). Zusätzlich wird der Kasten um die Lüftungskanäle (Innenabmessungen ca. 56 cm) mit Zelluloseflocken gefüllt, um den Dämmstandard zu erhöhen. Dabei ist jedoch zu beachten, dass durch die Verstärkung der Dämmung mit Zellulose der Taupunkt in der Zellulosedämmung liegen kann, die jedoch nicht dauerhaft durchfeuchtet werden darf. Aus diesem Grund ist eine Folie als Dampfsperre außen im Kasten erforderlich.

In Abb. 4.4-3 ist die Isothermendarstellung des Kastens um die Außen- und Fortluftkanäle dargestellt. Ausgegangen wurde hier von -10 °C Außentemperatur in den Kanälen. Es zeigt sich, dass insbesondere der Bereich zwischen den beiden Leitungen sehr stark abkühlt, da hier der Wärmenachfluss vom Raum durch die beiden Lüftungsleitungen stark reduziert ist. Es ergibt sich ein Ψ -Wert von $0,151\text{ W/(mK)}$ je Leitung, was einer Einzeldämmdicke von $13,5\text{ cm}$ mit $\lambda = 0,035\text{ W/(mK)}$ entspricht. Die Ψ -Werte Außen- und Fortluftleitungen in den PHPP-Berechnungen weichen leicht von diesem Wert ab, da die Übergangskoeffizienten in Abhängigkeit des Volumenstroms in den Kanälen variieren.

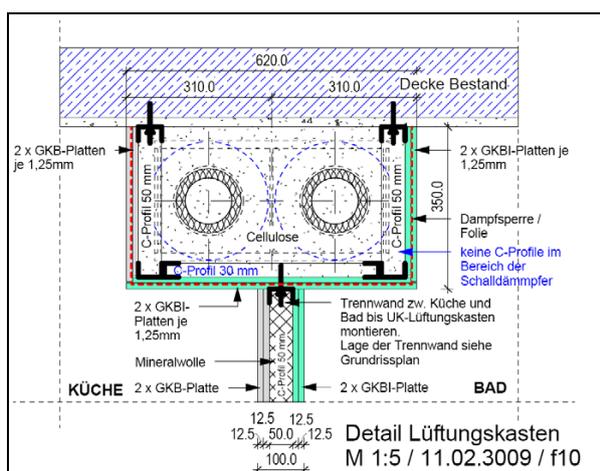


Abb. 4.4-2: Schnittzeichnung des Lüftungskastens

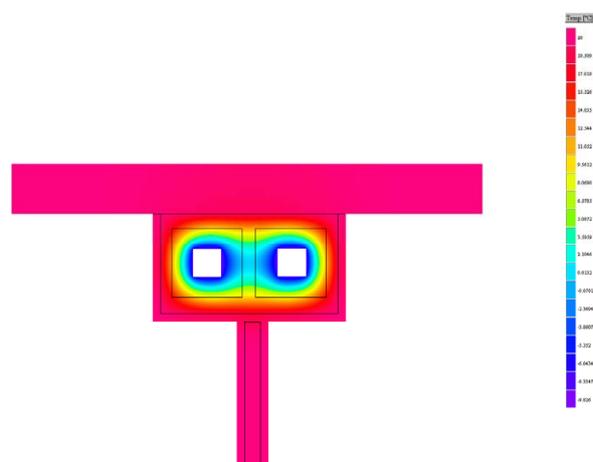


Abb. 4.4-3: Isothermendarstellung des Kastens um die Lüftungskanäle

Infiltrationsluftwechsel

Bei der Bilanzierung nach PHPP werden auch die Lüftungswärmeverluste durch Infiltration an Undichtigkeiten der Gebäudehülle berücksichtigt. Zur Bestimmung der Höhe des

zusätzlichen Luftaustauschs ist die Abschattung des Gebäudes gegenüber Windanströmung durch Häuser oder Bäume in der unmittelbaren Nachbarschaft von Bedeutung. Der Standardansatz des PHPP für den Windschutzkoeffizienten e liegt bei 0,07 und entspricht einer Anströmung über mehrere Einwirkungsseiten und mäßiger Abschirmung durch Bäume in vorstädtischen Gebieten. Für die Gebäude Rotlintstraße 116-120 bzw. 122-124 kann jedoch von einer starken Abschirmung durch die umliegende, zum Teil höhere Bebauung ausgegangen werden. Der Windschutzkoeffizient reduziert sich dann auf 0,04. Bei diesem niedrigen Wert des Windschutzkoeffizienten sind die Auswirkungen unterschiedlicher Gebäudedichtigkeit (n_{50} -Werte) geringer als im dritten Bauabschnitt, bei dem nach Norden nur Bäume und wenige Häuser zur Abschirmung vorhanden sind, so dass hier mit dem Standardwert von 0,07 gerechnet werden muss. So kommt besonders beim dritten Bauabschnitt einer dichten Gebäudehülle eine wichtige Aufgabe zu.

Infiltrationsluftwechsel nach DIN EN 13790

Windschutz-Koeffizienten e und f gemäß EN 13790				
Koeffizient e für Abschirmungsklasse		mehrere Einwirkungs-seiten	eine Einwirkungs-seite	
keine Abschirmung		0,10	0,03	
mäßige Abschirmung		0,07	0,02	
starke Abschirmung		0,04	0,01	
Koeffizient f		15	20	

		für Jahresbedarf:	für Heizlastfall:	
Windschutzkoeffizient e		0,04	0,10	
Windschutzkoeffizient f		15	15	
Luftwechsel bei Drucktest	n_{50}	1/h 0,25	0,25	Netto Luftvolumen für Drucktest V_{n50}
Art der Lüftungsanlage				
Balancierte Passivhauslüftung	<i>bitte ankreuzen</i>	für Jahresbedarf:	für Heizlastfall:	
Reine Abluft				
Abluftüberschuss		1/h 0,00	0,00	
Infiltrationsluftwechsel	$n_{L,Rest}$	1/h 0,011	0,028	3756 m ³

Abb. 4.4-4: Ansatz für den Infiltrationsluftwechsel im ersten Bauabschnitt

4.4.2 Lüftung im Treppenhaus

In Wohngebäuden werden Treppenhäuser selten mechanisch belüftet, besonders bei Bestandsgebäuden ist dies kaum verbreitet. Dennoch stellt sich auch im Treppenhaus die Frage nach der zu erreichenden minimalen Luftqualität, da dort ggf. Gegenstände oder Schuhe abgestellt werden, deren Gerüche besonders beim Betreten des Gebäudes deutlich wahrgenommen werden. Die Bewohner reagieren dann mit zusätzlichem Lüften über die Treppenhausfenster, die oft auch im Winter dauerhaft gekippt werden. Dadurch entstehen jedoch zusätzliche Wärmeverluste, die bei Passivhäusern mit geringen Heizleistungen, die über die Zuluft eingebracht werden können, zu Problemen mit der Beheizbarkeit der Wohnungen führen können.

Aus diesem Grund wurde für die Gebäude in der Rotlintstraße ein Konzept zur mechanischen Belüftung der Treppenhäuser entwickelt. Es gibt jedoch keine Richtlinien über den einzuhaltenden Luftaustausch. Hier wurde ein Luftwechsel von 0,1 1/h als anzustrebender Mindestluftwechsel angesetzt. Weiterhin stellt sich die Frage, mit welchem Konzept die Belüftung sowohl energetisch effizient als auch kostengünstig umgesetzt werden kann. Dazu wurden verschiedene Varianten mit Lüftungsgeräten mit

Wärmerückgewinnung, Anschluss der Treppenhauslüftung an einzelne Wohnungen und Abluftventilatoren untersucht.

Als Lösung für die Rotlintstraße wurde je Treppenhaus eine wandmontierte Lüfterbox vom Typ Ventomaxx V-WRG-S ausgewählt. Dieses als dezentrale Lüftungsanlage vorgesehene Gerät saugt über eine kurze Leitung die Luft von außen an, die Fortluft wird ebenfalls über einen kurzen Wandkanal ausgeblasen. Normalerweise ist keine Kombination mit Zu- oder Abluftkanälen vorgesehen, es besteht jedoch die Möglichkeit an die Abluft einen Rechteckkanal anzuschließen.

Optimal wäre ein Einbau im Erdgeschoss im Bereich der Haustür, was sich jedoch aus Platzgründen nicht realisieren ließ. In der Rotlintstraße wird das Gerät so platziert, dass die frische Zuluft im Bereich des ersten Treppenpodestes eingeklinkt wird, die Abluft im Dachgeschoss abgesaugt wird. Durch den dann erforderlichen Kanal zum Wärmetauscher verändern sich jedoch die Volumenströme des Gerätes, da unterschiedliche Reibungswiderstände vorliegen. Der Hersteller hat hierfür einen Versuchsaufbau realisiert und die zugehörigen Volumenströme gemessen (Abb. 4.4-6).

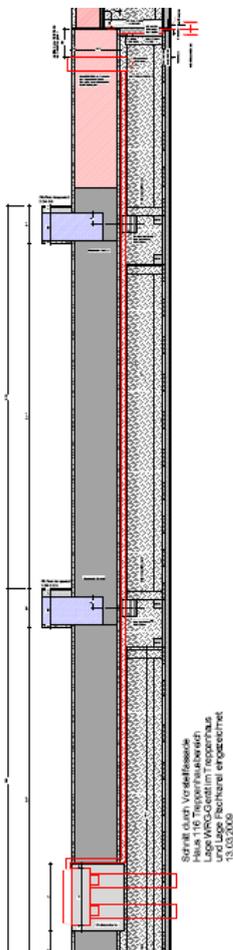


Abb. 4.4-5: Einbausituation der Lüftungsanlage im Treppenhaus mit Abluftkanal



Abb. 4.4-6: Bild vom Versuchsaufbau zur Messung des Volumenstromes beim Treppenhauslüftungsgerät mit angeschlossenem Abluftkanal [Ventomaxx]

Um einen Luftwechsel von 0,1 1/h zu erreichen, müssen die Geräte Volumenströme zwischen 12 und 21 m³/h bereitstellen. Die kleinste Stufe liefert frei blasend 15 m³/h, Stufe 2 30 m³/h. Mit Abluftkanal ergeben sich 22 m³/h für die Zu- und 13 m³/h für die Abluft bei 10 m Kanallänge (in Stufe 2). Bei den größeren Treppenhäusern ist Stufe 3 erforderlich. Für dieses Gerät wird ein Wärmerückgewinnungsgrad von 76 % angegeben, die Elektroeffizienz liegt zwischen 0,17 und 0,25 Wh/m³. Für den gemessenen Volumenstrom von 13 m³/h mit Abluftkanal ergibt sich bei 5,2 W in Stufe 2 eine Elektroeffizienz von 0,4 Wh/m³.

Der mit den Lüftungsanlagen im Treppenhaus verbundene Luftaustausch erhöht den Gesamtluftwechsel des Gebäudes. Die Berechnung des Heizwärmebedarfs ist auf die Energiebezugsfläche bezogen, die Treppenhäuser sind hier aber nicht miteingerechnet. Aus diesem Grund wurde das Volumen des Gebäudes inklusive der Treppenhäuser in den Berechnungsblättern für den Heizwärmebedarf angepasst, um den korrekten Lüftungswärmeverlust zu bestimmen.

4.4.3 Kellerlüftung

Um eine Auskühlung der Kellerräume durch dauerhaftes Lüften im Winter zu verhindern und gleichzeitig für einen ausreichenden Luftaustausch zu sorgen, werden die Kellerfenster in den Gebäuden verschlossen und die Kellerräume mechanisch mit frischer Luft versorgt. Auch zu geringes Lüften der Mieter wird so verhindert. Die Kellerräume erhalten je eine Zuluftöffnung unterschiedlicher Größe, um die Druckdifferenzen innerhalb des Kellers auszugleichen. Diese Öffnungen mit den Größen DN50 - DN70 werden mit einem Gitter nach außen verschlossen. Ein Abluftventilator je Haus befördert die Kellerluft nach außen, wobei ein 0,15 - 0,2-facher Luftwechsel angestrebt wird. Der eingesetzte Ventilator liefert 120 m³/h, für den angestrebten Luftwechsel werden aber nur ca. 40 m³/h benötigt, so dass über eine Zeitschaltung der Ventilator nur in ca. 40 % der Zeit freigegeben und so der vorgesehene Luftwechsel erreicht wird [Petrausch 2009-2].

Um zu vermeiden, dass im Sommer feuchtwarme Außenluft (besonders tagsüber) zu Kondensatanfall in den Kellerräumen führt, wird ein Feuchteregler (Logi DRY) der Zeitsteuerung nachgeschaltet, der den Abluftventilator auf die Differenz der absoluten Feuchten zwischen innen und außen regelt (Abb. 4.4-7). Diese zweite Regelung wird eingesetzt, um die Gefahr feuchter Keller zu verringern. Der Ventilator wird auf der kleinsten Stufe betrieben, für die vom Hersteller eine Leistung von 12 W angegeben wird. Unter Berücksichtigung der Abschaltzeiten ergibt sich eine mittlere Leistung des Kellerventilators von 4,8 W.



Abb. 4.4-7: Ansicht des Ventilators im Keller und der Feuchte-Regelung

4.5 Anlagentechnik

4.5.1 Gesamtkonzept

Die Wärmeversorgung der 61 Wohnungen der Rotlintstraße 116-128 basiert auf folgenden Komponenten (Abb. 4.5-1):

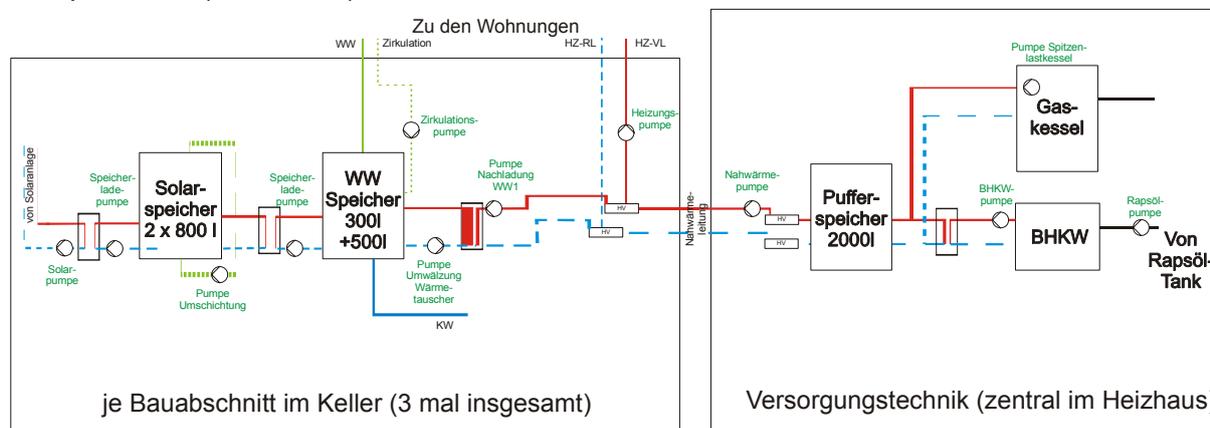


Abb. 4.5-1: Prinzipschema der Anlagentechnik zur Wärmeerzeugung

Im zentralen Heizhaus befindet sich ein Rapsöl-Blockheizkraftwerk mit 22 kW thermischer und 11 kW elektrischer Leistung. Dieses stellt die Hauptwärmequelle der Gebäude dar. Ein Spitzenlastkessel, der aus Gründen der Versorgungssicherheit mit 60 kW auf die volle Heizlast ausgelegt ist, übernimmt die Spitzenlastabdeckung im Winter. Beide Wärmeerzeuger speisen in einen 2000 Liter Pufferspeicher ein. Eine übergeordnete Regelung sammelt die Betriebszustände aller Komponenten und sorgt für einen abgestimmten Betrieb. Die gesamte Zentraltechnik ist aus Schallschutzgründen in einem separaten Heizhaus untergebracht, das an die Rotlintstraße 122 angebaut wird.

Über eine Nahwärmeführung, die im Wesentlichen in den Kellern verlegt ist und nur über kurze, erdverlegte Leitungen die Blöcke verbindet, werden die Technikzentralen der drei Blöcke versorgt. Von dort werden die Steigstränge zur Wärmeversorgung der Wohnungen sowie die Bereitschaftsspeicher der Warmwasserversorgung nachgeheizt, wenn die thermischen Solaranlagen nicht zur Deckung des Bedarfs ausreichen. Die Technikzentralen sind in allen Blöcken gleich ausgelegt, da die Anzahl der versorgten Wohnungen ungefähr gleich verteilt ist.

4.5.2 Warmwasserbereitung mit thermischen Solaranlagen

Der Anteil des Energiebedarfs für die Warmwasserbereitung von Wohnungen liegt bei Passivhäusern um 50 % des Gesamtnutzwärmebedarfs, in der Rotlintstraße sogar bei 53 %. Aus diesem Grund stellen Einsparungen in diesem Bereich einen wichtigen Teil der gesamten Reduktion beim Energiebedarf und somit auch bei den Treibhausgasemissionen dar.

Für jeden der drei Blöcke in der Rotlintstraße ist eine zentrale thermische Solaranlage zur Warmwasserbereitung mit je 32,3 m² Flachkollektoren vorgesehen (1,5 m²/WE – 1,8 m³/WE). Die Kollektoren können auf den flach geneigten Dächern genau nach Süden orientiert werden und besitzen mit einem Aufstellwinkel von 45 ° eine Neigung, die den Solarertrag in

der Übergangszeit optimiert. Die Solarleitungen werden in einem Schacht im Innern des Gebäudes vom Dach zum Technikraum im Keller geführt.

Die Wärme der Solarflüssigkeit wird dort über einen externen Wärmetauscher in zwei je 800 Liter große Solarspeicher eingespeist (siehe solares Anlagenschema in Abb. 4.5-2). Dabei besteht die Möglichkeit, die beiden Speicher je nach solarem Wärmeangebot und Temperaturniveau entweder in Reihe geschaltet oder einzeln zu beladen. Die Solarspeicher sind nicht mit Trinkwasser gefüllt, so dass keine Temperaturgrenzen bezüglich Verkalkung beachtet werden müssen. Die Solarwärme wird mit einem weiteren Wärmetauscher auf das Trinkwasser übertragen, das in einem 300 Liter-Speicher, der als hydraulische Weiche eingesetzt wird und einen Bereitschaftsspeicher mit 500 Liter Volumen bevorratet. Nur dieser 500 Liter-Speicher wird, wenn die Sonnenwärme nicht ausreicht, über das Nahwärmenetz nachgeheizt. Dabei sorgt die zentrale Regelung im Sommer dafür, dass immer dann, wenn in einem Block Wärmebedarf für Warmwasser-Nachheizung besteht und das Nahwärmenetz in Betrieb genommen wird, auch die Bereitschaftsspeicher der anderen Blöcke nachgeheizt werden und so die Aufheiz- und Verteilverluste minimiert werden.

Der solare Deckungsgrad bei der angestrebten Warmwassertemperatur von 48 °C und die beschriebene Anlagenkonfiguration wurde vom Anbieter mit dem Programm T-SOL-Expert 4.5 mit 60,9 % berechnet [Schüco]. Bei dieser Berechnung wurden jedoch pauschale Längen der Verteil- und Zirkulationsleitungen berücksichtigt und nicht die realen, vor Ort vorhandenen. Für die PHPP-Berechnungen wurde aus diesem Grund ein solarer Deckungsgrad von 60,9 % angesetzt und zusätzlich die Verluste der Verteilleitungen sowie die Bereitschaftsspeicher je zur Hälfte berücksichtigt, Sticleitungen und Nahwärmeleitungen in voller Höhe.

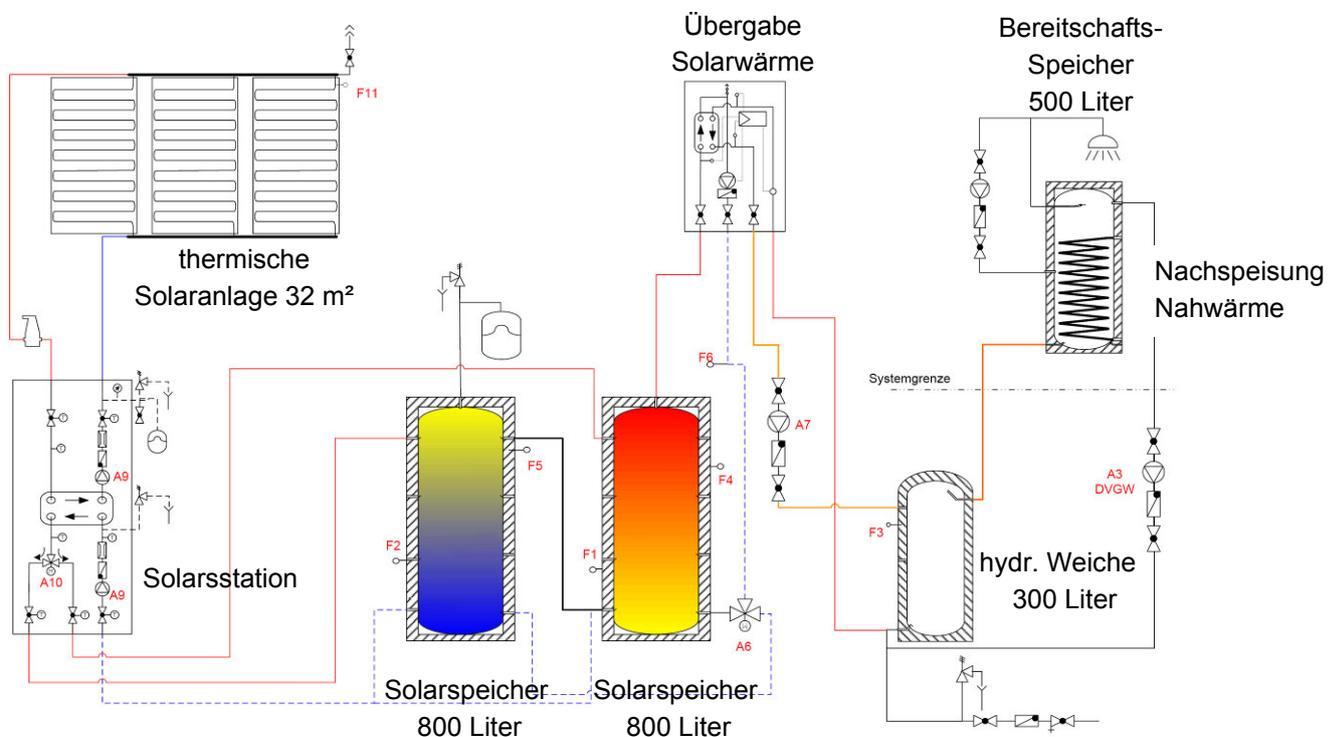


Abb. 4.5-2: Anlagenschema der thermischen Solaranlage je Block [Quelle: Schüco]

Der Warmwasserbedarf wird im PHPP mit 25 Liter je Person und Tag bei 60 °C Warmwassertemperatur angesetzt. Wird die Zapftemperatur auf 48 °C reduziert, so erhöht sich theoretisch das benötigte Warmwasservolumen auf ca. 33 Liter/(Pers*d). Zieht man Messwerte aus anderen Passivhausprojekten heran, so ergeben sich teilweise niedrigere Warmwasservolumina je Person und Tag. Bei einem Passivhausprojekt in Neuenburg wurden im Mittel 22,5 Liter/(Pers*d) bei einer mittleren Zapftemperatur von ca. 62 °C gemessen (7 Wohneinheiten wurden untersucht) [ISE 2002]. In der Passivhaussiedlung in Wiesbaden-Dotzheim lag der gemessene Warmwasserverbrauch bei 27,5 Liter/(Pers*d) bei einer Zapftemperatur von ca. 41,5 °C. Auf 50 °C umgerechnet lag der WW-Verbrauch bei 20,7 Liter/(Pers*d) [IWU 2002]. Dies sind Hinweise darauf, dass die Warmwassermenge nicht ausschließlich von der darin enthaltenen Wärmemenge abhängt.

In der Rotlintstraße werden die WW-Zapfstellen im Bad grundsätzlich mit Spararmaturen ausgestattet, so dass erwartet werden kann, dass der Warmwasserbedarf niedriger ausfällt als bei Standardausstattung. Da aber die Auswirkungen der einzelnen Maßnahmen im Vorfeld nicht zu quantifizieren sind, wird bei der Bilanzierung ein Warmwasserbedarf von 25 Liter/(Pers*d) angesetzt. Weiterhin ist die zukünftige Personenbelegung der Wohnungen nicht bekannt. Es wurden in Absprache mit der ABG Frankfurt Holding eine Personenbelegung von 40 Personen im ersten Block festgelegt (entspricht 32,5 m²/Pers). Diese Belegung wurde entsprechend auf die anderen Blöcke umgelegt, so dass sich 34 Personen im zweiten und 43 Personen im dritten Block ergeben.

4.5.3 Trinkwasserbehandlung

Um die Sonnenenergie der thermischen Solaranlagen auf einem niedrigerem Temperaturniveau nutzen zu können, und um die Verluste bei der Warmwasserspeicherung und Verteilung so gering wie möglich zu halten, wird bei den Gebäuden eine Warmwassertemperatur von 48 °C angestrebt. Gleichzeitig muss jedoch eine Verkeimung der Warmwasserleitungen und -speicher ausgeschlossen werden. An Stelle der im DVGW Arbeitsblatt 551 vorgesehenen thermischen Desinfektion mit Speichertemperaturen von mindestens 60 °C, wird in der Rotlintstraße eine chemische Desinfektion eingesetzt. Dazu wird in das Trinkwasser hypochlorige Säure (HOCl) in geringer Konzentration eindosiert, die vor Ort in einer Wasserbehandlungsanlage aus Salz hergestellt wird. Aufgabe dieser schwachen Säure ist es, Bakterien (z. B. Legionellen) abzutöten bzw. deren Entstehung zu verhindern und so niedrige Warmwassertemperaturen zu ermöglichen. Alle drei Blöcke der Rotlintstraße 116-128 werden dazu über einen einzigen Hausanschluss mit Trinkwasser versorgt. Bevor das Wasser zu den Blöcken verteilt wird, wird die Lösung in das Trinkwasser eindosiert und danach die Konzentration der Lösung kontinuierlich überwacht. Ein Funktionsschema der Wasserbehandlung ist in Abb. 4.5-3 zu sehen. Der Einsatz einer solchen Anlage im Wohnungsbau ist mit dem Gesundheitsamt der Stadt Frankfurt abgestimmt, das in regelmäßigen Abständen Proben nehmen und die Wasserqualität überprüfen wird.

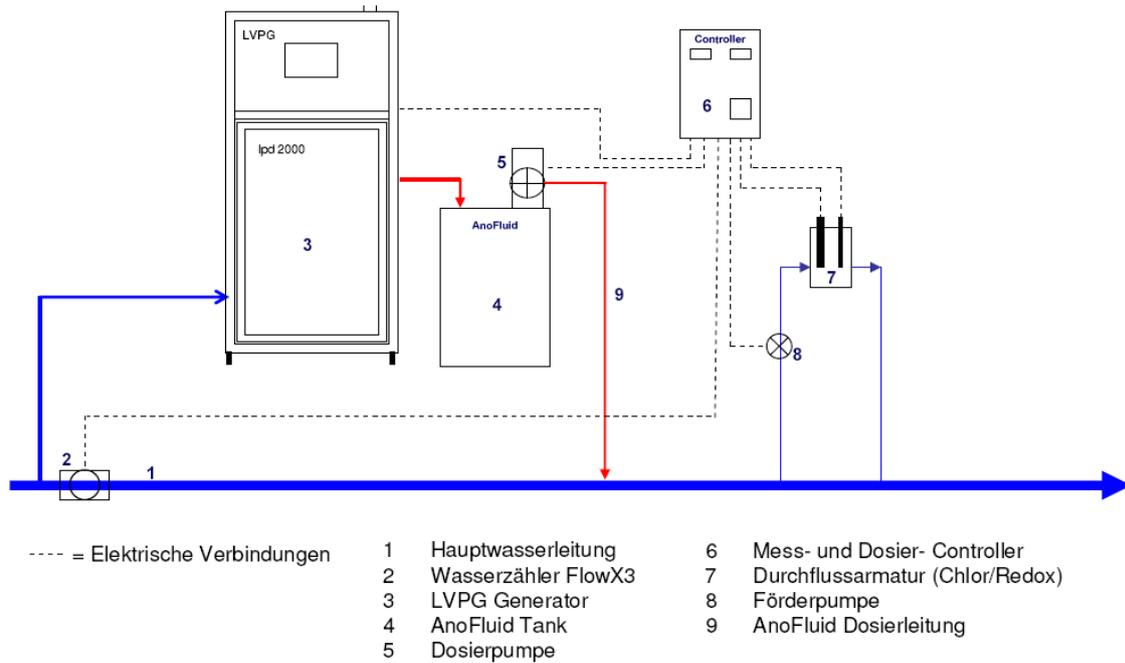


Abb. 4.5-3: Funktionsschema Trinkwasserbehandlung [LVPG International]

4.5.4 Wärmeverteilung Heizung und Warmwasser

Heizung

Von der Technikzentrale in jedem Block wird die Wärme in einer horizontalen Verteilung unter der Kellerdecke zu den Steigsträngen verteilt. Aus statischen Gründen konnten die Leitungen dabei nicht gerade verlegt werden, sondern sie mussten um kritische Bereiche von tragenden Kellerwänden herumgeführt werden, was die Leitungslänge erhöhte. Die horizontalen Leitungen tragen eine alukaschierte Mineralfaserisolierung entsprechend 100 % der Anforderung nach EnEV (entsprechend Dämmdicke \approx Rohrdurchmesser) und sind zusätzlich etwa mittig in der Kellerdeckendämmung verlegt, was die Verteilverluste deutlich reduziert (siehe Ausführungen unten).

Die Steigleitungen wurden entweder anstelle abgerissener, nicht mehr benötigter Kamine oder in zusätzlichen Schächten verlegt. Die Dämmung dieser vertikalen Verteilung beträgt 50 mm (entsprechend 250 % der EnEV-Anforderungen). Die Solarleitungen werden ebenfalls innerhalb des Gebäudes in Schächten verlegt. Tabelle 4.5-1 zeigt die Leitungslängen und Dämmstandards für Heizung- und Warmwasserverteilung. In der Summe sind 1000 m Heizungsleitungen und 620 m Wärme abgebende Warmwasserleitung installiert.

Tabelle 4.5-1: Leitungslängen, -dimensionen und -dämmstärken für Heizungs- und Warmwasserverteilung

Heizung	warmer Bereich			kalter Bereich					
	1. BA	2. BA	3. BA	Keller 1.BA	Keller 2.BA	Keller 3.BA	Heizhaus	Nahwärme im Keller	Erdreich
Länge [m]	181	149	174	164	88	100	5	118	22
Durchmesser Leitung [mm]	18	18	22	35	35	35	35	35	40,8
Dämmdicke [mm]	50	50	50	260	260	260	75	260	200
Wärmeverlust [W/(mK)]	0,117	0,117	0,127	0,080	0,080	0,080	0,131	0,080	0,200

Warmwasser	Warmwasserverteilung inkl. Zirkulation				Einzelleitungen warmer Bereich
	warmer Bereich			kalter Bereich	
	1. BA	2. BA	3. BA		
Länge [m]	80	50	61	352	78
Durchmesser Leitung [mm]	22	22	22	28	0,015
Dämmdicke [mm]	50	50	50	260	0
Wärmeverlust [W/(mK)]	0,127	0,127	0,127	0,080	

Die Heizregister wurden so ausgelegt, dass bei -6 °C eine Vorlauftemperatur von 70 °C am Register erforderlich ist, bei $+10\text{ °C}$ eine Vorlauftemperatur von 60 °C . Um die Wärmeverluste von der Heizzentrale zum am weitesten entfernten Nachheizregister im Dachgeschoss auszugleichen, wird in der Heizzentrale eine um 10 K höhere Vorlauftemperatur eingestellt [Petrausch 2009-2]. Bei einer mittleren Außentemperatur von $4,4\text{ °C}$ ³ ergibt sich eine mittlere Vorlauftemperatur im Heizhaus von $73,5\text{ °C}$. Verteilt man die Verluste gleichmäßig auf die gesamte Leitungslänge und die Heizzeit, kann die mittlere Temperatur der Heizleitungen mit $68,5\text{ °C}$ angesetzt werden.

Auswirkungen der Verlegung der Heizleitungen in der Kellerdeckendämmung

Im Folgenden soll gezeigt werden, welche Verbesserungen sich durch die Verlegung der Rohrleitungen in der Kellerdeckendämmung ergeben und welche Anordnung energetisch die günstigste ist. Dazu wurden verschiedene Modelle einer Anordnungen der Rohrleitungen in der Kellerdeckendämmung untersucht (Randbedingungen: Heizleitungen $70/50\text{ °C}$, Warmwasser 50 °C , Zirkulation 50 °C Kaltwasser 10 °C).

Bei Verlegung der Rohre mittig in der Kellerdeckendämmung (mit 100% Grunddämmung) kann der Wärmeverlust gegenüber 250% Dämmung und Verlegung unter der Kellerdeckendämmung etwa halbiert werden ($5,78\text{ W/m}$ bei Einzelverlegung, $2,5\text{ W/m}$ bei mittiger Verlegung in Decke) (siehe Abb. 4.5-4). Für den Sommerfall (Heizleitungen nicht in Betrieb) ist es günstiger, wenn die Rohre enger beieinander liegen (ca. 110 mm Achsmaß). Wird darüber hinaus der Vorlauf zwischen Rücklauf und Warmwasserleitung verlegt, reduziert sich der mittlere Wärmeverlust im Winter auf ca. $1,8\text{ W/m}$. Optimalerweise sollte die Kaltwasserleitung unterhalb der Dämmung der Kellerdecke verlegt werden, wodurch sich die Verluste weiter reduzieren könnten. Dies ist in der Rotlintstraße jedoch kaum möglich, da die freie Deckenhöhe durch die Kellerdeckendämmung voll ausgenutzt wird.

³ Mittlere Außentemperatur in der Heizperiode für Frankfurt am Main gemäß PHPP

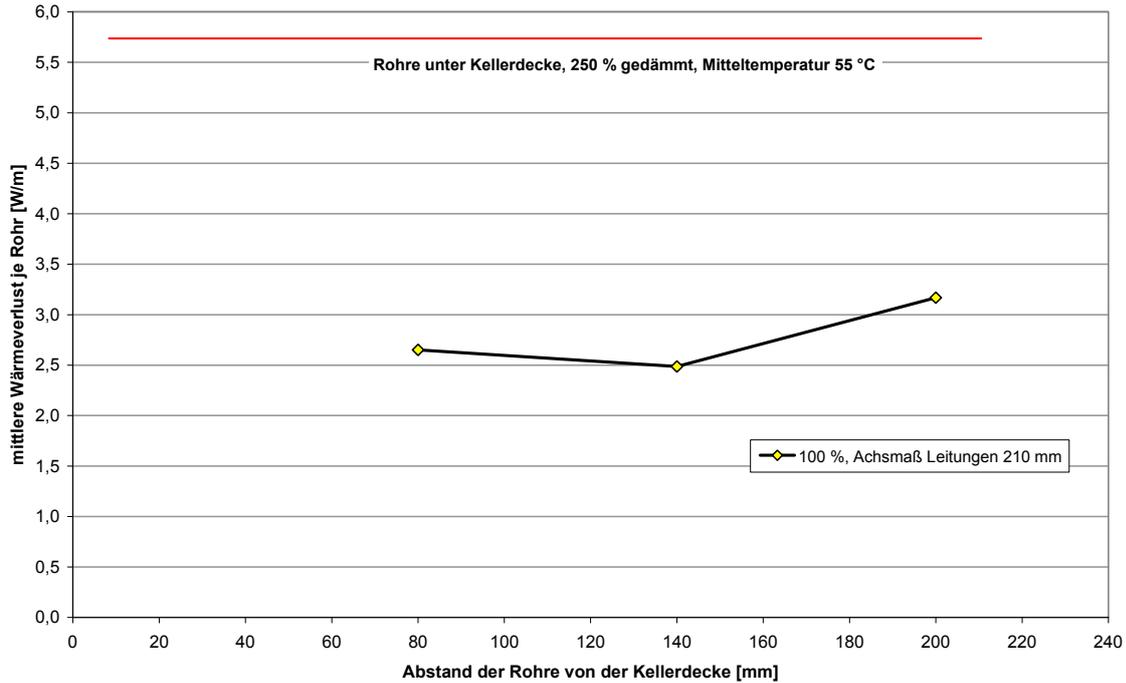


Abb. 4.5-4: Abhängigkeit der Wärmeverluste der Rohrleitungen von der Position innerhalb der Dämmung

In Abb. 4.5-5 ist oben das Modell einer kompakten Verlegung der warmen Leitungen zu sehen. Gleichzeitig ist die Kaltwasserleitung so weit wie möglich am unteren Rand der Dämmung angeordnet, damit möglichst wenig Wärme zur Kaltwasserleitung fließt. Dies kommt einer optimalen Anordnung nahe. Im gleichen Bild unten ist eine gleichmäßige Verteilung aller Leitungen auf einer Höhe dargestellt. Wichtig ist, dass auch innerhalb der Kellerdeckendämmung die Kaltwasserleitung eine zusätzliche, dampfdiffusionsbremsende Isolierung erhält.

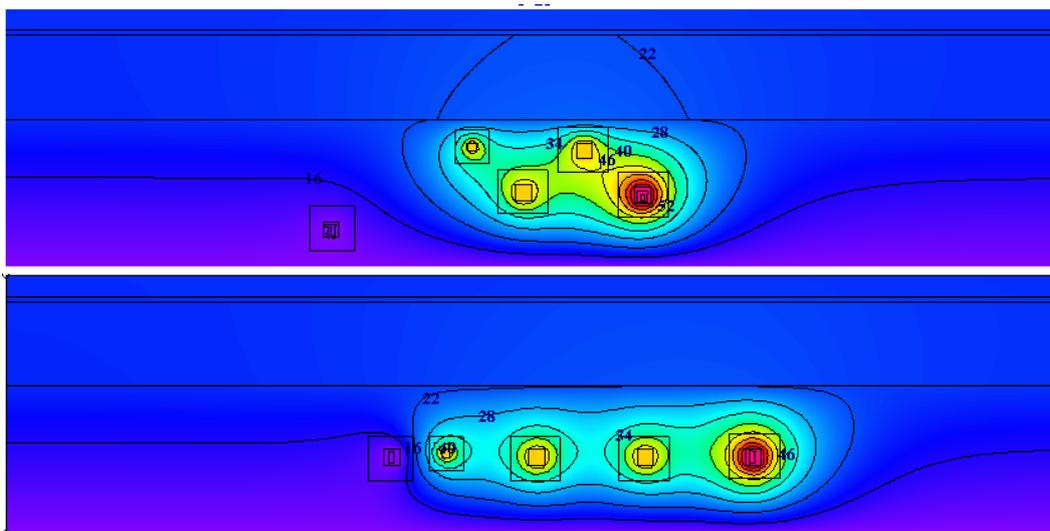


Abb. 4.5-5: Vergleich unterschiedlicher Anordnungen der Verteilleitungen; oben: optimierte Variante mit geringem Abstand der warmen Leitungen sowie Kaltwasser Richtung Keller abgesetzt; unten: alle Leitungen in einer Ebene (auch Kaltwasser)

In der Rotlintstraße umgesetzt wird eine Verlegung der warmen Leitungen 14 cm unterhalb der Kellerdecke. Die Kaltwasserleitung wird tiefer (ca. 20 cm unter der Kellerdecke) angeordnet. Um die Montage zu vereinfachen, sind nur die jeweils zusammenhängenden Leitungen (Vor-Rücklauf Heizung bzw. Warmwasser und Zirkulation) nahe beieinander angeordnet.

Warmwasserverteilung und Zirkulation

Gemeinsam mit den Heizleitungen wurde die horizontale Verteilung des Warmwassers vorgenommen, Warmwasserleitung und Zirkulationsleitung sind nebeneinander in der Kellerdeckendämmung angeordnet. In der vertikalen Verteilung wird ein Rohr-In-Rohr-System verwendet, um die Verluste durch die Zirkulationsleitung zu minimieren. Dabei befindet sich im Warmwasserrohr aus Edelstahl (Dämmdicke 50 mm) ein dünnes Kunststoffrohr, das für den Zirkulationsrücklauf verwendet wird (Abb. 4.5-6). Außerdem vermindert sich der Platzbedarf für Warmwasser im Schacht. Wichtig bei dem Rohr-In-Rohr-System ist die Einregulierung der Stränge analog zur Heizungsverteilung. Es muss außerdem berücksichtigt werden, dass gegebenenfalls die Warmwasserleitung eine Dimension größer installiert werden muss, um die Querschnittsreduktion durch die Zirkulationsleitung auszugleichen.

Erläuterung der Nummern aus Abb. 4.5-6:

- 1: Etagenabgang;
- 2: Warmwasserverteilung;
- 3: Zirkulations-Sammelleitung;
- 4: Anschlussstutzen;
- 5: innen liegende Zirkulationsleitung;
- 6: Warmwassersteigleitung;
- 7: Endverschlussstück.

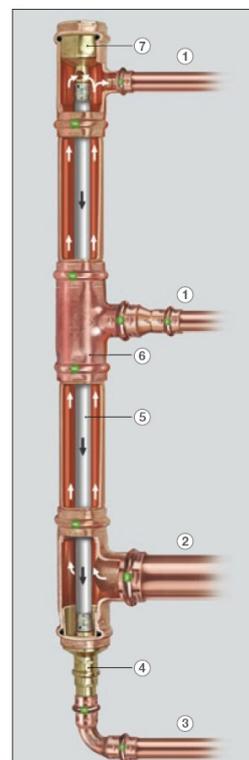


Abb. 4.5-6:
Funktionsschema Rohr-
In-Rohr-
Zirkulationsleitung
[VIEGA]

Nahwärme

Als Nahwärmeleitungen für die Erdreichverlegung werden flexible Rohre mit einer gemeinsamen Isolierung eingesetzt (Duoleitungen). Durch die Isolierung um beide Medienrohre (40,8 mm) herum bleibt der Außendurchmesser mit 200 mm vergleichsweise klein und die wärmeabgebende Oberfläche wird minimiert. Der Wärmeverlust liegt bei 0,35 W/(mK), die Leitungslänge für die beiden Teilstrecken zwischen Nr. 122 und Nr. 118 sowie zwischen 124 und Nr. 126 summiert sich auf ca. 22 m.

Zur weiteren Reduktion der Wärmeverluste an das Erdreich wurden unterschiedliche Ausführungen einer zusätzlichen Dämmung der Nahwärmeleitungen im Erdreich untersucht:

- nur Nahwärmeleitung Uponor Ecoflex Twin 2x50 in 80 cm Tiefe verlegt
- Uponor in Betonrohr 400 mm mit Perlitedämmung (Wärmeleitfähigkeit 0,050 W/(mK)) in 80 cm Tiefe verlegt
- Uponor in Betonrohr 400 mm mit PE-Schaumdämmung (Wärmeleitfähigkeit 0,040 W/(mK)) in 80 cm Tiefe verlegt

- Uponor in Betonrohr 500 mm mit Perlitedämmung (Wärmeleitfähigkeit 0,050 W/(mK)) in 80 cm Tiefe verlegt
- Uponor in Betonrohr 500 mm mit PE-Schaumdämmung (Wärmeleitfähigkeit 0,040 W/(mK)) in 80 cm Tiefe verlegt
- Uponor in Betonrohr 400 mm in nur 40 cm Tiefe mit Perlitedämmung (Wärmeleitfähigkeit 0,050 W/(mK))
- Uponor ohne Betonrohr mit zusätzlicher Dämmung von 70 mm PE-Schaum in 80 cm Tiefe
- Uponor ohne Betonrohr mit zusätzlicher Dämmung von 2 x 70 mm PE-Schaum in 80 cm Tiefe

Zur Berechnung der jährlichen Wärmeverluste wurde unterstellt, dass das Nahwärmenetz entweder 205 d in Betrieb ist (Heizzeit gemäß PHPP) oder von Oktober bis Mai dauerhaft (pessimistische Abschätzung) und in den verbleibenden Monaten nur an 3 h pro Tag betrieben wird. Die Wärmeleitfähigkeit des Erdreiches wurde mit 2 W/(mK) angesetzt. Für die Erdreichtemperatur werden 6 °C in der Hauptbetriebszeit der Nahwärme im Winter verwendet.

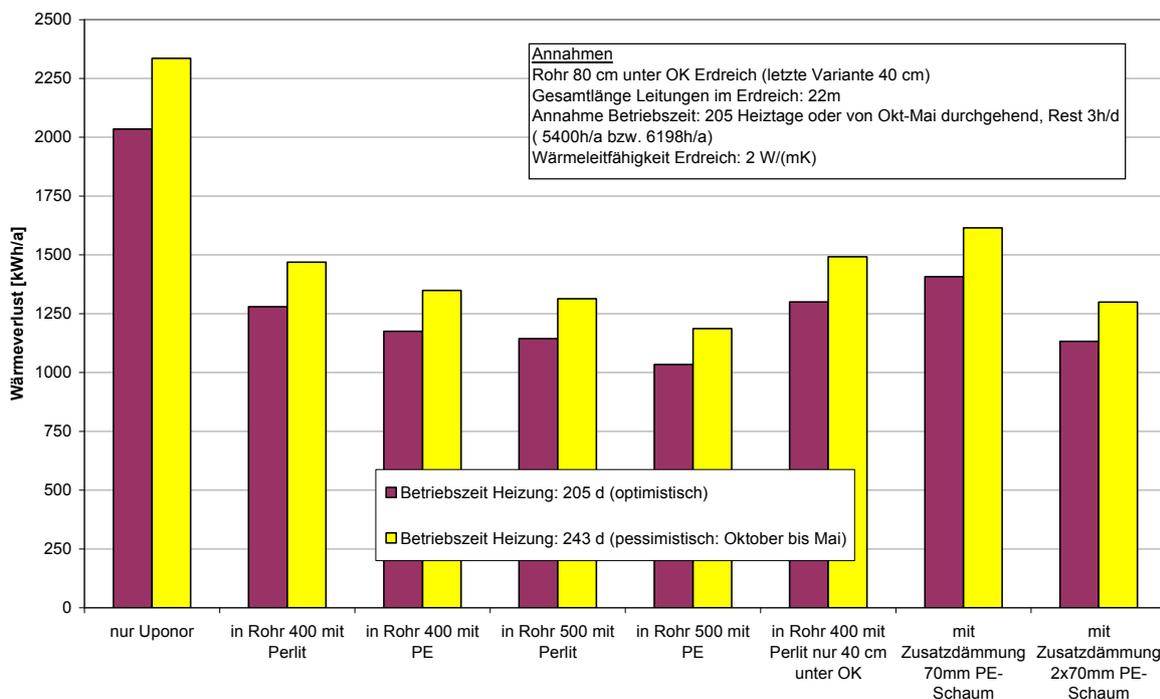


Abb. 4.5-7: Vergleich verschiedener Varianten einer Zusatzdämmung der Nahwärmeleitungen

Durch die zusätzliche Dämmung der Nahwärmeleitung können die Wärmeverluste um 32 % - 49 % reduziert werden (Abb. 4.5-7). Die Varianten ohne Betonrohr aber mit PE-Dämmmatten sind energetisch nicht ganz so günstig, führen aber immer noch zu einer Reduktion der Wärmeverluste von absolut 721 kWh/a (einlagig) bzw. 1036 kWh/a (zweilagig).

Ausgeführt wird die Variante mit 2 x 70 mm PE-Schaum-Dämmung um die Nahwärmeleitungen, da das Betonrohr nicht ohne Versatz verlegt werden konnte. Dadurch reduziert sich der Wärmeverlustkoeffizient der Nahwärmeleitung von 0,35 W/(mK) (Herstellerangabe)

auf $0,20 \text{ W/(mK)}$, so dass sich die Wärmeverluste pro Jahr um ca. 1040 kWh reduzieren. Die Einsparung entspricht somit dem Heizwärmebedarf einer 67 m^2 großen Wohnung.

Pumpen

Die skizzierte Anlagentechnik benötigt eine Reihe von Pumpen für den Betrieb. Bei der Auswahl der Pumpen wurde jedoch darauf geachtet, dass hocheffiziente, geregelte Pumpen zum Einsatz kommen. Zusätzlich verfügen einige Pumpen über weitere Sparfunktionen. Die Warmwasser-Zirkulation wird kontinuierlich betrieben, durch eine Messung der Zirkulationstemperatur schaltet sich die Pumpe jedoch nur ein, wenn die Temperatur der Zirkulationsleitung einen Mindestwert unterschreitet (ca. $43 \text{ }^\circ\text{C}$). Die Heizungspumpen verfügen über einen Intervallbetrieb, um Heizwärmebedarf in der Übergangszeit zu detektieren.

4.5.5 Reduktion der Verteilverluste durch erhöhte Dämmstärken

Einen bedeutenden Anteil des gesamten Wärmebedarfs stellen die Verteilverluste dar. Bei der Sanierung werden verschiedene Maßnahmen ergriffen, um diese Verluste zu minimieren. Um den Einfluss der Dämmdicke der Leitungen auf die Verteilverluste zu berechnen, wurde in Abb. 4.5-8 die Überschreitung der Anforderungen der EnEV bezüglich der Isolierdicken variiert. Dabei wurde die Verlegung der horizontalen Verteilung für Heizung und Warmwasser in der Kellerdeckendämmung zuerst nicht berücksichtigt. Werden nur die EnEV-Anforderungen erfüllt, ergeben sich fast 62,4 MWh an Verlusten pro Jahr. Das Rohr-in-Rohr-System der Zirkulation ist dabei bereits berücksichtigt. Bei Dämmdicken, die doppelt so hoch ausfallen wie die Anforderungen der EnEV, liegen die Verluste bei 47,1 MWh, bei dreifacher Dämmdicke bei 40,6 MWh. Da bei den Verlusten auch diejenigen der Speicher und der Stichleitungen enthalten sind, die sich nicht mit der Dicke der Leitungsdämmung ändern und die Rohrleitungsverluste nicht linear mit der Dämmstärke abnehmen, verringern sich die Verteilverluste mit einer weiteren Erhöhung der Isolierdicken nicht proportional. Für die in der Rotlintstraße umgesetzte Dämmdicke von 250 % der EnEV-Anforderungen ergeben sich – ohne Berücksichtigung der Leitungsführung in der Kellerdeckendämmung – 43,3 MWh/a an Verlusten.

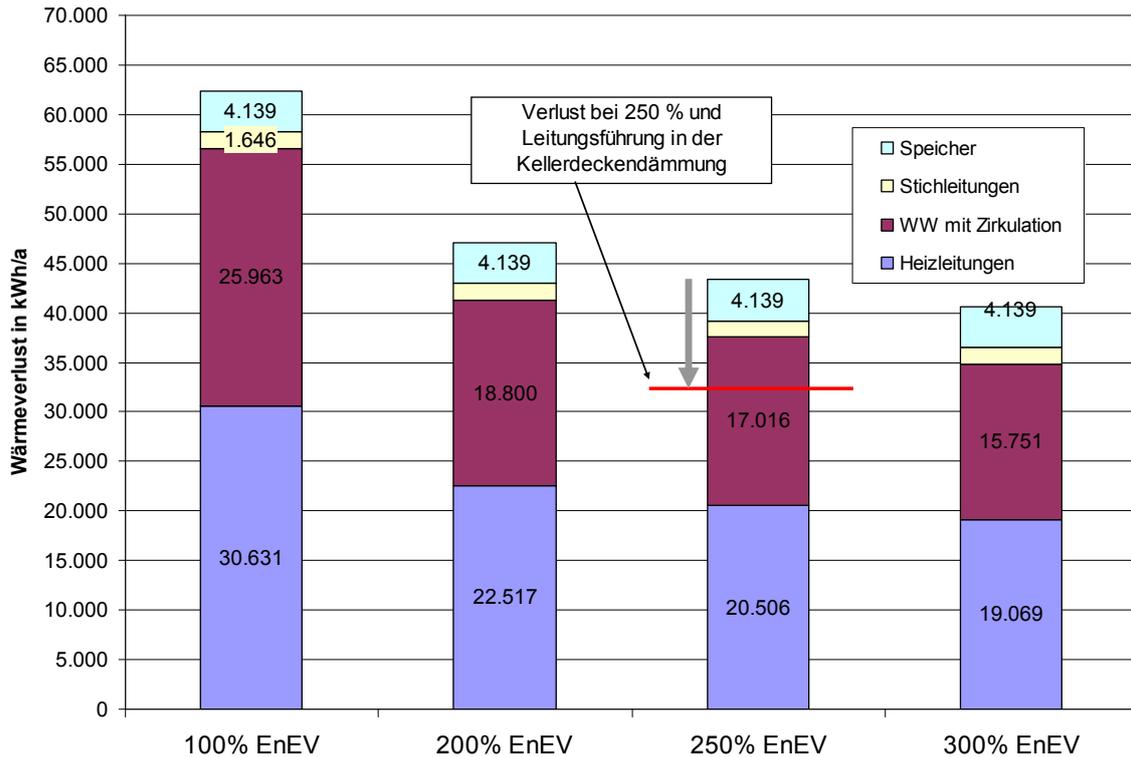


Abb. 4.5-8: Verluste der Wärme- und Warmwasserverteilung bei unterschiedlicher Dämmstärke der Verteilungen

Theoretisch halbiert sich etwa der Verlustkoeffizient der horizontalen Verteilung bei Verlegung in der Kellerdeckendämmung. Um die zusätzlichen Wärmeverluste durch Armaturen grob zu berücksichtigen, wird jedoch nicht die volle Kellerdeckendämmung angesetzt und mit einem Wärmeverlust von $0,088 \text{ W}/(\text{mK})$ gerechnet. Werden diese Verhältnisse der Verlegung der horizontalen Leitungen berücksichtigt, reduzieren sich die Verluste auf $32,1 \text{ MWh}/\text{a}$. Dies entspricht einer Einsparung von $11,2 \text{ MWh}$ oder dem Heizwärmebedarf von 728 m^2 Wohnfläche, nur durch die Leitungsführung in der Kellerdecke. Gegenüber einer Dämmung nach EnEV-Anforderungen summieren sich die Einsparungen auf $30,2 \text{ MWh}/\text{a}$ bzw. $8 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$.

Durch die Verlegung der Zirkulation innerhalb der Warmwasserleitung (Rohr-In-Rohr-System) werden unter Berücksichtigung eines reduzierten Rohrleitungsdurchmessers bei separater Zirkulationsleitung allein 3724 kWh an Verteilverlusten eingespart, was dem Heizwärmebedarf von vier 60 m^2 großen Wohnungen entspricht.

Abb. 4.5-9 zeigt die Auswirkungen der verschiedenen umgesetzten Maßnahmen bei der Wärmeverteilung sowie der Warmwasserbereitung und -verteilung auf die Verluste der Anlagentechnik. Die Basisvariante (links) stellt eine Verteilung mit 100% Dämmung gemäß EnEV sowie 60°C Warmwassertemperatur und externer Zirkulation dar. Bei $34,8 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ Nutzwärmebedarf (Heizung+Warmwasser) entstehen hierbei Verluste von $21,2 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$. Durch die Verbesserung der Dämmung von 100% auf 250% reduzieren sich die Verluste auf $15,2 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$. Die zusätzliche Dämmung der 22 m Nahwärmeleitung vermindert die Verluste um weitere $0,5 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$. Wird die horizontale Verteilung für Heizung und Warmwasser zusätzlich in der Kellerdeckendämmung verlegt, werden aufgrund der großen

Längen in den drei Blöcken zusätzlich 3,3 kWh/(m²a) eingespart. Die anschließende Reduktion der Warmwassertemperatur kann weitere 1,7 kWh/(m²a) einsparen, nicht berücksichtigt ist dabei der schlechtere solare Deckungsgrad bei der 60 °C WW-Temperatur und gleicher Kollektorfläche. Die Rohr-in-Rohr-Zirkulation erbringt bei diesem Vergleich immer noch um 0,8 kWh/(m²a) geringere Verluste. Würde diese Art der Zirkulation auf die Basisvariante angewendet (nur Dämmung nach EnEV, 60 °C Warmwassertemperatur), so ergäben sich Einsparungen von 2,0 kWh/(m²a) in diesem Projekt bzw. ca. 20 % der Verluste der Warmwasserverteilung.

Insgesamt können durch die gezeigten Maßnahmen die Verteilverluste absolut um 46,2 MWh bzw. von 61 % auf 26 % des Nutzwärmebedarfs reduziert werden.

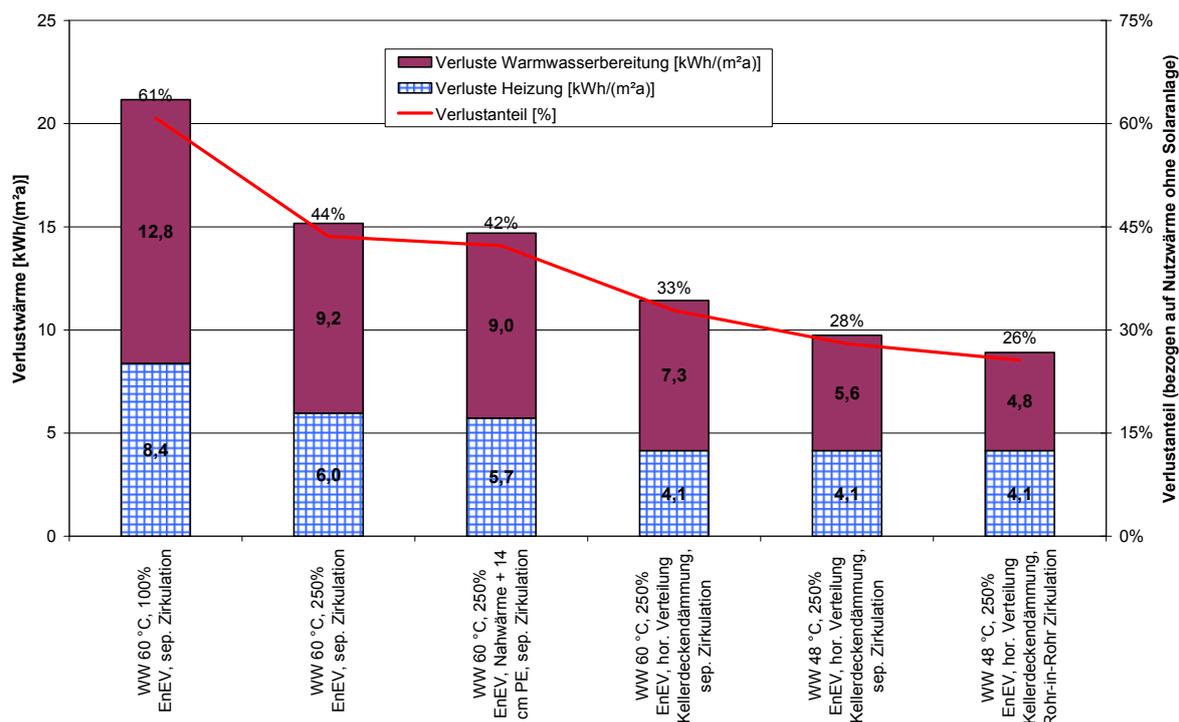


Abb. 4.5-9: Auswirkungen unterschiedlicher Maßnahmen zur Reduktion der Verteilverluste bei Heizung und Warmwasser

4.5.6 Wärmeversorgung

Die Wärmeversorgung beruht bei den Gebäuden Rotlintstraße 116-128 auf einem motorischen Blockheizkraftwerk (BHKW) mit Rapsölversorgung. Das BHKW ist vom Hersteller speziell für den Betrieb mit Rapsöl umgebaut und besitzt eine elektrische Leistung von 11 kW, eine thermische Leistung von 22 kW und eine Stromkennzahl von 0,5 [S-Pro]. Der Gesamtnutzungsgrad wird mit 0,9 angegeben. Dieses BHKW soll den größten Teil der Wärmeversorgung für Heizung und Warmwasser übernehmen. Reicht die Heizleistung im Winter nicht aus, so kann ein Erdgas-Spitzenlastkessel zugeschaltet werden. Er ist mit 60 kW thermischer Leistung auf die Gesamtleistung der Gebäude ausgelegt, um im Fall eines Defekts oder von Wartungsarbeiten am BHKW die Wärmeversorgung übernehmen zu können.

Das Blockheizkraftwerk wird wärmegeführt betrieben, d. h. wenn Wärmebedarf für Heizung oder Warmwasserbereitung besteht, wird das BHKW in Betrieb genommen. Es speist die Wärme in einen 2000 Liter Pufferspeicher ein, der die Laufzeiten des BHKW besonders bei

Wärmeanforderung im Sommer verlängern soll, bzw. die Deckung des Wärmebedarfs teilweise über die im Puffer gespeicherte Wärme ermöglicht.

Pufferspeicher

Für die Zeiten, in denen der Wärmebedarf (Heizung + Warmwasser) der Gebäude unter der Nennleistung des BHKW liegt, wird dieses in Intervallen betrieben, bzw. nicht benötigte Wärme wird im Puffer zwischengespeichert. Dabei soll der Puffer möglichst viel Wärme zwischenspeichern, so dass die Anzahl der Motorstarts minimiert wird. Um abschätzen zu können, wie viel Wärme effektiv im Puffer gespeichert werden kann wird unterstellt, dass die minimale nutzbare Puffertemperatur bei 55 °C liegt, da Temperaturen unter diesem Wert nicht mehr zur Aufheizung des Warmwassers auf 48 °C verwendet werden können. Die maximale Speichertemperatur hängt von der Anlagenkonfiguration und vor allem von der maximalen Vorlauftemperatur des BHKW ab. Diese wird mit maximal 90 °C angegeben. Als Nutzungsgrad des Speichers werden 90 % angesetzt.

In Abb. 4.5-10 ist für verschiedene Vorlauftemperaturen die nutzbare Wärme im Speicher dargestellt. Neben dem Wärmeinhalt des Speichers sind auch die Verluste abhängig von der Speichertemperatur angegeben. Der spezifische Wärmeverlust des Speichers wurde dabei mit 2,5 W/K angesetzt. Man erkennt, wie wichtig aus Sicht der optimalen Ausnutzung des Pufferspeichers eine möglichst hohe maximale Puffertemperatur ist, da dann mehr Wärme für die Warmwassernachheizung bereitgestellt werden kann. Es zeigt sich, dass durch eine Erhöhung der Puffertemperatur von 70 °C auf 85 °C die nutzbare Wärmekapazität verdoppelt werden kann (von 29 kWh auf 59 kWh). Damit ergeben sich Laufzeiten des BHKW, wenn der Speicher auf die Minimaltemperatur entladen ist von 1,3 h (bei 70 °C) bis 3,1 h (bei 90 °C).

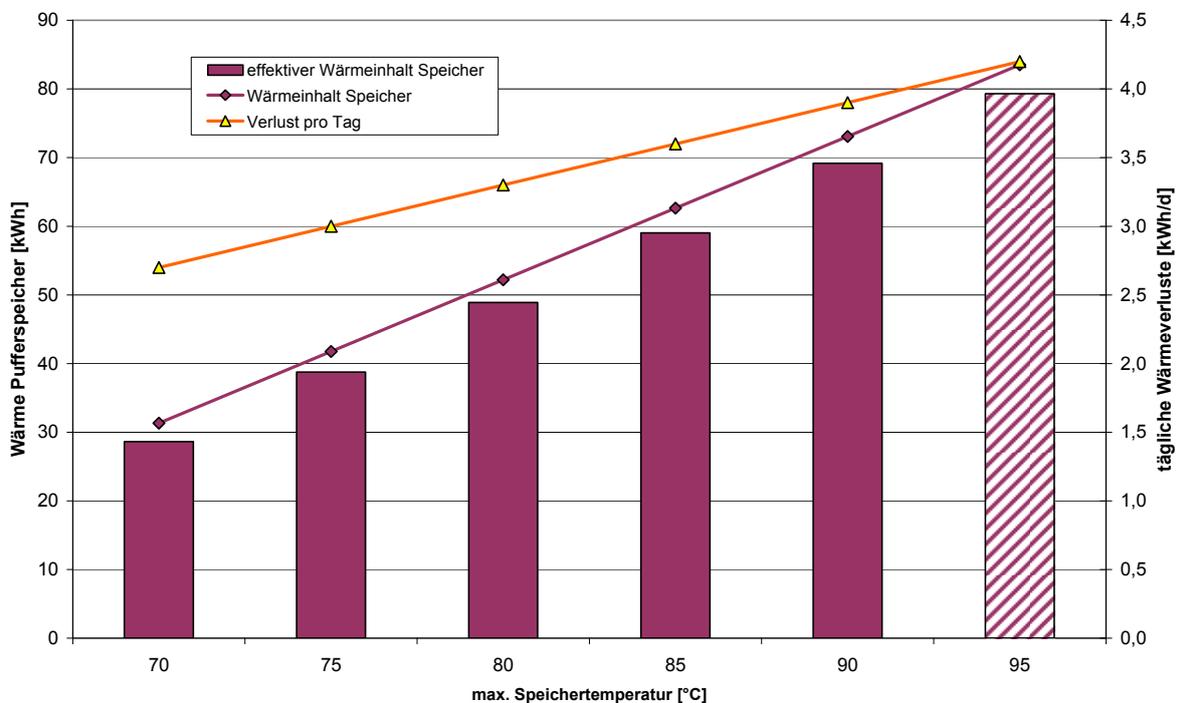


Abb. 4.5-10: Wärmeinhalt, tägliche Verluste sowie nutzbarer Wärmeinhalt des Pufferspeichers bei unterschiedlichen maximalen Temperaturen und einer minimalen Temperatur von 55 °C

Jahresdauerlinie

Zur Abschätzung des Deckungsgrades des BHKW am Gesamtwärmebedarf wird die Jahresdauerlinie der Gebäude benötigt. Diese Jahresdauerlinie beschreibt für jede Stunde des Jahres den Wärmebedarf für Heizung, Warmwasserbereitung und Verteilverluste. Zur Bestimmung der Jahresdauerlinie in der Planungsphase gibt es verschiedene Verfahren. Neben dem Typtagverfahren der VDI 2067 sind hier Verfahren auf Basis von typischen Monatsgängen zu nennen. Ein solches Verfahren wurde in [Brunnengräber, Loga] entwickelt und am Beispiel der Messdaten der Niedrigenergiehaus-Siedlung Niedernhausen mit gutem Ergebnis überprüft, für Passivhäuser sind jedoch nur wenige gemessene Jahresdauerlinien publiziert [z. B. Großklos 2003].

Im Folgenden soll auf Basis der in Niedernhausen gewonnenen typischen Tagesgänge für Heizung und Warmwasser die Jahresdauerlinie für die Rotlintstraße 116-128 konstruiert werden. Dabei muss einschränkend berücksichtigt werden, dass die typischen Tagesgänge für Heizwärme bei Passivhäusern von denen der Niedrigenergiehäuser abweichen können. Für den typischen Tagesgang des Warmwasserbedarfs werden keine strukturellen Unterschiede zwischen Niedrigenergie- und Passivhäusern erwartet. Hier könnte sich jedoch eine Abweichung durch eine möglicherweise abweichende Nutzungsstruktur zwischen Gebäudeeigentümern (wie in Niedernhausen) und Mietern (Rotlintstraße) ergeben. Weiterhin können die Auswirkungen des Zusammenspiels von Pufferspeicher und Nahwärmenetz durch das Verfahren nicht im Detail abgebildet werden. Die berechnete Jahresdauerlinie stellt somit eine Näherung dar, die anhand der Messdaten überprüft werden muss.

Basis des Verfahrens sind die monatlichen Bedarfswerte für Heizung, Warmwasser und Verteilverluste, die aus den PHPP-Berechnungen entnommen wurden. Für Warmwasser wurde der Jahresverbrauch nach unterschiedlichen Verfahren verteilt. Einerseits wurde mit der typischen Monatsverteilung aus Niedernhausen gerechnet, andererseits wurde die Verteilung aus der T-Sol-Berechnung für den solaren Deckungsgrad verwendet. In Abb. 4.5-11 ist neben diesen beiden Jahresgängen noch die Verteilung über die Anzahl der Tage jedes Monats dargestellt. Man erkennt, dass die grundlegende Struktur zwischen den Daten aus Niedernhausen und TSOL ähnlich ist, wichtige Unterschiede zeigen sich im Urlaubsmonat im Sommer sowie der Herbst. Um nicht Daten unterschiedlicher Struktur zu mischen, wird für die Ermittlung der Jahresdauerlinie die monatliche Verteilung der TSOL-Daten verwendet.

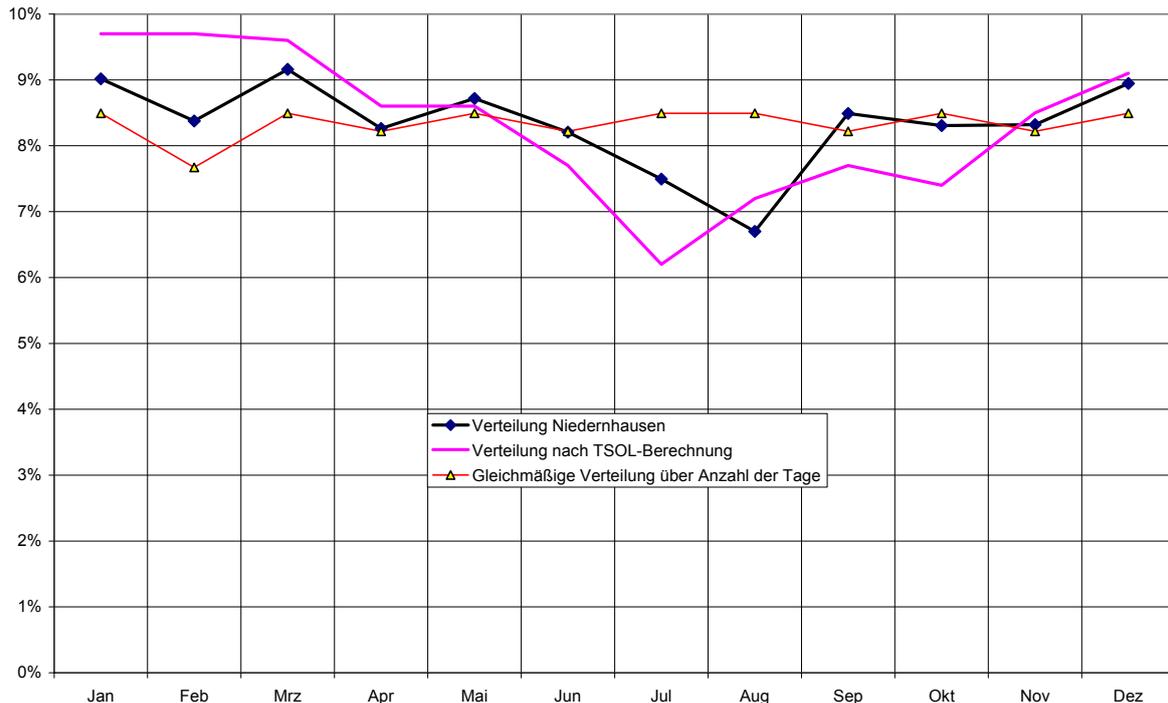


Abb. 4.5-11: Prozentuale Verteilung des Warmwasserbedarfs nach unterschiedlichen Ansätzen

Die sich ergebende Jahresdauerlinie und der Einfluss des solaren Deckungsgrades der Warmwasserbereitung auf diese ist in Abb. 4.5-12 dargestellt. Es wurden solare Deckungsgrade von 30 % bis 70 % sowie ohne thermische Solaranlage unterstellt. Die Verteilverluste der Heizung wurden entsprechend dem Heizwärmebedarf der Monate vorgenommen, die Verluste der Warmwasserbereitung wurden anteilig entsprechend der Anzahl der Stunden je Monat verteilt. Bei der Bilanzierung wurde weiterhin unterstellt, dass die Nahwärmeleitungen außerhalb der Heizzeit aufgrund der Blockbeladung der Warmwasserspeicher 4 Stunden je Tag auf Temperatur gehalten werden.

In Volllast (ohne Speicher) könnte das BHKW – da es nicht in Teillast betrieben werden kann – bei der geplanten Auslegung der Solaranlage nur an 2195 Stunden im Jahr betrieben werden (Schnittpunkt dicke rote Linie mit der horizontalen Linie der maximalen BHKW-Leistung). Liegt der Wärmebedarf unter der Nennleistung des BHKW, wird die Überschusswärme jedoch tatsächlich im Puffer zwischengespeichert. Wie oben gezeigt, kann der Puffer bei 85 °C Speichertemperatur die BHKW-Wärme von ca. 2,7 Stunden aufnehmen. Es ergibt sich dann eine Vollbenutzungszeit von 3940 Stunden. Der Spitzenlastkessel muss bei dieser Auslegung 24,6 % der Wärme erzeugen.

Weitere Optimierungsmöglichkeiten ergeben sich durch die Ausnutzung des Wärmehalts des Pufferspeichers zur Abdeckung eines Teils der Leistung, die über der Maximallast des BHKW liegt. Je nach zeitlicher Verteilung der Last (es treten üblicherweise nicht mehrere Stunden mit genau der Maximallast des BHKW auf), kann ein Teil der Leistung anstelle des Spitzenkessels aus dem Pufferspeicher abgedeckt werden. Dies kann den Deckungsanteil des BHKW zwischen 1,5 % (5 kW aus Puffer) bis zu 10 % (bei 16 kW aus Pufferspeicher – entspricht etwa halber Pufferkapazität) erhöhen.

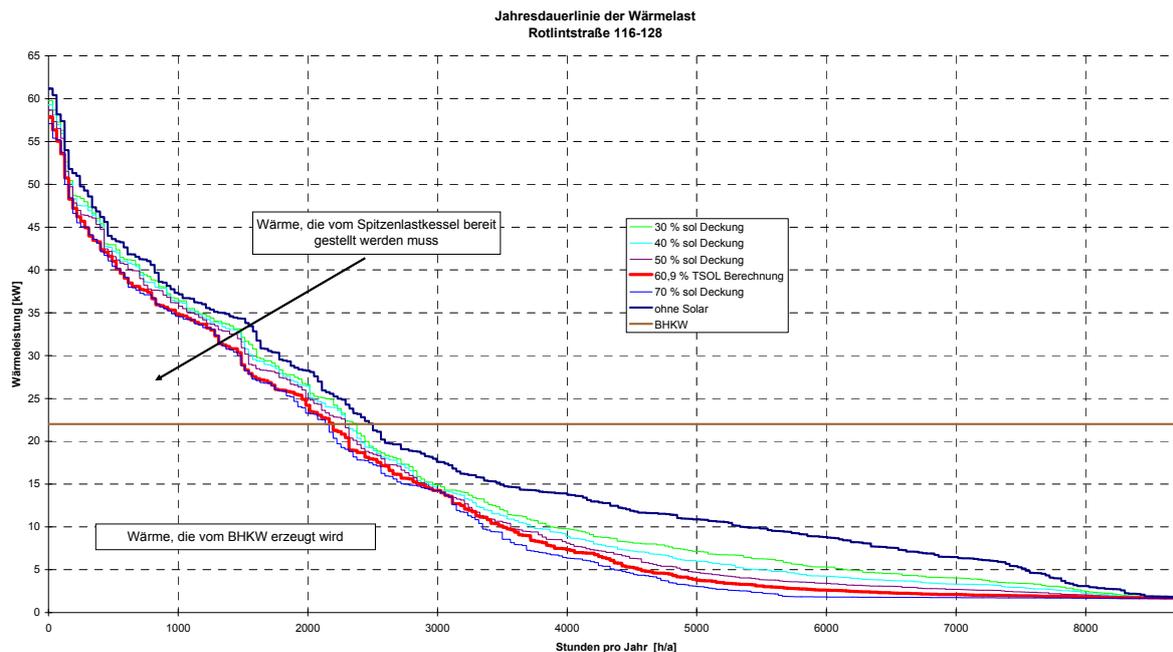


Abb. 4.5-12: Jahresdauerlinie der Wärmelast für unterschiedliche solare Deckungsgrade

Durch die wärmegeführte Betriebsweise mit einem großen Pufferspeicher ändert sich der prozentuale Anteil des BHKW an der gesamten Wärmeerzeugung bei unterschiedlichen solaren Deckungsgraden nur wenig, da die Jahresdauerlinie sowohl bei dem Anteil des Spitzenlastkessels als auch beim BHKW nach unten verschoben wird. Die insgesamt zu leistende Arbeit von BHKW und Spitzenlastkessel wird jedoch deutlich reduziert. Während bei 30 % solarem Deckungsgrad 132,8 MWh/a erzeugt werden müssen, reduziert sich dieser Wert bei der geplanten Auslegung auf 115,0 MWh/a, es werden somit 17,8 MWh eingespart (zwischen 30 % und 61 % Deckungsgrad).

Durch Umplanungen, die sich im Laufe der Baudurchführung ergeben hatten, mussten die Verteilleitungen teilweise länger ausgeführt werden, als ursprünglich geplant. Dadurch haben sich auch die Verteilverluste für Heizung und Warmwasser erhöht, was in den vorangegangenen Berechnungen bereits berücksichtigt ist. Ohne diese Änderungen würde die Jahresdauerlinie flacher verlaufen und sich ein um 1,6 % niedrigerer Deckungsanteil des Blockheizkraftwerks ergeben, was auch zu einer geringeren Stromerzeugung geführt hätte. In der Primärenergie- und CO₂-Bilanz der Gebäude hätte dies zu höheren CO₂-Emissionen geführt. Aus Sicht der CO₂-Bilanz wirken sich die höheren Verteilverluste somit positiv aus. Dem stehe eine größere Nutzung von Biomasse entgegen.

5 Energetische Nutzung von Rapsöl

In den Gebäuden in der Rotlintstraße soll die Energieversorgung hauptsächlich über ein Blockheizkraftwerk bereitgestellt werden, das mit Rapsöl betrieben wird. Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse einer Literaturrecherche zum Thema Rapsölnutzung und die Berechnungen von Emissionsfaktoren und kumuliertem Energieaufwand (KEA) für die energetische Rapsölnutzung mit dem Programm [GEMIS] dokumentiert.

5.1 Anbau und Verwendung von Raps

Raps (lateinisch *Brassica napus*) ist eine Kreuzung zwischen Kohl und Rüben. Rapsöl wurde früher meist als Lampenöl oder als Schmiermittel verwendet⁴. Dass er kaum als Speiseöl verwendet wurde, liegt an seinem hohen natürlichen Anteil an Erucasäure (ca. 50 %), die ernährungsphysiologisch ungünstig ist. In den 60er Jahren des letzten Jahrhunderts wurden neue Sorten fast ohne Erucasäure gezüchtet, die auch die Nutzung als Speiseöl erlauben. In der Folge stieg der Rapsanbau weltweit stark an. Durch die Weiterzüchtung einer spontanen Mutation mit stark reduziertem Glucosinolatgehalt kann auch der Pressrückstand (Rapsextraktionsschrot) als hochwertige Proteinquelle in Futtermischungen verwendet werden. Diese „Doppelnul“-Sorten bilden heute die Standardqualität beim Rapsanbau in Deutschland. Weltweit ist Raps nach Soja und Palmöl die dritt wichtigste Ölf Frucht.

Die wichtigsten Einsatzgebiete sind die technische Nutzung als Schmiermittel (Rapsöl gilt als nicht wassergefährdend⁵ und biologisch abbaubar), als Grundstoff zur Herstellung von Waschmitteln oder Kosmetika und die energetische Nutzung als Biodiesel (als Rapsöl-Methylester) oder direkt als Pflanzenöl. Drei Viertel der in Deutschland erzeugten Rapsölmenge wird mittlerweile als Rapsölkraftstoff verwendet. Außerdem ist er für die Nutzung als Speiseöl wichtig und dient Bienen als Nahrungsquelle⁶.

Es wird zwischen Winterraps, der im Herbst ausgesät wird, und Sommerraps unterschieden. In Deutschland wird fast ausschließlich Winterraps angebaut. Raps benötigt tiefgründige Lehmböden, d. h. er hat ähnliche Ansprüche wie Weizen. Er ist nicht mit sich selbst verträglich, d. h. er kann erst nach drei bis vier Jahren wieder auf dem selben Feld angebaut werden. Wird dies nicht beachtet, ist der verstärkte Einsatz von Pflanzenschutzmitteln erforderlich. Auch mit Kohllarten verträgt er sich schlecht. In der Konsequenz könnten theoretisch nur max. ca. 25 % der Anbaufläche mit Raps bestellt werden⁷. Im Jahr 2007/08 wurden 11,8 % der Anbaufläche mit Raps bestellt, die UFOP empfiehlt ca. 15 % der Anbaufläche, um die erhöhte Nachfrage zu befriedigen⁸. Da ein großer Teil der Frucht (Wurzel, Stroh) im Boden verbleibt, fördert Raps die Bodenfruchtbarkeit. Die Wurzeln, besonders bei Sommerraps lockern den Boden. Raps eignet sich in der Fruchtfolge mit Weizenkulturen, Mais oder Wintergerste¹⁴. Durch die lange Vegetationsperiode bei der Fruchtfolge beugt Raps durch die Bodenbedeckung der Bodenerosion vor.

⁴ <http://www.bafz.de/baz2006V4/index.php?id=361>

⁵ <http://de.wikipedia.org/wiki/Biodiesel>

⁶ <http://de.wikipedia.org/wiki/Raps>

⁷ http://www.lfl.bayern.de/publikationen/datenerfassung/informationen_url_1_0.pdf

⁸ <http://www.veredlungsproduktion.de/pages/de/rapsnews/cpd/>

1600.html?ls=b70b2392b65df5048d7b79536a2785b0

Im Ökolandbau liegen durch den erhöhten Unkraut- und Schädlingsdruck die Erträge nur bei etwa der Hälfte¹⁴. Der Anteil der ökologischen Rapsanbaufläche liegt in Deutschland nur bei 0,3 %¹⁴.

Raps benötigt viel Wasser und Düngemittel (Stickstoff, Kalium und Schwefel) und wird im konventionellen Anbau mit Herbiziden gespritzt. Im Bioanbau wird Unkraut durch die Maschinenhacke eingedämmt. In Deutschland wird Raps meist in der 2. Julihälfte geerntet. Es werden in Deutschland fast nur Erucasäure-arme 00-Rapssorten angebaut. Problematisch sind beim Rapsanbau der Düngereinsatz und das Auslaugen der Böden sowie die Lachgasemissionen durch mikrobiellen Stickstoffabbau im Boden. Letzteres führt zu einem hohen Emissionsfaktor beim CO₂-Äquivalent⁹ (siehe unten). Lachgas wird in der Landwirtschaft in Deutschland im Umfang von ca. 74.000 Tonnen pro Jahr emittiert (entspricht 23 Mio. Tonnen CO₂)¹⁰.

Ein Problem sind auch die Monokulturen beim Rapsanbau. Dies kann durch Mischfruchtanbau aber vermindert werden, zumal Raps durch seine tief reichenden Wurzeln als Vorfrucht für Getreide geeignet ist¹¹.

Raps als nachwachsender Rohstoff wurde in Deutschland im Jahr 2007 auf 1,22 Mio. Hektar angebaut (+10 % gegenüber 2006), davon 900.000 Hektar für Biodiesel¹². Eine andere Quelle nennt 1,5 Mio. ha Anbaufläche aus der unter anderem 0,7 Mio. t naturbelassenes Pflanzenöl geerntet bzw. gewonnen wurden (28 PJ)¹³. Die wichtigsten Anbauländer sind Mecklenburg-Vorpommern, Brandenburg und Sachsen-Anhalt. Weltweit sind es die EU, China, Kanada und Indien; Deutschland ist der größte Produzent in Europa (40 %). Das Bundesministerium für Bildung und Forschung schätzt, dass die deutsche Rapsanbaufläche auf max. 1,6 bis 1,8 Mio. Hektar aufgebaut werden könnte, als Energiepflanze stünden dann ca. 1,5 Mio. Hektar zur Verfügung (ca. 2 Mio. t Biodiesel)¹².

Der Ertrag für Winterraps liegt in Deutschland bei ca. 3,5 t/Hektar¹⁴ (entspricht 1400 Liter Rapsöl), der Ölgehalt liegt bei 45 – 50 %. Raps hat weltweit einen Anteil an der Ölsaatenproduktion von 12,4 % (2006). 2007 wurden 49,3 Mio. t Rapssaat weltweit geerntet.

5.2 Rapsanbau kontra Nahrungsmittelproduktion

In den letzten Jahren wird verstärkt die Frage diskutiert, wie weit der Anbau von Energiepflanzen das Angebot an Nahrungsmitteln verringert und dadurch die Lebensmittelpreise erhöht. An dieser Stelle können nur einige Aspekte dieser Thematik wiedergegeben werden und die Darstellung kann keinen Anspruch auf Vollständigkeit erheben.

Grundsätzlich gilt, dass Flächen, auf denen Energiepflanzen angebaut werden, nicht für die Nahrungsmittelerzeugung verwendet werden können. In der EU sind jedoch mehrere Millionen Quadratkilometer Ackerland stillgelegt, die für Energiepflanzen zur Verfügung stehen.

⁹ <http://www.zeit.de/online/2008/15/biosprit-kommentar>

¹⁰ http://www.wwf.de/fileadmin/fm-wwf/pdf_neu/Hintergrund_-_Methan_und_Lachgas_-_Die_vergessenen_Klimagase.pdf

¹¹ http://www.bundesverband-pflanzenoel.de/pdf/ENERGIE_2.PDF

¹² <http://www.biosicherheit.de/de/raps/landwirtschaft/50.doku.html>

¹³ Lenz, Edel, Kaltschmitt: „Erneuerbare Energien“ in BWK Bd. 60, Nr. 4/2008

¹⁴ <http://www.biosicherheit.de/de/raps/landwirtschaft/85.doku.html>

Für die Preissteigerungen bei bestimmten Nahrungsmitteln der letzten Zeit wird von einigen Quellen die erhöhte Nachfrage nach Energiepflanzen verantwortlich gemacht¹⁵, andere führen als Gründe die weltweiten Trockenperioden und Starkregenfälle, steigende Energiekosten sowie die veränderten Ernährungsgewohnheiten in den Schwellenländern an. Außerdem wird vermehrt mit Nahrungsmitteln spekuliert, und die Lagerkapazitäten wurden wegen gekürzter Lagersubventionen vermindert¹⁶. Laut EMPA¹⁷ ist die energetische Nutzung von Agrarfrüchten als Energiequelle nur zu einem kleinen Teil an den Preissteigerungen der letzten Zeit beteiligt. Dennoch sollte die Konkurrenz zwischen Energiepflanzenproduktion und der Erzeugung von Nahrungsmitteln weiter kritisch erforscht werden. Hier ist auf eine sparsame Nutzung der biogenen Energieträger zu achten (siehe auch Kapitel 6.2). Für die Rapsölversorgung in der Rotlintstraße sollte vor allem auf Rapsöl mit Nachhaltigkeitszertifikat geachtet werden.

Die Diskussion der letzten Zeit um den ökologischen Nutzen der Beimischung von Biokraftstoffen zu Benzin und Diesel für Kraftfahrzeuge muss getrennt von der energetischen Nutzung von Rapsöl für die gekoppelte Wärme- und Stromerzeugung gesehen werden. Einerseits sind die Wirkungsgrade bei der Nutzung in Blockheizkraftwerken deutlich höher als in Kraftfahrzeugen, andererseits treten bei der Produktion von Biokraftstoffen weitere ökologische Probleme zutage. Biokraftstoffe werden neben Raps auch aus Palmöl hergestellt, für das z. T. durch Brandrodung in den Tropen Flächen geschaffen werden. Biosprit aus Palmöl ist aus diesem Grund kritischer zu bewerten als einheimisches Rapsöl aus nachhaltigem Anbau. Trotzdem wird unter bestimmten Randbedingungen auch die Palmölnutzung vom Umweltverband WWF befürwortet¹⁸ (weitere Informationen zur Palmölnutzung¹⁹). Greenpeace schätzt, dass ca. 20 % des Biodiesels in Deutschland bereits nicht mehr aus einheimischem Raps sondern aus Soja stammen, da der Rapsanbau kaum ausgedehnt werden kann²⁰.

Die Bundesregierung hat ein Zertifikat für nachhaltig erzeugte Biotreibstoffe einführt²¹, um ökologische Probleme, wie den Verlust von Ackerflächen für die Nahrungsmittelproduktion und die Brandrodung, zu begrenzen. Die flächendeckende Umsetzung kann jedoch noch einige Jahre dauern. Weiterhin hat der WWF Deutschland Nachhaltigkeitskriterien für Biokraftstoffe aufgestellt²² ²³ und ein Positionspapier zur Ernährung und energetischen Biomassenutzung erstellt²⁴. Grundsätzlich sollte Rapsöl aus Deutschland oder aus der EU bezogen werden und diese Nachhaltigkeitskriterien erfüllen.

¹⁵ Die „Tortillia-Krise“ 2007 in Mexiko wird auf die erhöhte Nachfrage der USA nach Mais für die Bioethanolgewinnung zurückgeführt <http://www.tagesspiegel.de/weltspiegel/die-tortillakrise/806060.html>

¹⁶ http://www.nzz.ch/magazin/dossiers/podium_rohstoffe/agrarische_rohstoffe/preisboom_bei_den_agrarischen_rohwaren_1.598085.html

¹⁷ Medienmitteilung der EMPA zum Wissenschaftsapero zum Thema Biokraftstoffe am 09.06.08 in St. Gallen

¹⁸ http://www.wwf.de/fileadmin/fm-wwf/pdf_neu/HG_Palmoel.pdf

¹⁹ http://www.wwf.de/fileadmin/fm-wwf/pdf_neu/wwf_palmoelstudie_deutsch.pdf

²⁰ http://www.greenpeace.de/fileadmin/gpd/user_upload/themen/waelder/FS_Agrosprit_0803.pdf

²¹ <http://www.zeit.de/online/2008/15/biosprit-kommentar>

²² http://www.wwf.de/fileadmin/fm-wwf/pdf_neu/WWF_Biokraftstoffquote.pdf

²³ <http://www.wwf.de/fileadmin/fm->

[wwf/pdf_neu/Nachhaltiger_Anbau_und_energetische_Verwertung_von_Biomasse_WWF-Flyer.pdf](http://www.wwf.de/fileadmin/fm-wwf/pdf_neu/Nachhaltiger_Anbau_und_energetische_Verwertung_von_Biomasse_WWF-Flyer.pdf)

²⁴ http://www.wwf.de/fileadmin/fm-wwf/pdf_neu/nachhaltige_biomasse.pdf

5.3 Einschätzungen zur Rapsölnutzung

Wollte man den gesamten jährlichen Verbrauch an Diesel und Heizöl EL in Deutschland mit Biodiesel aus Rapsöl erzeugen, wäre ca. das Fünffache der Gesamtfläche Deutschlands erforderlich²⁵. Dies zeigt, dass Rapsöl eine, aber nicht DIE regenerative Energiequelle für Gebäude darstellen kann. Es wird stattdessen immer ein Mix verschiedener regenerativer Energieträger nötig sein. Ob die energetische Rapsölnutzung grundsätzlich ein gangbarer Weg ist, soll im Folgenden auf Basis der Einschätzungen verschiedener Autoren beleuchtet werden.

Laut Eurosolar ist beim Einsatz von Biokraftstoffen die regionale Kreislaufwirtschaft wichtig. "Ob Nahrungs- oder Energiepflanzen – alles kann kurzsichtig und umweltschädlich oder weitblickend und nachhaltig angebaut werden. Entscheidend ist nicht, ob Biokraftstoffe eingesetzt werden, sondern mit welchen Produktions- und Vermarktungskonzepten und mit welchen politischen Förderprogrammen das geschieht"²⁶. Die Beimischung zu Kraftstoffen wird als ökologisch nachteilig eingeschätzt.

Laut UBA-Experte Ostermeier ist die stationäre Nutzung aus ökologischer Sicht die sinnvollste Nutzung erneuerbarer Rohstoffe²⁷. Auch der WWF sieht Vorteile in der direkten und regionalen energetischen Nutzung von Biomasse²⁸. Greenpeace fordert, Biotreibstoffe statt in Autos, für die Erzeugung von Strom und Wärme einzusetzen^{29 30} und strenge und verbindliche Nachhaltigkeitskriterien einzuführen³¹. Außerdem sollen die Ackerflächen zum Anbau von Energiepflanzen auf ökologische Landwirtschaft umgestellt werden und Erweiterungen der Ackerflächen zum Energiepflanzenanbau nur durchgeführt werden, wenn sie notwendig sind, um die Ertragseinbußen durch Umstellung auf ökologische Landwirtschaft auszugleichen, so dass die derzeit bestehenden Anlagen zur Biogas- und Biokraftstoffherzeugung, die auf die Nutzung von Energiepflanzen angewiesen sind, auch weiterhin betrieben werden können³².

5.4 Klimarelevanz der energetischen Nutzung von Rapsöl

Es gibt eine Reihe von Studien bzw. Ökobilanzen zur energetischen Relevanz von Rapsöl, besonders für den Einsatz als Biodiesel bzw. als Rapsölmethylester (RME). Meist wird betont, dass die ökologische Bilanzierung von Biotreibstoffen noch am Anfang steht³³ bzw.

²⁵ <http://de.wikipedia.org/wiki/Biodiesel>

²⁶ http://www.eurosolar.de/de/index.php?option=com_content&task=view&id=854&Itemid=213

²⁷ <http://www.heise.de/tp/r4/artikel/23/23169/1.html>

²⁸

<http://www.wwf.de/fileadmin/fm->

[wwf/pdf_neu/Nachhaltiger_Anbau_und_energetische_Verwertung_von_Biomasse_WWF-Flyer.pdf](http://www.wwf.de/fileadmin/fm-wwf/pdf_neu/Nachhaltiger_Anbau_und_energetische_Verwertung_von_Biomasse_WWF-Flyer.pdf)

²⁹ http://www.greenpeace.de/themen/energie/erneuerbare_energien/artikel/biomasse/

³⁰ <http://www.zeit.de/online/2007/39/Biosprit?page=1>

³¹ http://www.greenpeace.de/fileadmin/gpd/user_upload/themen/waelder/FS_Agrosprit_0803.pdf

³² http://www.greenpeace.de/themen/energie/erneuerbare_energien/artikel/biomasse/

³³ Zah, Böni, Gauch, Hirsch, Lehmann, Wäger: „Ökologische Bewertung von Biotreibstoffen“, Schlussbericht, EMPA, St. Gallen, 2007

sich die Aussagen widersprechen³⁴. Besonders die Wahl der Systemgrenzen, die Berücksichtigung der Fruchtfolgen und die Bewertung der Koppelprodukte beeinflussen das Ergebnis nennenswert. Meist werden biogene Energieträger relativ zu Benzin bzw. Diesel bewertet. Dabei werden neben dem Treibhauspotenzial eines Energieträgers meist weitere Größen wie Primärenergiebilanz, Versauerung, Schädigung der Ozonschicht, Ökotoxizität, Pflanzenschutz oder Nährstoffbilanz betrachtet. Es existieren aber bisher kaum übergreifende Bewertungsverfahren, die verschiedene Bewertungsraster zusammenführen. Dies kann bedeuten, dass ein Energieträger, der beim Treibhauspotenzial besser abschneidet als ein Referenzstoff, bei einer anderen Betrachtungsgröße schlechter abschneidet.

Um trotzdem zu Aussagen zu gelangen, sind die wichtigsten Kriterien für eine Bewertung festzulegen, wenn diese durchgeführt werden soll. Zurzeit scheint es am sinnvollsten zu sein, das Treibhauspotenzial und die Primärenergiebilanz aus den Ergebnissen für eine Bewertung in den Vordergrund zu stellen, da hierfür die umfangreichsten Daten vorliegen. Die weiteren Kriterien z. B. NO_x-Emissionen dürfen dabei aber nicht aus dem Auge verloren werden.

In ³⁵ wird zusammenfassend auf Basis verschiedener internationaler Untersuchungen festgestellt, dass das Treibhausminderungspotenzial durch die Nutzung von Biomasse tendenziell überschätzt wird. Dennoch wird die Nutzung im BHKW positiv bewertet: „Die stationäre Nutzung zeigt besonders bei der Wärmenutzung bzw. bei kombinierter Wärme- und Stromnutzung gute THG-Einsparpotenziale“.

5.5 Berechnung von CO₂-Emissionsfaktoren mit GEMIS

Um verschiedene Energieversorgungsstrategien mit Rapsöl vergleichen zu können, sollen im Folgenden eigene Berechnungen von Kohlendioxid-Äquivalenten und kumuliertem Energieaufwand mit dem Gesamt-Emissions-Programm [GEMIS] dokumentiert werden. Es werden dabei Standard-Prozesse aus GEMIS verwendet und nur dahingehend von den GEMIS-Vorgaben abgewichen, dass der Wirkungsgrad der Rapsöllumwandlung auf 100 % gesetzt wurde, da nur die Vorketten bilanziert werden sollen.

Die Prozesskette für die Rapsöl-Produktion (Abb. 5.5-1) besteht aus den Hauptkomponenten Anbau der Rapskörner (unter Verwendung von Pflanzenschutzmitteln, N-P-K-Ca-Dünger und Dieseleinsatz für den Transport), Lagerung und Trocknung von Raps auf dem Hof (unter Einsatz von elektrischer Energie und leichtem Heizöl), Herstellung von Rapsöl (mit Transport über 240 km und unter Zugabe von Zitronensäure, Bleicherde und Hexan sowie elektrische Energie und Prozesswärme aus einem deutschen Industriewärme-Mix). Als Gutschrift wird bei einigen Varianten die Verwendung des Rapsextraktionsschrots als Futtermittel anstelle von (amerikanischem) Sojaschrot angesetzt. Im letzten Schritt wird das Rapsöl zum Verbraucher transportiert (100 km) und energetisch genutzt. Hier fallen lokale Emissionen (am Ort der Verbrennung) an, die zusammen mit den vorgelagerten Emissionen betrachtet werden müssen.

³⁴ Remmele, Widmann: „Positionspapier Rapsölkraftstoff“, Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe, Straubing, 2004

³⁵ Faulstich, Greiff: „Was kann die Biomasse in Deutschland leisten?“ in „Biomasse, Biogas, Biotreibstoffe ... Fragen & Antworten“, ATZ Entwicklungszentrum, Sulzbach-Rosenberg, 2007, S. 70-91

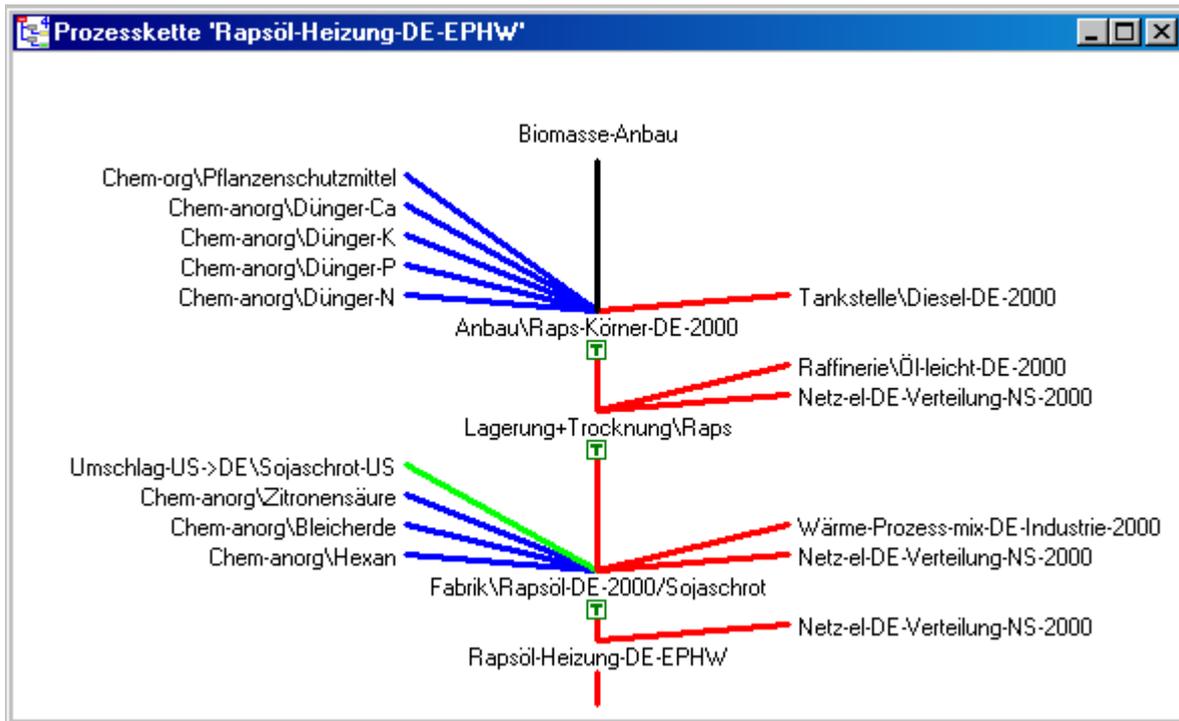


Abb. 5.5-1: Prozesskettenbild für die Nutzung von Rapsöl endenergetisch frei Haus, ohne Berücksichtigung der Umwandlungsverluste im Heizkessel und dem Hilfsstromeinsatz im Gebäude [GEMIS]

Das Basisjahr für die Berechnungen des Aufwands für den Rapsöleinsatz ist das Jahr 2000. Bei den Prognosen für die Jahre 2010, 2020 und 2030 sind vor allem höhere Erträge pro Hektar, aber auch verbesserte Produktions- und Umwandlungstechniken unterstellt.

Die Treibhausgasfaktoren in Abb. 5.5-2 wurden nach IPCC 2001 über einen Bilanzzeitraum von 100 Jahren berechnet. Alternativ zur Gutschrift des Sojaschrots kann auch das Rapsextraktionsschrot weiter mit bilanziert werden (Variante brutto), das Koppelprodukt wird dann nicht explizit berücksichtigt.

Man sieht, dass Rapsöl, obwohl nachwachsender Rohstoff, keine neutrale CO₂-Bilanz besitzt, wenn alle Gase berücksichtigt werden, die eine Treibhauswirkung besitzen. Die Anbaumethode von Raps wirkt sich direkt auf die damit verbundenen Treibhausgasemissionen aus. Während im konventionellen Anbau ca. 222 g/kWh_{End} entstehen, liegt der Wert bei ökologischem Anbau ohne mineralische Dünger bei nur 81 g/kWh_{End}. Die Gutschrift von Rapsextraktionsschrot als Futtermittel reduziert die Emissionen beim konventionellen Anbau auf 144 g/kWh_{End} (für Jahr das 2010) und auf 18 g/kWh_{End} beim ökologischen Anbau. Beim konventionellen Anbau sind keine nennenswerten Reduktionen der Emissionen in den nächsten Jahren zu erwarten, während beim ökologischen Landbau leichte Reduktionen prognostiziert werden.

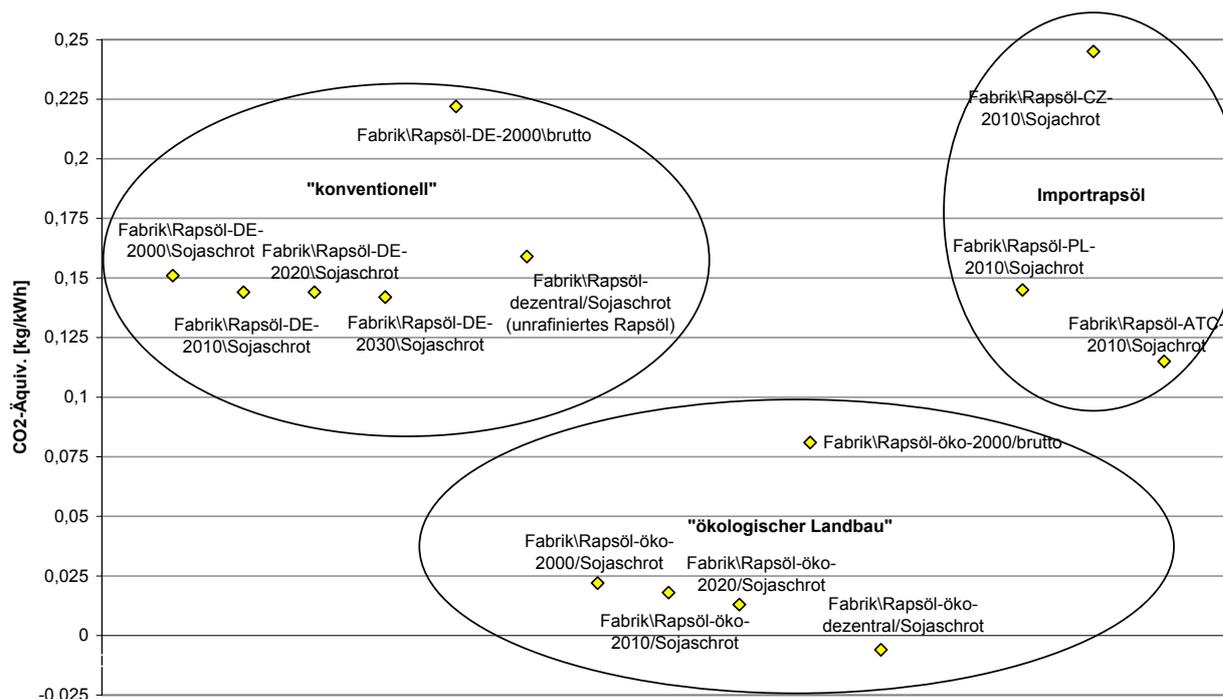


Abb. 5.5-2: Treibhausgas-Emissionsfaktoren für Rapsöl unterschiedlicher Herstellung und Herkunft

Bei der Herstellung und Nutzung von Rapsöl entsteht mit ca. 0,137 kWh/kWh aber nur ein geringer nicht erneuerbarer Energieaufwand ($KEA_{\text{nicht erneuerbar}}$) im konventionellen Landbau. Beim ökologischen Landbau liegt dieser Wert bei nur 0,068 kWh/kWh. Die Primärenergiebilanz von Rapsöl ist somit günstig, so dass der Rapseinsatz zur Substitution fossiler Energieträger dienen kann.

Eine Studie im Auftrag des wissenschaftlichen Beirats Globale Umweltveränderungen³⁶ untersuchte darüber hinaus die Auswirkungen von direkten und indirekten Landnutzungsänderungen auf die Treibhausbilanz von Rapsöl. Die Studie kommt zu dem Schluss, dass abhängig von der unterstellten Landnutzungsänderung durch den Rapsölanbau noch deutlich höhere Treibhausgas-Emissionen bei der Rapsölproduktion berücksichtigt werden müssen (189 g/kWh bis 934 g/kWh), wenn z. B. Wiesen für den Rapsanbau umgewandelt werden und ein hoher Anteil von direkten und indirekten Auswirkungen von Landnutzungsänderungen angesetzt wird). Diese Landnutzungsänderungen sind jedoch geringer, wenn Raps aus lokalem Anbau ohne nennenswerte Verdrängungseffekte bei der Nahrungsmittelproduktion auf Stilllegungsflächen erfolgt.

Unabhängig davon schreibt der Gesetzgeber in § 27 des Erneuerbaren Energien-Gesetzes bzw. Anlage 2 dieses Gesetzes vor, dass die erhöhten Vergütungen für Strom aus Biomasse an die Einhaltung der Kriterien der Biomassestrom-Nachhaltigkeitsverordnung (BioST-NachV³⁷) geknüpft werden. Dadurch ist es sowohl aus ökologischer, als auch aus ökonomischer Sicht sinnvoll, nur noch nachhaltig erzeugtes Rapsöl zu verwenden. Dann werden die oben zitierten Treibhausgasemissionen durch Landnutzungsänderungen

³⁶ Uwe R. Fritsche, Kirsten Wiegmann: Ökobilanzierung der Umweltauswirkungen von Bioenergie-Konversionspfaden, Studie im Auftrag des wissenschaftlichen Beirats Globale Umweltveränderungen, Darmstadt, Berlin 2008

³⁷ Biomassestrom-Nachhaltigkeitsverordnung (BioSt-NachV) in der Fassung vom 23.07.2009

begrenzt, ohne dass die genauen Werte gegenwärtig abgeschätzt werden könnten. Im Sommer 2010 befindet sich das Zertifizierungssystem für Rapsöl jedoch noch im Aufbau, so dass der ursprüngliche Start der Verordnung vom 01.07.2010 auf 01.10.2011 verschoben wurde³⁸. Es wird aber erwartet, dass bis zu diesem Stichtag ein entsprechendes Zertifizierungssystem aufgebaut ist³⁹.

In den weiteren Berechnungen wird auf Basis von Abb. 5.5-2 für konventionell angebauten Raps ein Emissionsfaktor für Rapsöl für das Jahr 2010 von 144 g/kWh_{End} und ein kumulierter Energieaufwand von 0,137 kWh_{Primär}/kWh_{End} verwendet. Im Vergleich dazu ergeben sich für Erdgas Treibhausgasemissionen von 244 g/kWh_{End} und ein kumulierter Energieaufwand von 1,12 kWh_{Primär}/kWh_{End}.

5.6 Fazit Rapsölanbau

Die Analysen der Prozessketten von Rapsöl haben ergeben, dass mit Rapsöl Primärenergie gegenüber fossilen Energieträgern einspart werden kann. Dem Einsatz von Rapsöl in Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen sollte aufgrund der deutlich höheren Nutzungsgrade gegenüber mobilen Anwendungen der Vorzug gegeben werden, wobei eine nennenswerte Ausweitung der Anbaufläche in Deutschland kaum möglich (Fruchtfolge) bzw. sinnvoll (Nahrungsmittelproduktion, Nachhaltigkeit) erscheint, so dass aufgrund gesetzlicher Vorgaben zur Beimischung zum Diesel hier ein Nutzungskonflikt besteht, der gelöst werden muss. Rapsöl besitzt ein nicht vernachlässigbares Treibhausgas-Potenzial, dessen Höhe je nach Anbaumethode und Ort deutlich variiert. Die oberste Prämisse muss daher lauten, so wenig Rapsöl wie möglich einzusetzen (siehe folgendes Kapitel), und das verwendete Rapsöl sollte aus lokalen Quellen stammen und ein Nachhaltigkeitszertifikat aufweisen.

³⁸ http://www.biomassestrom-nachhaltigkeitsverordnung.de/biost-nachv_gesetz_verschoben.php

³⁹ http://www.proplanta.de/Agrar-Nachrichten/Energie/Trotz-neuen-Termins-fuer-Nachhaltigkeitszertifikate-keine-Zeit-zum-Ausruhen_article1272459206.html

6 Null-Emissions-Ansatz für Gebäude

6.1 Definition von Null-Emissions-Gebäuden: Konzepte und Probleme

Das Ziel einer langfristigen Umwelt- und Klimapolitik sollte es sein, den Energieverbrauch der unterschiedlichsten Dienstleistungen wie Wohnen, Mobilität, Ernährung und Konsum so weit wie möglich zu reduzieren und auch die mit Gebäuden, Tätigkeiten und Anlagen verbundenen Emissionen (Treibhausgase, Stickoxide, Lärm, etc.) zu minimieren. Idealzustand einer solchen Entwicklung wäre folgerichtig ein Leben ohne schädliche Emissionen. Dieses Ziel kommt im Begriff „Nullemission“ bzw. „Zero Emission“ zum Ausdruck, der heute in ganz unterschiedlichen Zusammenhängen verwendet wird („Zero Emission Vehicles“, „Nullemissionsfabrik“), in jedem Fall aber ein Leitmotiv für eine ehrgeizige, dauerhafte Lösung der Umweltprobleme darstellt.

In [Diefenbach 2002a] bzw. [Sturm 2009] wird die Vision der „Null-Emissions-Stadt“ als zukünftiger Forschungsgegenstand untersucht. Dabei wird deutlich, dass es sich hier um eine sehr komplexe Problematik handelt und bereits die Definition des Begriffs „Null-Emission“ eine ganze Reihe von Fragen aufwirft. Die vorliegende Untersuchung orientiert sich in vielen Punkten an Grundgedanken der Studie zur Null-Emissions-Stadt, allerdings sind für das Herunterbrechen auf die kleine räumliche Einheit des Einzelgebäudes spezielle Überlegungen notwendig.

Zunächst ist dabei zu berücksichtigen, dass der Begriff nicht neu ist: In einer ganzen Reihe von Projekten auf nationaler und internationaler Ebene ist bereits von „Null-Emissions-Häusern“ oder „Null-Energie-Häusern“ die Rede⁴⁰. Die Thematik wird beispielsweise in dem bundesweiten Forschungsförderprogramm „Energieoptimiertes Bauen“ aufgegriffen⁴¹. Auch auf europäischer Ebene gewinnt sie aktuell sehr an Bedeutung, da in der Novelle der neuen Richtlinie zur Gesamteffizienz von Gebäuden explizit vorgesehen ist, dass ab 2021 alle Neubauten als „Niedrigstenergiegebäude“ errichtet werden müssen⁴².

Als eine besonders konsequente Realisierung des „Null-Emissions“-Gedankens kann das „energieautarke Haus“ gelten, das keinen Anschluss mehr an ein äußeres Energieversorgungsnetz besitzt, sondern sich mit Hilfe der eingestrahelten Sonnenenergie komplett selbst versorgt. Die technische Möglichkeit eines solchen Gebäudes wurde bereits vor einigen Jahren vom Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme demonstriert⁴³, allerdings

⁴⁰ Die beiden Begriffe sind in der Regel ungefähr gleichwertig, da die Betrachtung der Emissionen zumeist auf die durch Energieverbrauch erzeugten Treibhausgase beschränkt ist.

⁴¹ Bundesministerium für Wirtschaft (2006): Förderkonzept „Energieoptimiertes Bauen“. Als Beispiele für internationale Projekte seien Siedlungskonzepte in Abu Dhabi und China genannt, über die auch in den Medien berichtet wurde (Pressemitteilung des Fraunhofer IBP vom 30.06.2009, http://www.welt.de/politik/article2145033/China_plant_erste_Oeko_Stadt_ohne_CO2_Verbrauch).

⁴² Die genaue Ausgestaltung des Begriffs „Niedrigstenergiehaus“ ist laut nationale Aufgabe und steht noch aus (Richtlinie 2010/31/EU im Amtsblatt der Europäischen Union vom 18.06.2010).

⁴³ K. Voss: Konzeption und Bau eines energieautarken Solarhauses, Fraunhofer ISE, Freiburg/Brsg., 1997

handelt es sich hier um ein reines Forschungsprojekt: Der Ansatz erscheint wegen der damit verbundenen Kosten und des Materialeinsatzes in unserem Klima nicht als praxistauglich⁴⁴. Das heißt nun aber, dass die heute im Hinblick auf eine breitere Umsetzung diskutierten Konzepte für Null-Energie- bzw. Null-Emissions-Häuser nicht ohne eine äußere Energiezufuhr auskommen. Beispielsweise muss elektrischer Strom aus dem öffentlichen Netz oder Erdgas zur Heizung an den kältesten Tagen bezogen werden, beides ist aber mit Treibhausgasemissionen verbunden. Das Null-Emissionsziel kann jetzt also nur noch „per Saldo“ auf dem Weg der Kompensation erreicht werden⁴⁵. Damit ist gemeint, dass beispielsweise eine Photovoltaikanlage am Gebäude im Jahresmittel genau so viel Strom erzeugt und in das öffentliche Netz einspeist, wie zu anderen Zeiten daraus bezogen werden muss. Auch ein (geringer) Erdgasverbrauch kann mit dieser Stromgutschrift ausgeglichen werden, wenn durch den verbleibenden Überschussstrom mehr Primärenergie bzw. Treibhausgasemissionen im allgemeinen Kraftwerkspark eingespart werden, als durch das Gebäude verursacht⁴⁶.

Als eine schlüssige Definition des „Null-Emissions-Hauses“ ist ein solcher Ansatz allerdings für sich genommen noch nicht geeignet. Er kann nicht beliebig verallgemeinert werden, denn es gilt: CO₂-Emissionen, die einmal freigesetzt wurden, lassen sich nicht zurückholen. Durch das Zulassen von Kompensationsmaßnahmen wie die erwähnten Stromgutschriften ist sozusagen die Tür dafür geöffnet, auch Gebäudekonzepte mit einzubeziehen, die keineswegs als konsequente oder wegweisende Lösungen der Umweltprobleme gelten können: Wie wäre z. B. ein Gebäude zu beurteilen, bei dem der Wärmedämmung kaum Aufmerksamkeit gewidmet wird und ein entsprechend hoher Erdgasverbrauch einfach durch eine entsprechend große Solarstromanlage kompensiert wird? Und könnte man nicht auch Investitionen in Windparks oder Aufforstungsprojekte oder ganz einfach den Einkauf von Emissionszertifikaten als Bonus verrechnen und so quasi jedes Gebäude unabhängig von seinem fossilen Brennstoffverbrauch zum „Null-Emissions-Haus“ machen?

Wird statt fossilen Brennstoffen Biomasse, also ein regenerativer Energieträger für die Wärmeversorgung verwendet, so sind ebenfalls noch nicht alle Probleme gelöst: Aufgrund der sehr begrenzten Biomassepotenziale ist auch dieser Lösungsansatz nicht beliebig verallgemeinerbar: Ein schlecht gedämmtes, mit Holz beheiztes Gebäude kann nicht als nachhaltig gelten.

Auch wenn es sich also bei den heute bekannten Null-Energie-/Emissions-Häusern in aller Regel sehr wohl um sehr konsequente und zukunftsweisende Energiespargebäude handelt, wird durch diese Überlegungen klar, dass eine eindeutige Definition dieses Begriffs schwierig ist, wenn sie sich nicht auf das aus heutiger Sicht praxisuntaugliche energieautarke Haus

⁴⁴ In diesem Zusammenhang ist aktuell auch das Solar-Decathlon-Haus der TU Darmstadt zu erwähnen. (Hegger, M.: Der Prototyp "Wohnen 2015" - Der Gewinner des Solar-Decathlon-Wettbewerbs, Vortrag auf dem EnOB-Symposium „Auf dem Weg zu Nullenergie-Gebäuden - Erfahrungen und Impulse aus dem Förderschwerpunkt Energieoptimiertes Bauen“, Dresden 01./02.10.2008). Dieses Gebäude konnte sich beim Solar-Decathlon-Wettbewerb in den USA zeitweise selbst versorgen, kann in unserem Klima aber nicht energieautark betrieben werden.

⁴⁵ Dies wird auch mit dem Begriff „net zero“ bzw. „Netto-Null“ umschrieben, vgl. Voss: „Net Zero-Energy Buildings“, Internationale Tagung „30 Jahre IEA Energieforschung Solarenergie und energieeffiziente Gebäude“ 11. Juni 2008, Graz

⁴⁶ Wenn die Photovoltaikanlage entsprechend groß ausgelegt wird, ist der Schritt zu einem Gebäude mit „positiver Energiebilanz“, das also per Saldo mehr fossile Energie bzw. Treibhausgasemissionen einspart, als es verursacht, nicht mehr weit. Der Begriff „Plusenergiehaus“ fällt in diesen Bereich.

beschränken will. Dieser Problematik ist man sich in der Forschung durchaus bewusst: Die Bilanzierung von Null-Energiehäusern wird in der Begleitforschung des Programms „Energieoptimiertes Bauen“⁴⁷, inzwischen auch im Rahmen von Aktivitäten der Internationalen Energieagentur intensiv behandelt⁴⁸. Eine allgemeine Definition geht aus den Quellen aber bisher nicht hervor.

Vor diesem Hintergrund stellt sich in dem vorliegenden Projekt die Aufgabe, einen praktikablen Ansatz für das Null-Emissions-Haus zu finden, der

- die Chancen aufgreift, die mit diesem Begriff verbunden sind, nämlich Hauseigentümer, Bauherren und ihren Planern einen Weg zu eröffnen und sie dazu zu motivieren, Gebäude zu errichten, die über bestehende zukunftsweisende Konzepte für Energiesparhäuser noch hinausgehen, indem sie sich so weit wie möglich aus erneuerbaren Energien versorgen und unvermeidliche „Rest“-Emissionen durch Zusatzmaßnahmen kompensieren.
- die Risiken vermeidet, die darin bestehen, durch zu offene Bilanzierungsregeln, beispielsweise im Hinblick auf Kompensationsmöglichkeiten und Gutschriften, auch wenig vorbildliche Gebäude mit in dem Begriff einzuschließen.

Es wurden daher Leitlinien formuliert, die sich an diesen Zielen orientieren und an denen das Bauvorhaben in der Rotlintstraße während der Planungsphase gemessen und in dieser Hinsicht optimiert wurde. Angesichts der komplexen und offenen Diskussion über Null-Energie- und Null-Emissions-Häuser geht es hier nicht darum, eine starre und allgemeinverbindliche Definition zu etablieren, sondern eine vorläufige aber praxisgerechte Richtschnur für das vorliegende und ähnliche Projekte zu liefern, die die genannten Probleme bei der Festlegung des Begriffs explizit berücksichtigt.

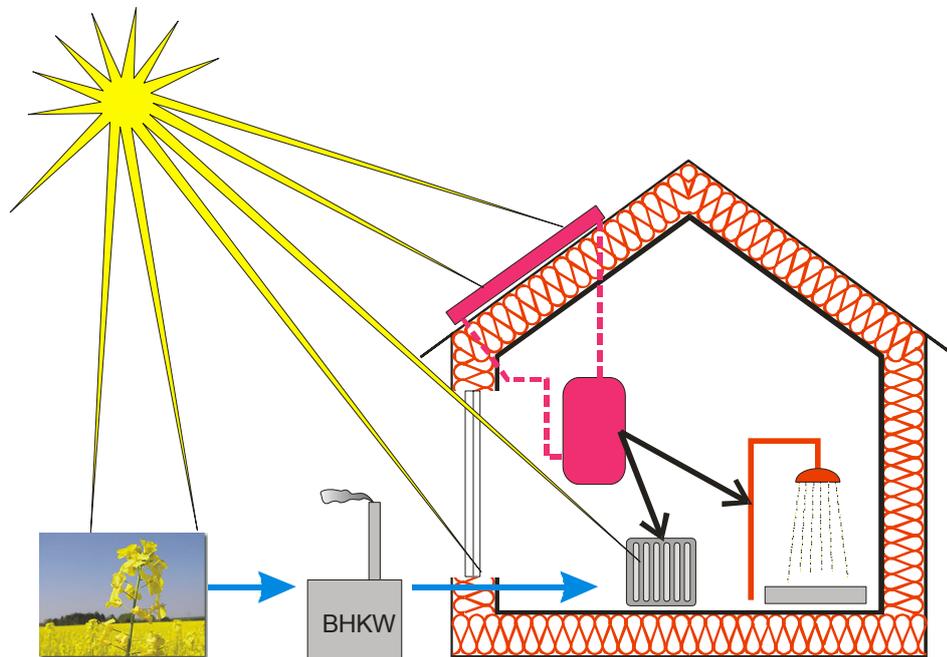


Abb. 6.1-1: Versorgung eines Null-Emissions-Gebäudes mit regenerativen Energien

⁴⁷ www.enob.info (Stand 10.10.2007): ENOB-Workshop diskutiert Messlatte für Nullenergie-Gebäude; Voss, K.: Was ist eigentlich ein Nullenergiehaus?, Beitrag zur 12. Passivhaustagung in Nürnberg 2008, Passivhaus Institut Darmstadt 2008;

⁴⁸ IEA Task 40, Annex 52 <http://www.ecbcs.org/annexes/annex52.htm>; Im Rahmen des Projekts wird auch eine Datenbank mit Null-Energie-Häusern erstellt (<http://iea40.buildinggreen.com/index.cfm>).

6.2 Leitlinien für das Null-Emissions-Haus

Als Null-Emissions-Haus bezeichnen wir ein zukunftsweisendes Energiespargebäude, das

1. den Verbrauch von Energie soweit wie möglich vermeidet⁴⁹,
2. seinen auf diese Weise minimierten Rest-Energiebedarf möglichst weitgehend aus erneuerbaren Energien deckt⁵⁰ und
3. schädliche Emissionen, die sich dennoch nicht vermeiden lassen, durch Zusatzmaßnahmen kompensiert.

Hinsichtlich des Bilanzraums wird Folgendes festgelegt:

- Die Betrachtung beschränkt sich auf die Wärmeversorgung des Gebäudes (Beheizung und Warmwasserversorgung), inklusive Lüftung und Klimatisierung (soweit vorhanden). Alle zugehörigen Hilfsstromverbräuche werden mit berücksichtigt.
Der Bilanzraum entspricht damit demjenigen der Energieeinsparverordnung. Eine Ausweitung auf den gesamten Energieverbrauch, d. h. bei Wohngebäuden die Hinzuziehung des Haushaltsstromverbrauchs, ist als darüber hinaus gehende, ehrgeizigere Zielvorgabe natürlich grundsätzlich denkbar.
Wir verzichten hier darauf, da auch der gewählte Ansatz bereits eine erhebliche Herausforderung für Null-Emissions-Haus-Konzepte darstellt. Im Mietwohnbereich stellt sich im Übrigen dem Wunsch, den Haushaltsstrom mitzubetrachten, die Schwierigkeit entgegen, dass die Haushaltsgeräte ja im Allgemeinen von den Mietern selbst mitgebracht bzw. beschafft werden, sich die Verbrauchshöhe vom Eigentümer also nur eingeschränkt beeinflussen lässt.
- Die Betrachtung beschränkt sich auf diejenigen Emissionen, die jedes Jahr während des Gebäudebetriebs entstehen. Das bedeutet, dass die Emissionen zur Herstellung von Energieversorgungsanlagen, Dämmstoffen oder gar des ganzen Gebäudes sowie der spätere Rückbau/Abriss nicht berücksichtigt werden⁵¹.

⁴⁹ Im Neubaubereich bedeutet dies in der Regel die Einhaltung des Passivhausniveaus (Heizwärmebedarf 15 kWh/m²a bezogen auf die Wohnfläche), im Gebäudebestand eine umfassende energetische Erneuerung der Gebäudehülle unter Ausschöpfung der baupraktisch realisierbaren Wärmeschutzpotenziale, in der Regel unter Einsatz von Passivhaus-Komponenten und einer Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung (Anhaltswerte für den erreichbaren Heizwärmebedarf im Altbau ca. 25 kWh/m²a (Mehrfamilienhäuser) bis 30 kWh/m²a (Einfamilienhäuser), wenn keine besonderen Restriktionen wie denkmalgeschützte Fassaden vorliegen).

⁵⁰ Im Fall der Biomasse wird dabei für die Wärmeversorgung die Einhaltung eines maximalen Budgets von etwa 35 kWh/m²a (bezogen auf die Wohnfläche) angestrebt, um dem Ziel eines nachhaltigen Umgangs mit dieser knappen Ressource Rechnung zu tragen (vgl. [Diefenbach 2002b]). Die Wärme aus mit fossilen Brennstoffen betriebenen Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen, deren Primärenergie- bzw. Emissionsfaktor unter Ansatz der Stromgutschriftmethode zu Werten nahe oder sogar unterhalb Null berechnet wurde und somit scheinbar einer regenerativen Wärmeerzeugung entspricht, ist beim Null-Energie-/Emissions-Haus weder als erneuerbare Energiequelle noch im Zusammenhang mit Kompensationsbetrachtungen anrechenbar. Dieses spezielle Problem der KWK-Bewertung wird ebenfalls in [Diefenbach 2002b] ausführlicher diskutiert.

⁵¹ Abweichend von diesem Grundsatz enthalten die Emissionsfaktoren aus GEMIS, die hier zur Bilanzierung der jährlich verbrauchten Endenergieträger verwendet werden, auch die entsprechende Herstellungsenergie-Anteile (z. B. zur Errichtung von Bohrplattformen oder Tankschiffen in der

Eine entsprechende Ausweitung des Bilanzraums wäre auch hier grundsätzlich denkbar, würde aber wiederum entsprechend noch ehrgeizigere Maßnahmen mit sich bringen.

- Die Betrachtung der Emissionen beschränkt sich auf die Summe der Treibhausgase, umgerechnet in CO₂-Äquivalente. Wenn statt des Null-Emissions- das Null-Energie-Haus betrachtet wird, ist die Primärenergie die maßgebliche Größe.

Grundsätzlich könnte die Betrachtung auch auf weitere Emissionen ausgeweitet werden (z.B. klassische Luftschadstoffe, Lärm). Dies erhöht dann aber die Komplexität der Problematik erheblich und es stellt sich die Frage, ob bei jeder Emissionsart tatsächlich eine Bilanzierung auf „Netto-Null“ sinnvoll und möglich ist.

- Grundsätzlich werden nur Maßnahmen berücksichtigt, die das Gebäude selbst oder dessen unmittelbare Umgebung⁵² betreffen. Maßnahmen, für die dies nur noch entfernt zutrifft, wie etwa der Bezug von Ökostrom, sind nur ausnahmsweise und in geringem Umfang anrechenbar, wenn trotz weitgehender Anstrengungen am Gebäude selbst das Ziel noch knapp verfehlt wurde⁵³.

Während der Bezug von Ökostrom noch einen geringen Bezug zum Gebäude aufweist (ein externer Strombezug ist ja für den Betrieb ohnehin notwendig, dessen Höhe begrenzt damit auch die maximal anrechenbare Ökostrom-Menge), ist dies bei noch weiter entfernt liegenden Maßnahmen (z. B. Aufforstungsprojekte, Aufkauf von Emissionszertifikaten) nicht mehr der Fall. Derartige Ansätze werden daher in der Bilanz nicht berücksichtigt.

Prozesskette Öl). Diese machen gegenüber den direkten Emissionen bei der Verbrennung fossiler Brennstoffe aber nur einen relativ geringen Anteil aus. Im Übrigen ist dieser Ansatz, die sozusagen „weiter vorgelagerten“ Herstellungsenergien zu berücksichtigen, auch in den im Rahmen der EnEV verwendeten Primärenergiefaktoren enthalten.

⁵² Die „unmittelbare Umgebung“ bezeichnet im Allgemeinen das Grundstück des Gebäudes, kann aber im Fall einer Nahwärmeversorgung der Siedlung auch die damit verbundenen Anlagen umfassen, z. B. eine solare Nahwärmeversorgung.

⁵³ An den „Ökostrom“ sind dabei entsprechend strenge Anforderungen zu stellen, insbesondere sollte nur als „100 % regenerativ“ zertifizierter Strom aus Neuanlagen berücksichtigt und damit also das Anrechnen von Strom aus ohnehin schon bestehenden Anlagen vermieden werden.

7 Energiebilanzberechnungen

Im folgenden Kapitel werden die Energiebilanzen der Gebäude vor und nach der energetischen Sanierung dargestellt.

7.1 Energiebedarf vor der Sanierung

Vor der Sanierung umfassten die Gebäude Rotlintstraße 116-128 insgesamt 54 Wohneinheiten mit einer gesamten Energiebezugsfläche von 3084 m². Mit Hilfe des Passivhaus-Projektierungs-Pakets (PHPP) wurden der Heizwärme-, der Endenergie- und der Primärenergiebedarf sowie die damit verbundenen Kohlendioxid-Emissionen berechnet (Abb. 7.1-1). Hierbei muss berücksichtigt werden, dass die realen U-Werte im Bestand nur in Näherung bekannt sind und mit Standardrandbedingungen von 20 °C Raumtemperatur und einem (Fenster-)Luftwechsel von 0,5 1/h gerechnet wurde. Die reale Situation vor der Sanierung ist jedoch nicht bekannt.

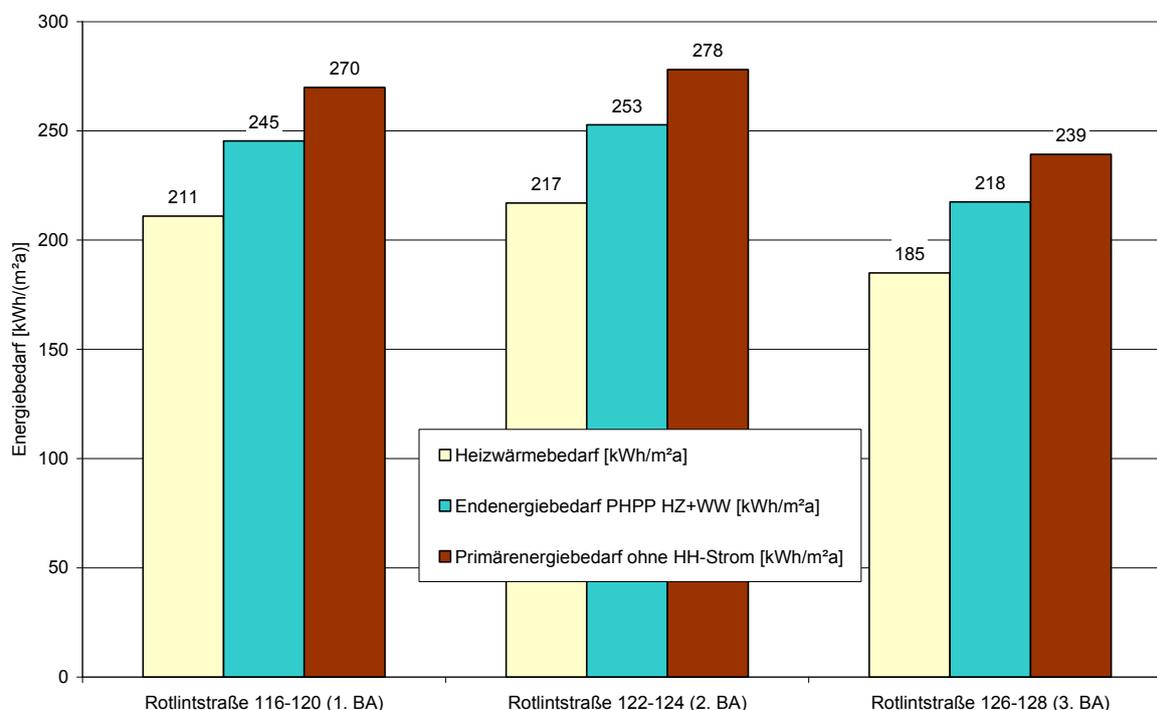


Abb. 7.1-1: Energiebedarf der Gebäude vor Sanierung

Es ergibt sich ein Heizwärmebedarf zwischen 185 kWh/m²a im fünfstöckigen 3. Bauabschnitt und 217 kWh/m²a im vierstöckigen 2. Bauabschnitt. Aufgrund der einheitlichen Beheizungsstruktur mit Gasetagenheizungen liegt der Endenergiebedarf inklusive Warmwasserbereitung (die mit 15,1 kWh/(m²a) berücksichtigt wurde) ca. 16 % über dem Heizwärmebedarf. Der Primärenergiebedarf liegt 28 % über dem Heizwärmebedarf und variiert zwischen 239 und 278 kWh/(m²a) (ohne Hilfs- und Haushaltsstrom). Die damit verbundenen Kohlendioxid-Emissionen liegen zwischen 54,4 kg/(m²a) und 63,2 kg/(m²a). In der Summe ergeben sich Kohlendioxid-Emissionen für die betrachteten Gebäude von 236 t/a (ohne Hilfs- und Haushaltsstrom).

Der mittlere Heizwärmebedarf erreicht mit 203 kWh/m²a einen für den deutschen Gebäudebestand typischen Wert. Mehrfamilienhäuser der Baualtersklasse 1949 - 1957 liegen im unsanierten Zustand bei 211 kWh/(m²a), so dass die Gebäude der Rotlintstraße als typische Vertreter dieser Baualtersklasse gelten können [Born 2003].

Wird der Endenergiebedarf für Heizung und Warmwasserbereitung nach dem Verfahren der Energieeinsparverordnung (EnEV) berechnet, ergeben sich Bedarfswerte zwischen 202 und 222 kWh/m²a. Die EnEV-Berechnungen liegen in diesem Fall somit niedriger als die Ergebnisse nach PHPP, jedoch muss berücksichtigt werden, dass die Kennwerte auf die größere Gebäudenutzfläche A_N bezogen sind.

7.2 Energieverbrauch vor der Sanierung

Der tatsächliche Energieverbrauch kann vom berechneten Energiebedarf erheblich abweichen, wenn abweichende Nutzungsbedingungen, z. B. andere Raumtemperaturen im Gebäude vorliegen, was bei Bestandsgebäuden häufig vorzufinden ist. Gemäß [Loga 2001] liegen bei Wohngebäuden in Folge unterschiedlicher Auswirkungen von Nachtabsenkung und räumlicher Teilbeheizung die mittleren Raumtemperaturen für unsanierte Bestandsgebäude bei etwa 16,5 bis 19 °C. Aus diesem Grund ist die Betrachtung der Verbrauchsdaten wichtig, um die spätere Einsparung realistisch einschätzen zu können.

Der örtliche Gasversorger hat die kumulierten Verbrauchsdaten der Gebäude Rotlintstraße 116-128 über drei Jahre von 2006 - 2008 für eine Auswertung zur Verfügung gestellt [Mainova]. Es liegen jedoch keine Informationen über Zeiten mit Leerstand vor, so dass zur Auswertung nur die ältesten Daten aus dem Jahr 2006 herangezogen werden. Danach ist damit zu rechnen, dass einzelne Wohnungen bereits wegen der bevorstehenden Sanierung nicht mehr vermietet wurden. Dies ist bei den besonders im Jahr 2008 stark abnehmenden Kennwerten zu vermuten.

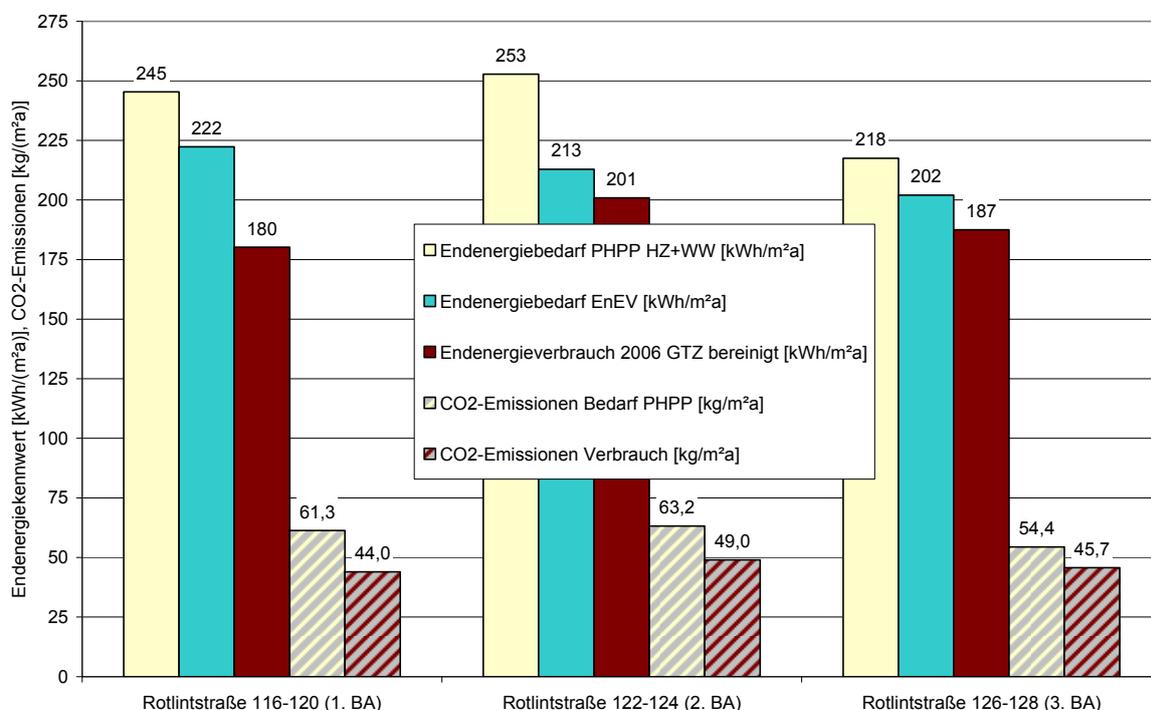
Es ergeben sich Endenergiekennwerte zwischen 167 und 186 kWh/(m²a) im Jahr 2006 für die verschiedenen Bauabschnitte (Tabelle 7.2-1). Da die Außentemperaturen höher lagen als im langjährige Mittel in Frankfurt, wurden die Verbrauchskennwerte mit dem angegebenen Gradtagkorrekturfaktor für eine Raumtemperatur von 20 °C und einer Heizgrenztemperatur von 15 °C bereinigt. Dabei wurde analog zu den Bedarfsberechnungen von einem konstanten Warmwasserverbrauch von 15,1 kWh/(m²a) ausgegangen, der vor der Korrektur herausgerechnet und erst danach wieder hinzuaddiert wurde.

Die bereinigten Verbräuche reichen im Jahr 2006 bei den einzelnen Blöcken von 180,2 bis 200,9 kWh/(m²a), im Mittel ergeben sich 189,5 kWh/(m²a). Damit liegen die bereinigten Verbrauchswerte 20 % unter den berechneten Bedarfswerten nach PHPP und 10 % unter den Werten nach EnEV. Diese Abweichung liegt im Rahmen der auch bei anderen Gebäuden gefundenen Differenz zwischen Bedarfs- und Verbrauchskennwert. Die Abb. 7.2-1 zeigt den Vergleich der Bedarfs- (PHPP und ENEV) und Verbrauchskennwerte für die Gebäude sowie die damit verbundenen CO₂-Emissionen.

In der Summe über die Gebäude Rotlintstraße 116-128 ergab sich ein Endenergieverbrauch von 584 MWh/a, bzw. ein Primärenergieverbrauch von 643 MWh/a. Die Kohlendioxid-Emissionen lagen gradtagbereinigt bei 143 t/a für Heizung und Warmwasserbereitung.

Tabelle 7.2-1: Verbrauchsdaten der Gebäude Rotlintstraße 116-128 sowie bereinigte und unbereinigte Endenergiekennwerte

	2006	2007	2008
Verbrauchsdaten Mainova [kWh]			
Rotlintstraße 116	62.372	56.352	23.825
Rotlintstraße 118	39.049	38.568	21.828
Rotlintstraße 120	65.714	53.353	28.548
Rotlintstraße 122	91.093	77.869	62.656
Rotlintstraße 124	73.930	68.069	52.446
Rotlintstraße 126	112.347	113.151	96.073
Rotlintstraße 128	95.392	77.659	61.012
Zusammenfassung [kWh]			
Rotlintstraße 116-120	167.135	148.273	74.201
Rotlintstraße 122-124	165.023	145.938	115.102
Rotlintstraße 126-128	207.739	190.810	157.085
Endenergiekennwerte [kWh/m²a]			
Rotlintstraße 116-120	167,0	148,1	74,1
Rotlintstraße 122-124	186,0	164,5	129,7
Rotlintstraße 126-128	173,7	159,5	131,3
Endenergiekennwerte GTZ korrigiert (WW als konstanter Anteil) [kWh/m²a]			
GTZ-Faktor Frankfurt	0,92	0,86	0,94
Rotlintstraße 116-120	180,2	169,8	77,9
Rotlintstraße 122-124	200,9	188,8	137,1
Rotlintstraße 126-128	187,5	183,1	138,8
Mittelwert	189,5	180,6	117,9

**Abb. 7.2-1: Gegenüberstellung von Endenergiebedarf und –verbrauch sowie den Kohlendioxid-Emissionen vor der Sanierung**

7.3 Energiebedarf nach Sanierung nach dem Berechnungsverfahren der EnEV

Im Folgenden werden die Energiekennwerte der Gebäude nach der Sanierung dargestellt, wenn die Energieeinsparverordnung (EnEV) als Berechnungsverfahren verwendet wird. Die sich ergebenden Bedarfs- und Kennwerte unterscheiden sich teilweise deutlich von den Ergebnissen, die mit dem PHPP (siehe Kapitel 7.4) berechnet werden. Gründe für die Unterschiede liegen u. a. in den unterschiedlichen Bezugsflächen (A_N nach EnEV bzw. Energiebezugsfläche nach Wohnflächenverordnung beim PHPP), unterschiedlich angesetzten Raumtemperaturen oder der Berechnung der solaren und inneren Gewinne.

Tabelle 7.3-1: Energiebedarf der Gebäude nach Sanierung gemäß EnEV

	Energiebezugsfläche [m ²]	Gebäudenutzfläche A_N [m ²]	Heizwärmebedarf Q_h " [kWh/(m ² a)]	spez. Transmissions- wärmeverlust H_T' [W/(m ² K)]	Anforderungen H_T' [W/(m ² K)]
1. Bauabschnitt (Rotlintstraße 116-120)	1318,2	1795,4	26,3	0,202	0,638
2. Bauabschnitt (Rotlintstraße 122-124)	1047,3	1507,2	26,6	0,206	0,662
3. Bauabschnitt (Rotlintstraße 126-128)	1400,5	2078,9	22,5	0,216	0,735
flächengewichteter Mittelwert			24,9	0,209	0,682

In Tabelle 7.3-1 sind die Ergebnisse der Energiebilanzberechnungen nach EnEV dokumentiert, die mit dem Excel-Berechnungstool [EnEV-XL4.0] bestimmt wurden. Als Nachweisverfahren wurde das Monatsbilanzverfahren für Bestandsgebäude nach EnEV 2007 herangezogen, da der Bauantrag für die Gebäude vor Inkrafttreten der EnEV2009 gestellt wurde.

Im Mittel über alle Gebäude ergibt sich ein Heizwärmebedarf Q_h " von 24,9 kWh/(m²a), die spezifischen Transmissionswärmeverluste liegen bei 0,209 W/(m²K). Damit werden die Anforderungen der EnEV an diese Häuser mit einem H_T' von im Mittel 0,682 W/(m²K) um 69 % unterschritten. Bei der Berechnung wurden die Ergebnisse der detaillierten Wärmebrückenberechnung für alle Einzeldetails und nicht ein pauschaler Zuschlag nach EnEV berücksichtigt (siehe Kapitel 7.4.2). Wird der pauschale Wärmebrückenzuschlag von 0,05 W/(m²K) eingesetzt, ergibt sich immer noch eine Unterschreitung der Anforderungen für H_T' um 65 %.

Der Primärenergiebedarf nach EnEV liegt im Mittel über die gesamte Gebäudenutzfläche A_N bei 9,9 kWh/(m²a), was eine Unterschreitung der EnEV-Anforderungen um 88 % bedeutet.

7.4 Energiebilanz nach Sanierung gemäß Passivhaus-Projektierungs-Paket (PHPP)

Für die Bilanzierung der Gebäude nach der Sanierung wurden die Häuser auf drei Blöcke verteilt, wobei die Hausnummern 116-120 (erster Bauabschnitt), 122-124 (zweiter Bauabschnitt) und 126-128 (dritter Bauabschnitt) jeweils als ein Gebäude mit umlaufender thermischer Hüllfläche betrachtet werden.

7.4.1 Heizwärmebedarf

Ziel der Sanierung war das Erreichen eines Heizwärmebedarfs von 15 kWh/(m²a) im Mittel über die gesamte Energiebezugsfläche der Anlage Rotlintstraße 116-128. In Tabelle 7.4-1 sind die Ergebnisse der PHPP-Berechnungen der drei Bauabschnitte und der zugehörige flächengewichtete Mittelwert zusammengestellt.

Tabelle 7.4-1: Vergleich des Heizwärmebedarfs nach PHPP

	Energiebezugsfläche [m ²]	Heizwärmebedarf [kWh/m ² a]
1. Bauabschnitt	1318	15,0
2. Bauabschnitt	1047	17,7
3. Bauabschnitt	1401	14,1
flächengewichteter Mittelwert		15,4

Es zeigt sich, dass der erste und der dritte Bauabschnitt den Zielwert von 15 kWh/(m²a) erreichen bzw. unterschreiten, der zweite Bauabschnitt jedoch mit 17,7 kWh/(m²a) darüber liegt. Die Gründe werden in Kapitel 7.4.3 erläutert. Im Mittel über die gesamte Energiebezugsfläche ergibt sich ein Heizwärmebedarf von 15,4 kWh/(m²a), somit wird der Zielwert bzw. das Passivhausniveau gerade erreicht⁵⁴.

Ein wichtiger Einflussfaktor auf den Heizwärmebedarf der Gebäude, der in der Planungsphase nicht bekannt ist und sowohl von der vorhandenen Bausubstanz als auch von der Qualität der Umsetzung des Luftdichtheitskonzepts abhängt, ist die Luftdichtigkeit der Gebäudehülle (n50-Wert). Dieser wurde in der Planungsphase mit 0,6 1/h angesetzt, was den Mindestanforderungen an Passivhäuser entspricht. Wäre nur dieser Wert in der Praxis erreicht worden, läge der Heizwärmebedarf im Mittel bei 16,4 kWh/(m²a). Somit war die deutliche Unterschreitung der Anforderungen an den n50-Wert wichtige Voraussetzung, um den Passivhausstandard in diesem Projekt zu erreichen. Abb. 7.4-1 zeigt für die drei Bauabschnitte den relativen Einfluss einer Verbesserung des n50-Wertes – ausgehend vom Standardwert 0,6 1/h. Die tatsächlich erreichten n50-Werte sind mit Punkten markiert. Durch den besseren n50-Wert liegt der 1. Bauabschnitt 6 %, der 2. Bauabschnitt 4 % und der 3. Bauabschnitt 7,5 % günstiger als mit Standard-n50-Wert. Der große Einfluss im dritten Bauabschnitt resultiert aus der freieren Lage des Gebäudes. Hier muss im PHPP mit einem

⁵⁴ Hier wurde unterstellt, dass der n50-Wert im dritten Bauabschnitt das gleiche Niveau erreicht wie im 2. Bauabschnitt (0,34 1/h), da das Gebäude zum Zeitpunkt der Erstellung dieses Berichts noch nicht fertig gestellt war und keine Messwerte vorliegen

Windschutzkoeffizienten e von 0,07 (mäßige Abschirmung) gerechnet werden, so dass dies zu einem größeren Einfluss der Leckagen führt (siehe Kapitel 4.4.1).

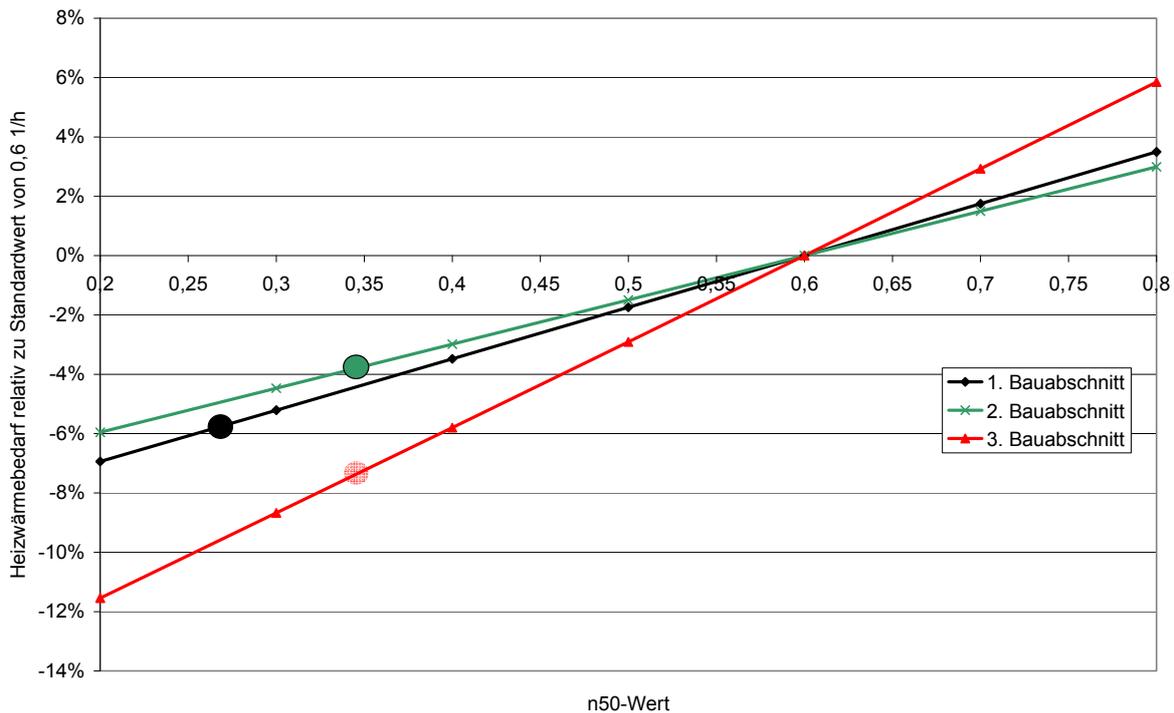


Abb. 7.4-1: Relative Änderungen des Heizwärmebedarfs bei unterschiedlicher Gebäudedichtheit für die drei Bauabschnitte

Abb. 7.4-2 zeigt die Verteilung der Transmissionswärmeverluste der Außenbauteile. Dominierend sind die Fenster aufgrund ihres im Vergleich zu anderen Bauteilen schlechteren U-Wertes (die solaren Gewinne über die Fenster sind an dieser Stelle nicht berücksichtigt). Von den opaken Bauteilen tragen die Außenwände mit 28 %, Dächer und Decken zu 11 %, die Kellerdecke (in der Legende als Bodenplatte bezeichnet) mit 8 % sowie die Wand gegen Keller (im Bereich des Treppenhauses) mit 2 % zu den Wärmeverlusten bei. Die Wärmebrücken besitzen einen Anteil von 9 % der Wärmeverluste. Diese Aufteilung ist bei allen drei Bauabschnitten vergleichbar, wobei im dritten Bauabschnitt der Wärmebrückenanteil mit 7 %, aufgrund der absolut fast gleichbleibenden Wärmeverluste beim Kelleranschluss, bei ansonsten größeren Gesamtverlusten, am günstigsten ausfällt.

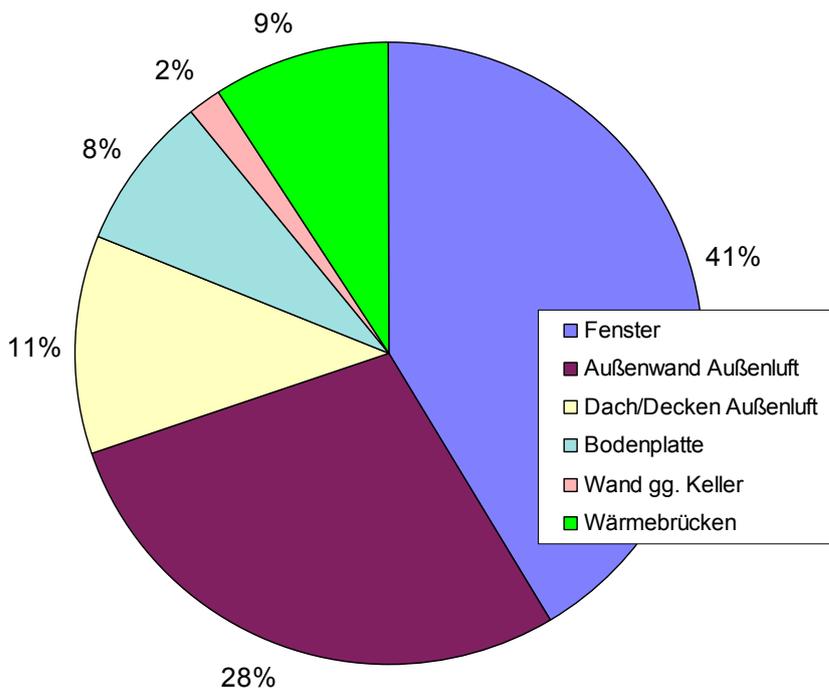


Abb. 7.4-2: Aufteilung der Transmissionswärmeverluste im ersten Bauabschnitt

Die Abb. 7.4-3 zeigt exemplarisch das Blatt Energiekennwert Heizwärme / Monatsverfahren aus dem PHPP für den ersten Bauabschnitt.

Passivhaus-Projektierung

ENERGIEKENNWERT HEIZWÄRME MONATSVERFAHREN

(auf dieser Seite dargestellt werden die Heizzeitsummen des Monatsverfahrens)

Klima: Frankfurt am Main		Innentemperatur: 20 °C	
Objekt: Rotlintstraße 116-120 (Stand: 09.09.10)		Gebäudetyp/Nutzung: Mehrfamilienhaus	
Standort:		Energiebezugsfläche A _{EB} : 1318,2 m ²	
spez. Kapazität: 60 Wh/(m ² K) (Eingabe im Blatt "Sommer")	Temperaturzone	Fläche	U-Wert
			Red.Fak. Mon.
			G _i
			pro m ² Energiebezugsfläche

Bauteile	Temperaturzone	Fläche m ²	U-Wert W/(m ² K)	Red.Fak. Mon.	G _i kWh/a	=	kWh/a	pro m ² Energiebezugsfläche
1. Außenwand Außenluft	A	1176,3	0,123	1,00	86	=	12476	
2. Außenwand Erdreich	B			1,00		=		
3. Dach/Decken Außenluft	A	498,6	0,117	1,00	86	=	5035	
4. Bodenplatte	B	500,2	0,145	1,00	52	=	3796	
5. Wand gg. Keller	B	30,2	0,543	1,00	52	=	856	
6.	A			1,00		=		
7.	X			0,75		=		
8. Fenster	A	278,5	0,740	1,00	86	=	17707	
9. Außentür	A	8,0	0,780	1,00	86	=	534	
10. Wbrücken außen (Länge/m)	A	1045,8	0,017	1,00	86	=	1501	
11. Wbrücken Perimeter (Länge/m)	P	122,4	0,058	1,00	52	=	373	
12. Wbrücken Boden (Länge/m)	B	213,1	0,209	1,00	52	=	2326	
Summe							44604	33,8

Transmissionswärmeverluste Q_T

$$\text{wirksames Luftvolumen } V_L = \frac{A_{EB}}{2} \cdot h_{Raum} = \frac{1333}{2} \cdot 2,50 = 3332 \text{ m}^3$$

$$\text{wirksamer Luftwechsel außen } n_{L,a} = n_{L,Anlage} \cdot (1 - \eta_{EWU}) \cdot (1 - \eta_{WRG}) + n_{L,Rest} = 0,339 \cdot (1 - 0) \cdot (1 - 0,81) + 0,011 = 0,077$$

$$\text{wirksamer Luftwechsel Erdreich } n_{L,g} = n_{L,Anlage} \cdot \eta_{EWU} \cdot (1 - \eta_{WRG}) = 0,339 \cdot 0 \cdot (1 - 0,81) = 0,000$$

Lüftungsverlust außen Q_{L,a}

Lüftungsverlust Erdreich Q_{L,e}

V _L m ³	n _{L,aqui} Anteil 1/h	C _{Luft} Wh/(m ³ K)	G _i kWh/a	=	kWh/a	kWh/(m ² a)
3332	0,077	0,33	86	=	7299	5,5
3332	0,000	0,33	52	=	0	0,0
Summe					7299	5,5

Lüftungswärmeverluste Q_L

$$\text{Summe Wärmeverluste } Q_V = (Q_T + Q_L) \cdot \text{Reduktionsfaktor} = (44604 + 7299) \cdot 1,0 = 51903 \text{ kWh/a}$$

Summe Wärmeverluste Q_V

Ausrichtung der Fläche	Abminderungsfaktor vgl. Blatt Fenster	g-Wert (senkr. Einstr.)	Fläche m ²	Globalstrahlung kWh/(m ² a)	=	kWh/a
1. Nord	0,28	0,51	96,4	239	=	3346
2. Ost	0,29	0,51	16,5	353	=	869
3. Süd	0,37	0,51	150,2	546	=	15606
4. West	0,25	0,51	15,3	392	=	763
5. Horizontal	0,40	0,00	0,0	599	=	0
6. Summe opake Flächen					=	0
Summe						20583

Wärmeangebot Solarstrahlung Q_S

$$\text{Innere Wärmequellen } Q_I = \text{Länge Heizzeit} \cdot \text{spezif. Leistung } q_i \cdot A_{EB} = 0,024 \cdot 273 \cdot 2,1 \cdot 1318,2 = 18137 \text{ kWh/a}$$

Innere Wärmequellen Q_I

$$\text{Freie Wärme } Q_F = Q_S + Q_I = 38721 \text{ kWh/a}$$

$$\text{Verhältnis Freie Wärme zu Verlusten } Q_F / Q_V = 0,75$$

$$\text{Nutzungsgrad Wärmegewinne } \eta_G = 83\%$$

Wärmegewinne Q_G

$$\eta_G \cdot Q_F = 32135 \text{ kWh/a}$$

Heizwärmebedarf Q_H

$$Q_V - Q_G = 19768 \text{ kWh/a}$$

Grenzwert

15 kWh/(m²a)

Anforderung erfüllt? **ja**

Abb. 7.4-3: Heizwärmebedarf des ersten Bauabschnitts nach dem Monatsverfahren nach PHPP

7.4.2 Einfluss der Wärmebrücken

Bei Passivhaus-Bauvorhaben ist die Berücksichtigung und Minimierung von Wärmebrücken an den Anschlussdetails für den Erfolg eines Projekts von großer Bedeutung. Besonders bei Bestandssanierung treten dabei eine Reihe von Wärmebrückendetails auf, die nicht vollständig zu entschärfen sind und einen wesentlichen Einfluss auf die Energiebilanz ausüben können. Aus diesem Grund wurde für die Gebäude in der Rotlintstraße eine vollständige Berechnung aller Wärmebrücken durchgeführt. Die Dokumentation der Wärmebrückenberechnungen ist in den Kapiteln 4.2.1 bis 4.2.4 zu finden.

Für den ersten Bauabschnitt (Rotlintstraße 116-120) ergibt sich eine Gesamtlänge der Wärmebrücken von 1381 m, wobei die Wärmebrücken in der Fassadenkonstruktion nicht mitgerechnet wurden, da diese in den U-Wert der Fassade eingeflossen sind. Der mit den Wärmebrücken verbundene Wärmeverlust unter Berücksichtigung des Temperatur-Gewichtungsfaktors f_t nach PHPP summiert sich auf 69,1 W/K, was 9 % der gesamten Wärmeverluste ausmacht. Bezogen auf die gesamte Wärme übertragende Hüllfläche von 2492 m² ergibt sich ein äquivalenter Wärmebrückenaufschlag ΔU_{WB} von 0,028 W/(m²K). Dieser Aufschlag fällt deutlich geringer aus als der pauschale Wärmebrückenzuschlag nach Energieeinsparverordnung ($\Delta U_{WB} = 0,05$ W/(m²K)), selbst wenn unterstellt wird, dass alle Details nach DIN 4108 Beiblatt2 ausgeführt würden, was im Altbau kaum erreicht werden kann.

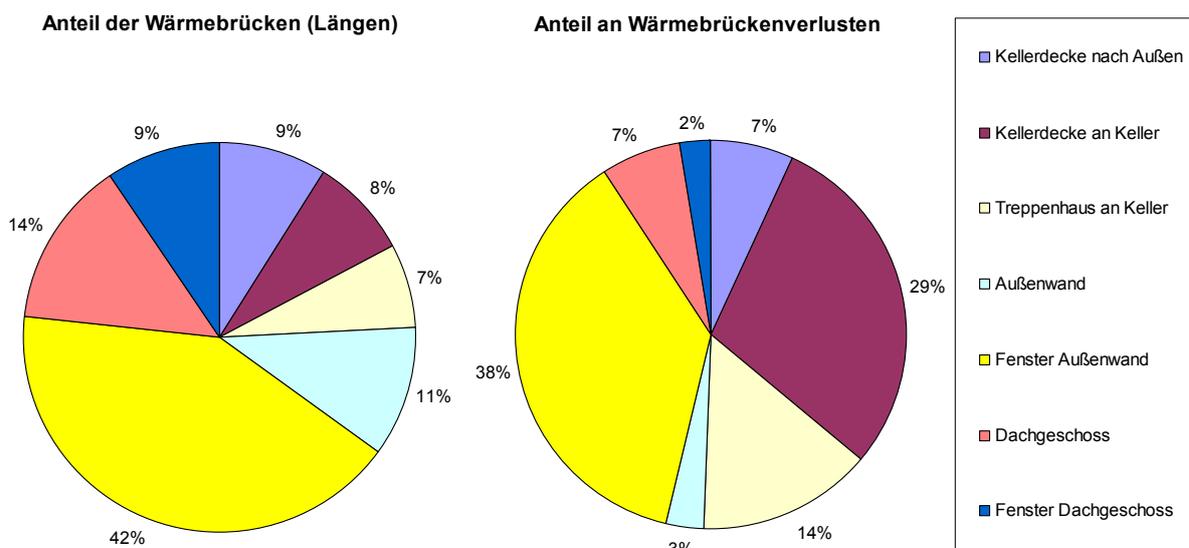


Abb. 7.4-4: Übersicht der Wärmebrückenverluste am Gebäude Rotlintstraße 116-120

Die Verteilung der Wärmebrücken (auch hier ohne diejenigen in der Fassade) auf die unterschiedlichen Gebäudeteile ist in Abb. 7.4-4 zusammen mit der Längenverteilung für den ersten Bauabschnitt zu sehen. Der größte Anteil mit 38 % an den Wärmebrücken entfällt auf den Einbau der Fenster in die Fassade. Die Gründe sind hier einerseits der große Anteil an Fenstern in der Fassade (42 % der Gesamtlänge aller Wärmebrücken), andererseits erforderte die Fassade aus Holz und Zellosedämmung zur Verbesserung des Brandschutzes zusätzliche Maßnahmen im Bereich der Fensteranschlüsse, so dass hier im Mittel mit 0,037 W/(mK) ein deutlich höherer Wärmebrückenverlustkoeffizient berücksichtigt werden musste als im Dachgeschoss, wo für die Neubaukonstruktion (teilweise mit

Wärmedämmverbundsystem-Anschlüssen) nur 0,011 W/(mK) im Mittel als Wärmebrückenzuschlag anfallen.

Danach folgen die Anschlüsse der Kellerdecke an die Kellerinnenwände. Dieses Detail verursacht bei nur 8 % der Gesamtlänge 29 % der Wärmeverluste, wobei hier bereits der Temperaturgewichtungsfaktor von 0,562 für dieses Gebäude berücksichtigt ist. Mit 14 % der Wärmeverluste sind die Wärmebrücken am Übergang vom Treppenhaus zum Keller berücksichtigt (bei 7 % der Wärmebrückenlängen). Es folgen die Anschlüsse im Dachgeschoss und der Anschluss der Kellerdecke nach außen mit je 7 %. Schließlich verursachen die Fensteranschlüsse im Dachgeschoss 3 % der Wärmeverluste bei 9 % der Wärmebrückenlänge. Abb. 7.4-5 zeigt die Situation für den 2. Bauabschnitt. Auffällig ist hier, dass der Anteil der Fenster an der Summe der Wärmebrückenverluste abgenommen hat, da hier der Fensteranschluss thermisch weiter optimiert werden konnte. In der Folge steigt der Anteil der übrigen Details an den gesamten Wärmebrückenverlusten an.

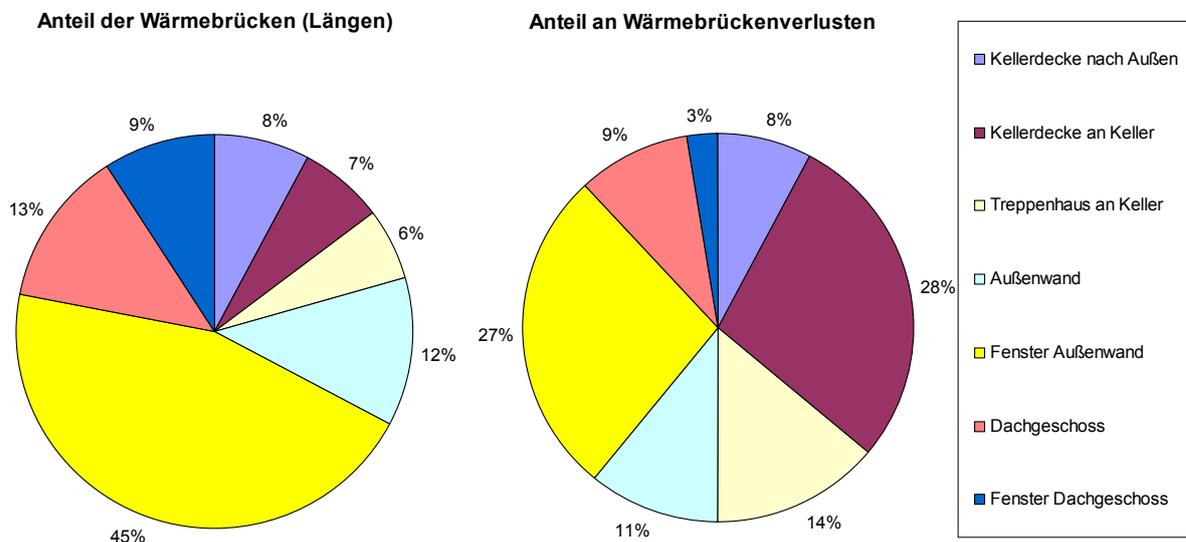


Abb. 7.4-5: Übersicht der Wärmebrückenverluste am Gebäude Rotlintstraße 122-124

7.4.3 Auswirkung der Gebäudeorientierung auf den Heizwärmebedarf

Der Block Rotlintstraße 122-124 ist mit seiner Hauptachse in Nord-Süd-Richtung orientiert, die Wohnzimmer mit den großen Fensterflächen nach Westen. Zusätzlich verschatten die Nachbarbebauung und einige Laub abwerfende Bäume die West- und Ostfassaden. Dies führt dazu, dass der Block den höchsten Heizwärmebedarf aufweist und nicht das Passivhauskriterium von 15 kWh/(m²a) erfüllt.

In Abb. 7.4-6 sind die hypothetischen Auswirkungen einer veränderten Orientierung und anderer Verschattungssituationen exemplarisch dargestellt. Ausgehend vom Ist-Zustand mit 17,7 kWh/(m²a) reduziert sich der Heizwärmebedarf auf 17,5 kWh/(m²a), wenn die Verschattung durch die Bäume komplett entfällt. Wäre zusätzlich auch die Nachbarbebauung nicht vorhanden, ergäbe sich ein Heizwärmebedarf von 16,47 kWh/(m²a). Eine (theoretische) Drehung des Gebäudes um ca. 90 ° genau in Richtung Süden reduziert den Heizwärmebedarf von 17,7 auf 16,3 kWh/(m²a). Erst bei einer Kombination von Drehung und fehlender Verschattung wird das Passivhausniveau mit 15,4 kWh/(m²a) knapp erreicht.

Der große Einfluss der Orientierung des Gebäudes auf den Heizwärmebedarf hatte in der Planung zur Entscheidung geführt, ab dem 2. Bauabschnitt andere Fensterrahmen mit einem günstigerem Rahmen-U-Wert U_F einzusetzen, um die Wärmeverluste an diesem Gebäude zu begrenzen. Aus baupraktischen Gründen wurde der veränderte Fensterrahmen dann auch im dritten Bauabschnitt eingesetzt, obwohl hier mit dem Rahmen aus dem ersten Bauabschnitt etwas höhere solare Gewinne zu erwarten gewesen wären.

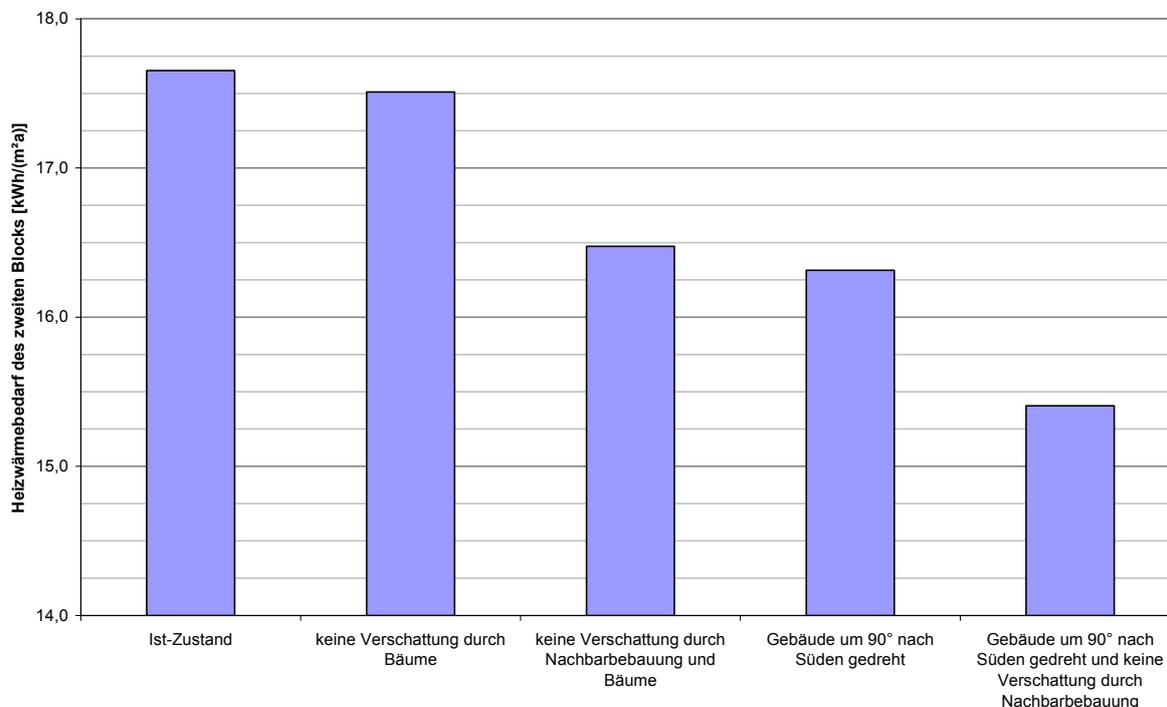


Abb. 7.4-6: Auswirkungen veränderter Orientierung und Verschattung auf den zweiten Bauabschnitt

7.4.4 Gesamtwärmebedarf und Wärmeerzeugung

Bei Passivhäusern ist der Heizwärmebedarf so drastisch reduziert, dass bei der Betrachtung des Gesamtwärmebedarfs eines Gebäudes einerseits auch die Verluste berücksichtigt werden müssen, die bei der Verteilung der Wärme zu den Wohnungen entstehen, andererseits vor allem auch der Wärmebedarf für die Warmwasserbereitung, der üblicherweise mindestens die Hälfte des Nutzwärmebedarfs ausmacht.

Die Verteilverluste werden in den Gebäuden in der Rotlintstraße durch eine Dämmung der Rohrleitungen vermindert, die das 2,5-fache der Mindestanforderungen der EnEV beträgt (siehe Kapitel 4.5.4), der Wärmebedarf für die Warmwasserbereitung durch die thermischen Solaranlagen sowie eine reduzierte Warmwassertemperatur (siehe Kapitel 4.5.2). Die einzige Größe, auf die in der Planung nur begrenzt Einfluss genommen werden kann, ist der Warmwasserverbrauch der Mieter, der jedoch durch besonders sparsame Armaturen in den Bädern begrenzt wird. Handelsübliche Duschköpfe besitzen einen Durchfluss von 12-25 Liter je Minute, Waschtischmischer ca. 12 l/min. In der Rotlintstraße wurden Duschköpfe mit 9 l/min und Waschtischmischer mit 6 l/min zur Reduktion des Warmwasserbedarfs eingesetzt. Lediglich in der Küche konnten keine Vorkehrungen zur Reduktion des

Warmwasserbedarfs getroffen werden, da diese von den Mietern installiert wird. Durch diese Maßnahmen kann mit einer Reduktion des Warmwasserbedarfs gerechnet werden.

In Abb. 7.4-7 ist die Wärmebilanz des Gesamtvorhabens dokumentiert (Rotlintstraße 116-128). Auf der linken Seite sind die Absolutbeträge von Nutzwärmebedarf und Verteil- sowie Speicherverlusten dargestellt. Neben einem Heizwärmebedarf von 58,0 MWh/a und einem Warmwasserbedarf von 73 MWh/a fallen noch Verluste für die Heizungsverteilung von 17,9 MWh/a (inklusive Pufferspeicher in der Heizzentrale) und 14,7 MWh/a für die Warmwasserverteilung an (inklusive Bereitschaftsspeicher). Insgesamt liegt der Wärmebedarf bei 163,7 MWh/a. Auf der Seite der Erzeugung (rechts) liefert die thermische Solaranlage 44,5 MWh/a, das Blockheizkraftwerk 89,9 MWh/a und der Spitzenlastkessel als fossile Energiequelle 29,3 MWh/a.

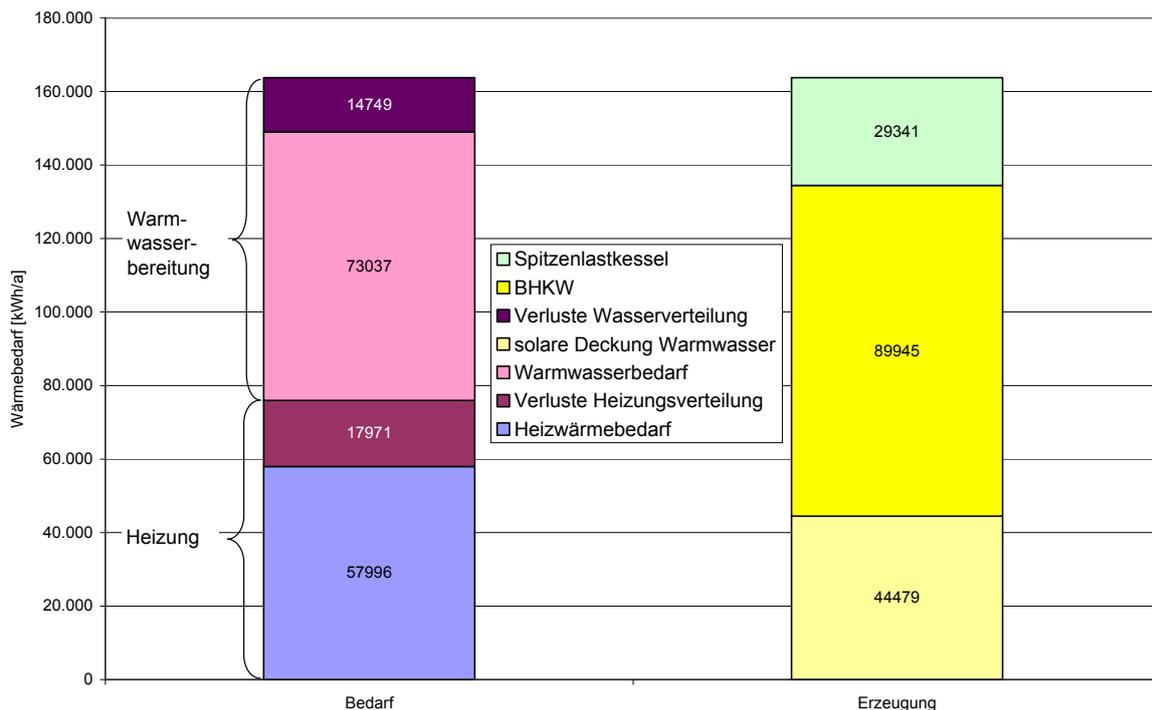


Abb. 7.4-7: Bilanz des Gesamtvorhabens: Bedarf und Verluste links, Erzeugung rechts

7.4.5 Endenergiebedarf

Der Endenergiebedarf der Gebäude setzt sich zusammen aus dem Rapsölbedarf des BHKW, dem Erdgas-Bedarf des Spitzenlastkessels sowie dem Bedarf an elektrischer Hilfsenergie sowie Haushaltsstrom.

Rapsöl-Blockheizkraftwerk

Der Deckungsanteil des Rapsöl-BHKW am Gesamtwärmebedarf (die Wärmelieferung der thermischen Solaranlage ist bereits abgezogen) wurde mit Hilfe der Jahresdauerlinie aus Kapitel 4.5.6 auf 75,4 % bestimmt. Da das BHKW wärmegeführt betrieben werden soll, wird es wie ein Kessel mit dem thermischen Wirkungsgrad (61 %) des BHKW betrachtet. Somit ergibt sich ein Endenergiebedarf von 147,4 MWh/a bzw. 16.960 Liter Rapsöl. Dem steht eine Erzeugung von elektrischer Energie in Höhe von 42,8 MWh/a gegenüber (Abb. 7.4-8).

AUFWANDSZAHL BLOCKHEIZKRAFTWERK

Objekt: Rotlintstraße 116-128 Gesamtbilanz	Gebäudetyp/Nutzung: Mehrfamilienhäuser		
Standort: Frankfurt am Main	Energiebezugsfläche A _{EB} :	3766	m ²
Anteil Deckung Heizwärmebedarf	(Blatt PE-Kennwert)	75%	
Heizwärmebedarf kWh/a	Q _H (Blatt WW+Verteil)	75967	kWh
Solarer Deckungsbeitrag an Raumwärme	η _{Solar, H} (gesonderte Berechnung)	0%	
Wirksamer Heizwärmebedarf	Q _{H,Wi} = Q _H * (1 - η _{Solar, H})	57279	kWh
Anteil Deckung Warmwasserbedarf	(Blatt PE-Kennwert)	75%	
Warmwasserbedarf	Q _{WW} (Blatt WW+Verteil)	87786	kWh
Solare Wärme an Warmwasserbereitung	η _{Solar, WW} (Blatt SolarWW)	44479	kWh
Wirksamer Warmwasserbedarf	Q _{WW,Wi} = Q _{WW} - Q _{solar}	32653	kWh
Wärmequelle		Rapsöl - BHKW	
Primärenergie-Faktor		0,143	kWh/kWh
CO ₂ -Emissionsfaktor (CO ₂ -Äquivalent)		144	g/kWh
Heizwert Rapsöl		8,69	kWh/Liter
Elektrischer Wirkungsgrad Blockheizkraftwerk	η _{elektrisch}	29%	
Aufwandszahl Blockheizkraftwerk thermisch	e _{a,WBHKW}	164%	
Endenergiebedarf der Wärmebereitstellung	Q _{End} = Q _{nutz} * e _{a,WÜ}	147.430	kWh/a
Treibstoffmenge		16.958	Liter/a
Stromerzeugung		42.755	kWh/a
		39,1	kWh/(m ² a)
		4,5	Liter/(m ² a)
		11,4	kWh/(m ² a)

Abb. 7.4-8: Endenergiebedarf Rapsöl-BHKW sowie Stromerzeugung

Spitzenlastkessel

Der Erdgas-Spitzenlastkessel unterstützt das Blockheizkraftwerk bei der Wärmeerzeugung, wenn dessen Heizleistung nicht ausreicht. In der Heizzentrale wird ein Brennwertkessel installiert, der ca. 25 % der Wärme (Nutzwärme + Verluste) bereitstellen soll. Es ergibt sich mit dem Blatt „Kessel“ des PHPP eine Aufwandszahl von 107 % (Abb. 7.4-9). Insgesamt entsteht für den Spitzenlastkessel 31,4 MWh/a bzw. 8,3 kWh/(m²a) Endenergiebedarf.

Aufwandszahl Wärmeerzeuger Heizungsstrang	e _{H,g,K} = 1 / (f _φ * η _K)	103%	
Aufwandszahl Wärmeerzeuger Warmwasserbereitung	e _{TW,g,K} = f _{φ,TW} / η _{100%}	113%	
Aufwandszahl Wärmeerzeuger WW & Heizung	e _{g,K}	107%	
Endenergiebedarf der Wärmebereitstellung Heizung	Q _{End, HE} = Q _{H,Wi} * e _{H,g,K}	19336	kWh/a
Endenergiebedarf der Wärmebereitstellung WW	Q _{End, TW} = Q _{WW,Wi} * e _{TW,g,K}	12072	kWh/a
Endenergiebedarf der Wärmebereitstellung gesamt	Q _{End} = Q _{End,TW} + Q _{End,HE}	31408	kWh/a
		8,3	kWh/(m ² a)

Abb. 7.4-9: Aufwandszahl und Wärmebereitstellung des Spitzenlastkessels

Hilfsenergie

Bei der Berechnung des erforderlichen Hilfsstromeinsatzes für den Betrieb der Anlagentechnik wurde von den Standardannahmen des PHPP teilweise abgewichen und folgende Verbraucher für elektrische Energie berücksichtigt:

- Lüftungsanlagen mit WRG in den Wohnungen ($0,40 \text{ Wh/m}^3$)⁵⁵; mittlerer Luftwechsel im Winter $0,37 \text{ 1/h}$, Sommer $0,2 \text{ 1/h}$
- Abluftanlage je Haus im Keller ($4,8 \text{ W}$ je Hausnummer)
- Lüftungsanlage mit WRG je Treppenhaus ($5,2 \text{ W}$ laut Hersteller in Stufe 2)
- Hilfsstromeinsatz für Erdgas-Spitzenlastkessel (45 W für 30% Leistung auf Basis von Herstellerkennlinien im Heizbetrieb und 76 W bei Warmwasserbereitung)
Der Rapsöl-BHKW wird netto betrachtet, d. h. alle notwendigen Pumpen und Regelungen sind bei der Nettoleistung bereits versorgt
- Nahwärmepumpe sowie je eine Heizkreispumpe je Block ($4 \times 310 \text{ W}$, drehzahl geregelt, daher $4 \times 250 \text{ W}$ angesetzt)
- Zirkulationspumpen ($3 \times 40 \text{ W}$, Bereitschaftszeit 8670 h/a , temperaturgesteuert und Inliner-System ohne Verluste in der Rückleitung, daher Betriebszeit auf 50% der Bereitschaftszeit angesetzt)
- Speicherladepumpen: je Block ist eine Ladepumpe für den externen Wärmetauscher (85 W) und eine Boilerladepumpe (130 W) vorhanden (angesetzt sind jeweils $2/3$ der maximalen Leistung und nur 20% des Standardwertes der Betriebszeit nach PHPP, da nur wenn nicht genügend Solarertrag vorhanden ist, die Pumpen zum Nachheizen betrieben werden und dann eine Intervallnachladung umgesetzt wird. Der Ansatz entspricht ca. $3,2 \text{ h/d}$ im Mittel über das gesamte Jahr)
- je Block eine Solarpumpe (59 W) sowie eine Umschichtpumpe (22 W), angesetzt werden auch hier jeweils $2/3$ der maximalen Leistung
- Regelung Solaranlagen (3 W je Block) [Resol] und Gesamtanlage (15 W abgeschätzt)
- je 2 Aufzüge in Block 2 und 3 (92 W)⁵⁶
- für die Wasseraufbereitung $12,5 \text{ W}$ [LVPG 2009]
- für die RWA-Anlage im zweiten und dritten Block je Treppenhaus 10 W (abgeschätzt)
- für Klingelanlagen (5 W je Treppenhaus).

⁵⁵ die eingesetzten Geräte wurden laut Herstellerangaben [Heinemann] bezüglich der Ansteuerung der Ventilatoren verändert, so dass der Standby-Verbrauch sich verringern soll, ohne dass der genaue Effekt gegenwärtig quantifiziert werden kann

⁵⁶ nach [Nipkow] ca. 950 kWh/a je Aufzug bzw. 110 W für kleine Wohnhäuser (Mittel aus Messwerten für ausgeführte Anlagen, Optimierungen sind möglich);

nach [Clausnitzer] ergibt sich ein arithmetisches Mittel aus 50 gemessenen Aufzügen in Wohngebäuden von $1,7 \text{ kWh/(m}^2\text{a)}$, wobei die Spanne von $0,8$ bis $3,56 \text{ kWh/(m}^2\text{a)}$ reicht; für den dritten Bauabschnitt ergäbe sich damit eine Spanne von 1120 kWh/a bis 5110 kWh/a , im Mittel 2380 kWh/a .

Da auch beim Aufzug umfassende Effizienzmaßnahmen umgesetzt werden, die sich besonders auf den wichtigen Standby-Verbrauch konzentrieren, wird in der Bilanz mit einem mittleren Stromverbrauch von 800 kWh/a bzw. 92 W gerechnet.

Die Abb. 7.4-10 zeigt die Hilfsstromverbräuche für die gesamte Anlage, berechnet nach dem PHPP, Tabelle 7.4-2 zeigt die in der Zeile „Hilfsstrom sonstige“ berücksichtigten Hilfsstromverbraucher. Es ergibt sich ein Kennwert für den Hilfsstrom von 5,5 kWh/(m²a) bzw. absolut 20.676 kWh/a. Betrachtet man nur den in Kapitel 6.2 beschriebenen Bilanzrahmen (entsprechend Hilfsenergie nur für die Wärmeversorgung), so ergibt sich ein Hilfsstrombedarf von 16.686 kWh bzw. 4,4 kWh/(m²a). Dabei sind Aufzüge, Brandschutz und Kommunikationsanlagen nicht berücksichtigt, sondern werden als Allgemeinstrom wie Haushaltsstrom behandelt.

Wohnfläche	3766	m²
Heizzeit	205	d
Luftvolumen	9415	m³
Wohnungen	61	HH
Umbaut. Volumen	16192	m³

Laufzeit LA im Winter	4,91	kh/a
Laufzeit LA im Sommer	3,85	kh/a
Luftwechselrate	0,34	h⁻¹
Enteisung WT ab	-3,0	°C

Spalte Nr.	1	2	3	4	5	6	7
Anwendung	vorhanden (1/0)	in wärmetauschender Hülle (1/0)	Normbedarf	Nutzungsfaktor	Betriebsdauer	Bezugsgröße	Strombedarf (kWh/a)
Lüftungsanlage							
Lüftung im Winter	1	1	0,40 Wh/m³	* 0,38 h⁻¹	* 4,9 kh/a	9415 m³	= 6950
Lüftung im Sommer	1	1	0,40 Wh/m³	* 0,20 h⁻¹	* 3,9 kh/a	9415 m³	= 2925
Enteisung WT	1	1	8398 W	* 1,00	* 0,1 kh/a	1	= 836
Heizungsanlage							
Eingabewert Nennleistungsaufnahme d. Pumpe 1000 W							
Umwälzpumpe	1	0	1000 W	* 0,7	* 4,9 kh/a	1	= 3516
el. Leistungsaufnahme des Kessels bei 30% Last 45 W							
Hilfsenergie Kessel Heiz.	1	0	45 W	* 1,00	* 3,89 kh/a	1	= 175
Trinkwarmwasser-Anlage							
Eingabewert mittl. Leistungsaufnahme d. Pumpe 162 W							
Zirkulationspumpe	1	0	162 W	* 1,00	* 4,4 kh/a	1	= 710
Eingabewert Nennleistungsaufnahme d. Pumpe 432 W							
Speicherladepumpe WW	1	0	432 W	* 1,00	* 1,1 kh/a	1	= 490
el. Leistungsaufnahme des Kessels bei 100% Last 76 W							
Hilfsenergie Kessel WW	1	0	76 W	* 1,00	* 0,7 kh/a	1	= 50
Eingabewert Nennleistungsaufnahme d. Solarpumpe 120 W							
Hilfsstrom solar	1	0	120 W	* 1,00	* 1,8 kh/a	1	= 210
Hilfsstrom sonst							
Hilfsstrom sonst	1	0	79 kWh/a	* 1,00	* 1,0	61 HH	= 4814
Summe							20676
Kennwert	kWh/(m²a)		durch Wohnfläche dividieren:				5,5

Abb. 7.4-10: PHPP-Blatt Hilfsenergie (Ausschnitt)

Tabelle 7.4-2: Übersicht über die berücksichtigten Verbraucher für Hilfsenergie im Feld „Hilfsstrom sonst“ im PHPP

	Anzahl	Leistung	Gesamtleistung	Jahresverbrauch
Lüftung Treppenhäuser	7	5,2	36,4 W	318,9 kWh
Abluftanlage Keller	7	4,8	33,6 W	294,3 kWh
Solarregelung	3	3	9 W	78,8 kWh
Gesamtregelung	1	15	15 W	131,4 kWh
je Aufzug MW inkl. Standby	4	92	368 W	3223,7 kWh
Wasseraufbereitung	1	12,5	12,5 W	109,5 kWh
RWA-Anlage	4	10	40 W	350,4 kWh
Klingelanlage	7	5	35 W	306,6 kWh
Summe			550 W	4814 kWh
Gesamtenergieverbrauch				78,9 kWh/(m ² *WE)
				823,4 kWh
nur Wärmeversorgung (EnEV-Bilanzgrenze)				13,5 kWh/(m ² *WE)

Haushaltsstrom

Bei der Berechnung des Haushaltsstrombedarfs wurden überwiegend die Vorgaben des PHPP übernommen. Für den Wäschetrockner entfällt der zugehörige Stromverbrauch, da mit dem Abluftschrank im Badezimmer eine Trockenmöglichkeit vorhanden ist, die keinen zusätzlichen elektrischen Strom benötigt (Abb. 7.4-11).

In der Summe ergibt sich über alle 61 Wohneinheiten ein Strombedarf von 106,8 MWh/a, entsprechend 28,4 kWh/(m²a). Der oben aufgeführte Hilfsenergiebedarf ist darin bereits enthalten.

Anwendung	vorhanden? (1/0)	In der thermischen Hülle? (1/0)	Normbedarf	Nutzungsfaktor	Häufigkeit	Bezugsgröße	Nutzenergie (kWh/a)	Anteil elektrisch	Anteil nichtelektrisch	Strombedarf (kWh/a)
Geschirrspülen	1	1	1,20 kWh/Anw.	1,00	65 / (P*a)	138 P	10764	100%	0%	10764
Kaltwasseranschluß										
Waschen	1	1	1,10 kWh/Anw.	1,00	57 / (P*a)	138 P	8653	100%	0%	8653
Kaltwasseranschluß										
Trocknen mit:	1	1	0,00 kWh/Anw.	0,88	57 / (P*a)	138 P	0	100%	0%	0
Trockenschrank (kal)				Restfeuchte 0,60						
Energieverbr. durch Verdunstung	1	1	3,13 kWh/Anw.	0,60	57 / (P*a)	138 P	14772		100%	
Kühlen	0	1	0,78 kWh/d	1,00	365 d/a	61 HH	0	100%		0
Gefrieren	0	1	0,88 kWh/d	1,00	365 d/a	61 HH	0	100%		0
oder Kombination	1	1	1,00 kWh/d	1,00	365 d/a	61 HH	22265	100%		22265
Kochen mit Strom	1	1	0,25 kWh/Anw.	1,00	500 / (P*a)	138 P	17250	100%		17250
Beleuchtung	1	1	36 W	1,00	2,90 kh/(P*a)	138 P	14207	100%	0%	14207
Elektronik	1	1	80 W	1,00	0,55 kh/(P*a)	138 P	6072	100%		6072
Kleingeräte etc	1	1	50 kWh	1,00	1,00 / (P*a)	138 P	6900	100%		6900
Summe Hilfsstrom							20676			20676
Sonstiges:							0			0
							0			0
							0			0
Summe							121559 kWh			106786
Kennwert										28,4

Abb. 7.4-11: Übersicht der Haushaltsstromverbräuche

Zusammenfassung Endenergiebedarf

Tabelle 7.4-3 (linke Seite) zeigt die absoluten Werte des Endenergiebedarfs sowie die flächenbezogenen Kennwerte für die einzelnen Energieträger und den eingespeisten elektrischen Strom. In der Summe werden 64,5 kWh/(m²a) an Rapsöl, Erdgas und elektrischer Energie benötigt, um die gesamte Anlage zu versorgen. Betrachtet man nur die Bilanzgrenze nach EnEV (Heizung, Warmwasser, Hilfsenergie für Wärme), so liegt der Kennwert bei 40,6 kWh/(m²a).

Tabelle 7.4-3: Zusammenfassung der Ergebnisse für End- und Primärenergiebedarf sowie Treibhausgasemissionen (unter Berücksichtigung von „grünem“ Strom)

	Endenergiebedarf		Primärenergiebedarf		CO ₂ -Emissionen	
	kWh/a	kWh/m ² a	kWh/a	kWh/m ² a	kg/a	kg/m ² a
Rapsöl	147.430	39,1	21.082	5,6	21.230	5,6
Erdgas	31.408	8,3	34.549	9,2	7.852	2,1
Hilfsenergie (nur Wärme)	16.686	4,4	918	0,2	534	0,1
Stromerzeugung	-42.755	-11,4	-115.437	-30,7	-27.662	-7,3
Summe Haustechnik	152.768	40,6	-58.889	-15,6	1.954	0,52
Haushalts- und Allgemeinstrom	90.101	23,9	4.956	1,3	2.883	0,8
Summe gesamt	242.869	64,5	-53.933	-14,3	4.837	1,3

7.4.6 Primärenergiebilanz

Der Primärenergiebedarf eines Gebäudes berücksichtigt neben dem Endenergiebedarf, der am Gebäude selbst entsteht, auch energetische Aufwendungen in vorgelagerten Bereichen bei Förderung/Anbau/Weiterverarbeitung und beim Transport der Energieträger. Der Primärenergiebedarf ermöglicht einen Vergleich unterschiedlicher Energieträger und -formen (z. B. flüssiger Energieträger und elektrische Energie) und ist im Rahmen der Bilanzierung sowohl nach EnEV als auch mit dem PHPP ein wichtiges Kriterium zur Beurteilung der energetischen Qualität eines Gebäudes inklusive der Anlagentechnik.

Tabelle 7.4-3 (Mitte) zeigt, dass sich der Primärenergiebedarf der drei Blöcke auf 21.082 kWh/a aus Rapsöl, 34.549 kWh/a aus Erdgas und wenn unterstellt wird, dass wie geplant zertifizierter „grüner“ Strom aus erneuerbaren Energiequellen eingesetzt wird, aus 918 kWh/a für Hilfs- sowie 4.956 kWh/a für Haushaltsstrom verteilt. Dem steht eine Primärenergiegutschrift von 115.437 kWh/a für den eingespeisten Strom gegenüber. Somit ergäbe sich in der Summe für die Gebäude Rotlintstraße 116-128 netto ein Primärenergiebedarf von -58.889 kWh für die Bilanzgrenze Haustechnik bzw. von -53.933 kWh/a inklusive Haushaltsstrom. Die negative Bilanz ist so zu verstehen, dass die Primärenergie per Saldo an anderer Stelle im deutschen Kraftwerkspark reduziert wird. Die Gebäude erreichen für die Bilanzgrenze Haustechnik das Niveau eines Netto-Null-Energie-Hauses, da für den Hilfsstrom zertifizierter „grüner“ Strom bezogen wird.

Tabelle 7.4-4: Zusammenfassung der Ergebnisse für End- und Primärenergiebedarf sowie Treibhausgasemissionen (bundesdeutscher Strommix)

	Endenergiebedarf		Primärenergiebedarf		CO ₂ -Emissionen	
	kWh/a	kWh/m ² a	kWh/a	kWh/m ² a	kg/a	kg/m ² a
Rapsöl	147.430	39,1	21.082	5,6	21.230	5,6
Erdgas	31.408	8,3	34.549	9,2	7.852	2,1
Hilfsenergie (nur Wärme)	16.686	4,4	45.051	12,0	10.796	2,9
Stromerzeugung	-42.755	-11,4	-115.437	-30,7	-27.662	-7,3
Summe Haustechnik	152.768	40,6	-14.755	-3,9	12.215	3,2
Haushalts- und Allgemeinstrom	90.101	23,9	243.272	64,6	58.295	15,5
Summe gesamt	242.869	64,5	228.517	60,7	70.510	18,7

Würde kein grüner Strom für Hilfs- und Haushaltsstrom eingesetzt, würde sich der Primärenergiebedarf für Hilfsstrom auf 45.051 kWh/a bzw. 12,0 kWh/(m²a) erhöhen, beim Haushaltsstrom ergäben sich 243.272 kWh/a bzw. 64,6 kWh/(m²a) (Tabelle 7.4-4 Mitte). Der Primärenergiebedarf Haustechnik läge dann bei -14.755 kWh bzw. -3,9 kWh/(m²a) – auch hier würde das Null-Energieniveau unterschritten. Der Gesamtprimärenergiekennwert mit Haushaltsstrom läge bei 228.517 kWh/a bzw. 60,7 kWh/(m²a). Auch ohne grünen Strom wird somit die Primärenergieanforderung an Passivhäuser (< 120 kWh/(m²a)) deutlich unterschritten. Die Unsicherheit, welche der beiden Varianten den realistischeren Ansatz darstellt, liegt an dem Anteil der Mieter, die sich für einen Strom aus regenerativen Energien entscheiden.

Tabelle 7.4-5 zeigt die bei den Berechnungen angesetzten Werte für den nicht regenerativen kumulierten Energieaufwand (KEA) und die Treibhausgasemissionen der Energieträger.

Tabelle 7.4-5: Berechnungsrandbedingungen für Kumulierten Energieaufwand (KEA) nichtregenerativ (≈PE-Faktor) und Treibhausgasemissionen für die betrachteten Energieträger

	KEA nicht regenerativ	CO ₂ -Faktor
	kWh/kWh _{End}	g/kWh _{End}
Raps	0,143	144
Erdgas	1,1	244
"grüner" Strom	0,055	32
Strom-Mix	2,7	647

7.5 Bilanzierung des Null-Emissions-Ansatzes für die Rotlintstraße

In diesem Kapitel soll überprüft werden, ob die Gebäude die in Kapitel 6.2 beschriebenen Leitlinien für ein Null-Emissions-Haus (auch englisch Zero-Emission-House) erfüllen. Als Bilanzgrenze wird die Wärmeversorgung des Gebäudes mit Heizung, Warmwasserbereitung, Verteilverlusten und Hilfsenergie betrachtet.

Beim ersten Schritt zum Null-Emissions-Haus muss der Energiebedarf so weit wie möglich reduziert werden. Dieses Ziel wird in der Rotlintstraße mit dem Passivhausstandard sehr gut erreicht. Auch die Verteilverluste wurden umfassend reduziert, so dass hier die Anforderungen eindeutig erfüllt sind.

Im zweiten Schritt muss der verbleibende Energiebedarf zum größten Teil mit regenerativen Energien gedeckt werden. In der Rotlintstraße wird über die thermische Solaranlage 27 % des gesamten Wärmebedarfs gedeckt, das Rapsöl-BHKW übernimmt weitere 55 %. Somit werden 82 % des Wärmebedarfs regenerativ gedeckt. Dieser Anteil erhöht sich noch, wenn man den (zugekauften) Strom aus regenerativen Energiequellen für den Hilfsstrom berücksichtigt. Damit ist auch die Grundvoraussetzung der überwiegend regenerativen Versorgung gewährleistet.

Der zugekaufte „grüne“ Strom liegt mit einem Anteil von 8,5 % an der Endenergie im einstelligen Bereich, so dass auch die Forderung, nur begrenzt Energie von außerhalb der Bilanzgrenze der Gebäude einzurechnen, erfüllt wird.

Als weitere Randbedingung für den Einsatz von Biomasse sollte das Biomassebudget von ca. 35 kWh/(m²a) für die Wärmeversorgung nicht nennenswert überschritten werden. In der Rotlintstraße fallen 39,1 kWh/(m²a) Rapsölbedarf für Wärme und (gekoppelte) Stromerzeugung an, so dass das Budget um ca. 10 % überschritten wird. Während der Planungsphase lag der Rapsöleinsatz mit 36,2 kWh/(m²a) niedriger, allerdings konnten aus statischen Gründen im 2. Bauabschnitt die Verteilleitungen nicht auf kürzestem Weg verlegt werden. Dadurch erhöhen sich die Verteilverluste und gleichzeitig der Rapsöleinsatz. Im Rahmen eines Toleranzbereichs von 10 % werden die Randbedingungen des Biomassebudgets noch erfüllt.

Im dritten Schritt sollen die verbleibenden Emissionen möglichst kompensiert werden. In der Rotlintstraße stehen hierzu die Gutschriften aus der Stromerzeugung zur Verfügung. Diese Gutschriften belaufen sich auf 27,7 t/a (Tabelle 7.4-3 rechts). Dem stehen Emissionen von 21,3 t/a aus der Rapsölnutzung (inklusive der vorgelagerten Emissionen auf dem Acker), 7,9 t/a aus der Erdgasnutzung sowie 0,5 t/a für Hilfsenergie gegenüber. In der Bilanz verbleiben somit Emissionen 2,0 t/a (bzw. 519 g/(m²a)), eine bilanzielle Null-Emission wird somit minimal verfehlt.

Hier muss jedoch berücksichtigt werden, dass die Laufzeit des BHKW einen entscheidenden Einfluss auf die Bilanz hat. In den frühen Planungsphasen wurde der Anteil des BHKW an der Wärmeerzeugung mit 85 % abgeschätzt. Dieser Wert würde mit der jetzigen Auslegung auf Basis der Jahresdauerlinie (75 %) unterschritten. In Abb. 7.5-1 sind der Verlauf der Emissionen (ohne Berücksichtigung des Haushaltsstromes) sowie die Gutschriften beim Kohlendioxid aufgrund des eingespeisten elektrischen Stromes für unterschiedliche Deckungsgrade des BHKW dargestellt. Danach ergibt sich ab einem Anteil des BHKW an

der Wärmeversorgung von 80 % eine Null-Emissions-Bilanz. Aufgrund der Optimierungsmöglichkeiten beim Betrieb in Verbindung mit dem Pufferspeicher, scheint dieser Wert nicht unerreichbar.

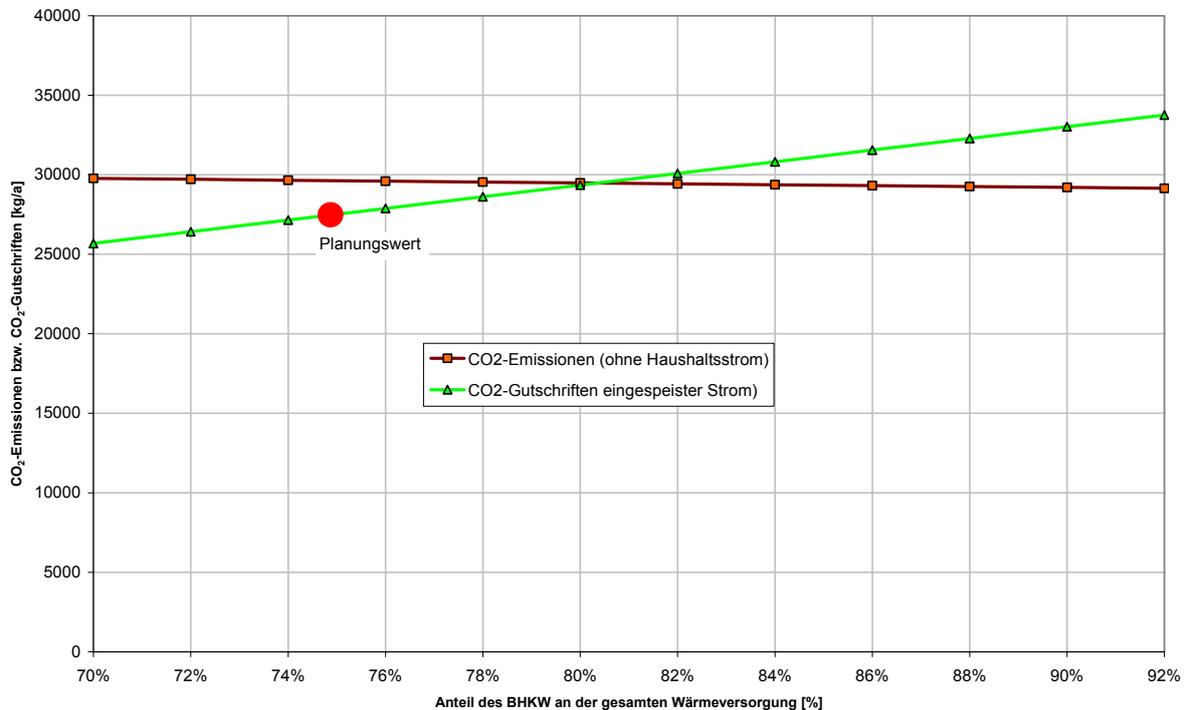


Abb. 7.5-1: Auswirkung unterschiedlicher Anteile des BHKW an der Wärmeerzeugung

Eine weitere Möglichkeit zur Erreichung von Netto-Null-Emission könnte der Einsatz von Bio-Rapsöl für das BHKW sein, da beim Bioanbau deutlich geringere Lachgasemissionen auf dem Acker entstehen. In der Praxis ist jedoch zu bedenken, dass biologisch angebautes Rapsöl überwiegend als Speiseöl oder als Rohstoff nichtenergetisch verwendet wird und auch der Preis aufgrund des geringeren Ertrages (etwa die Hälfte⁵⁷) doppelt so hoch liegt. Um nicht in direkte Konkurrenz zur Lebensmittelproduktion zu treten, wäre höchstens die Verwendung der zweiten Pressung (mit Hilfe von Lösemitteln) vertretbar. Es ist jedoch unklar, ob solches Rapsöl auf dem Markt verfügbar ist.

Ein Aspekt, der bei den Untersuchungen in diesem Bericht nicht betrachtet werden konnte, aber gegenwärtig auch nicht für zwingend erforderlich für eine Null-Emissions-Bilanz erachtet wird, ist der Energieinhalt der verwendeten Materialien und Dämmstoffe. Da überwiegend Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen verwendet werden, ist mit einer guten Bilanz bei der grauen Energie zu rechnen. Zukünftig sollten hier weitere Anstrengungen unternommen werden, auch diesen Anteil zu ermitteln und mit zu bilanzieren.

Insgesamt ergeben die Betrachtungen zum Null-Emissions-Haus, dass die Gebäude in der Rotlintstraße die Kriterien aus Kapitel 6.2 im Rahmen der Genauigkeit der zur Verfügung stehenden Bilanzierungsmethoden erfüllen und nach der Sanierung netto nahezu keine Treibhausgasemissionen mehr entstehen.

⁵⁷ Telefonische Auskunft von Herrn Ruckelshausen, Biolandwirt aus Gernsheim

7.6 Einsparungen durch die Sanierung

Vergleicht man die Verbrauchswerte vor der Sanierung mit den Bedarfswerten nach der Sanierung, so kann die Einsparung an End-, Primärenergie sowie Treibhausgasen berechnet werden (Abb. 7.6-1). Bei der Endenergie ergibt sich eine Reduktion von 584 MWh/a auf 152,8 MWh/a, was einer Einsparung von 74 % entspricht. Betrachtet man die Primärenergie, reduziert sich der Wert von 642,9 MWh/a auf -58,9 MWh. Die Treibhausgasemissionen (CO₂-Äquivalente) werden von 142,6 t/a auf 2,0 t/a reduziert (98 %).

Somit ergeben sich bei allen drei Kenngrößen sehr hohe Einsparungen durch die umfassende Sanierung der Gebäude Rotlintstraße 116-128.

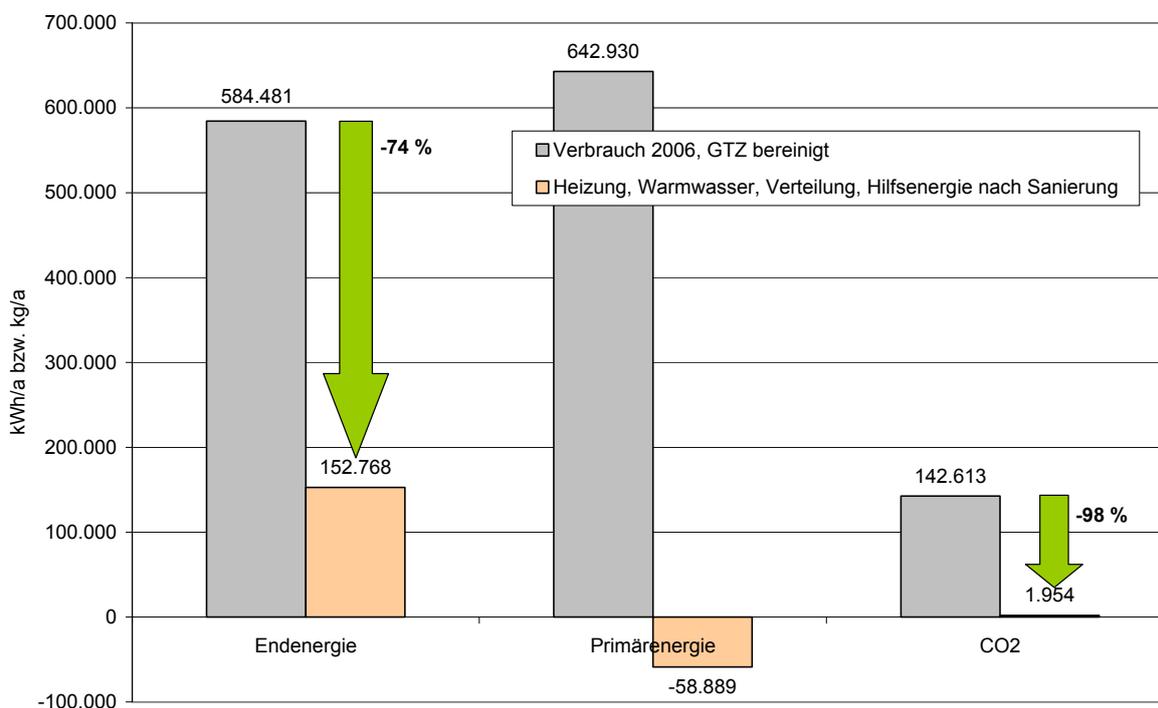


Abb. 7.6-1: Vergleich Verbrauch vor und Bedarf nach Sanierung

8 Fazit

Die Gebäude Rotlintstraße 116-128 werden von der ABG Frankfurt Holding umfassend saniert und sollen nach Abschluss der Arbeiten im Mittel über alle Gebäude Passivhaus-niveau erreichen. Darüber hinaus wird mit Hilfe einer thermischen Solaranlage und einem Rapsöl-BHKW die Restenergieversorgung überwiegend auf regenerative Energien umgestellt. Ein Ziel bei der Sanierung ist es, dass die Gebäude für die Bereiche Heizung, Warmwasser und Hilfsenergie keine nennenswerten Kohlendioxid-Emissionen mehr verursachen (Null-Emissions-Gebäude). Der vorliegende Bericht dokumentiert die Planungsphase und geht dabei besonders auf das energetische Konzept, Detailanalysen der energetischen Sanierung, Hintergrundinformationen zum Thema Rapsölnutzung, das Bilanzierungskonzept für Null-Emissions-Gebäude und die Energiebilanz der Gebäude ein.

Eine Besonderheit der Sanierung in der Rotlintstraße ist, dass für die Gebäude zwei unterschiedliche Fassadenkonstruktionen für die Passivhaus-gerechte Sanierung entwickelt und erprobt werden. Eine Nebenanforderung ist dabei der Wunsch gewesen, dass sowohl die Fassade als auch die Dämmung überwiegend aus nachwachsenden Rohstoffen bestehen soll. Beide Dämmfassaden erreichen mit Aufbaudicken von 36 cm bzw. 34 cm U-Werte von ca. 0,130 W/(m²K) und sind damit gut für den Einsatz in Passivhäusern geeignet.

Bei der Luftdichtheit der Gebäudehülle – besonders bei Passivhäusern ein wichtiges Qualitätskriterium – wurden bei den zum Zeitpunkt der Berichtserstellung vorliegenden Messwerten aus zwei von drei Bauabschnitten von im Mittel 0,3 1/h sehr gute Ergebnisse erzielt. Dies zeigt, dass das hier angewendete Konzept der innen liegenden luftdichten Ebene, die an den Fenstern auf den Außenputz verspringt, bei den Gebäuden gut funktioniert hat. Die Werte zeigen aber auch, dass bei der Ausführung auf der Baustelle und der Bauüberwachung hervorragend gearbeitet wurde.

Die Gebäude besitzen nicht nur je Wohneinheit ein Lüftungsgerät mit Wärmerückgewinnung zur Versorgung mit Frischluft, darüber hinaus wird auch in den Treppenhäusern und im Keller mechanische Lüftung eingesetzt, um die Luftqualität in allen Gebäudeteilen sicherzustellen.

Im Bereich der Anlagentechnik werden in den Gebäuden Rotlintstraße 116-128 eine Reihe von innovativen Techniken eingesetzt. Zur Realisierung einer niedrigen Warmwassertemperatur von ca. 48 °C besitzt die Gesamtanlage an zentraler Stelle eine Wasserbehandlung, die eine Legionellenbildung verhindert. Die niedrigere Warmwassertemperatur begünstigt das Ziel hohe solare Deckungsgrade mit der thermischen Solaranlage zu erreichen. Damit gleichzeitig die Wärmeverluste bei der Verteilung so gering wie möglich gehalten werden, werden die Leitungen deutlich stärker gedämmt, als sonst üblich. Die Untersuchungen zu den Einsparungen durch die verbesserte Leitungsdämmung zeigen, dass hier sehr große Potenziale liegen, die zukünftig stärker erschlossen werden müssen. Zusätzlich wird für die Warmwasserzirkulation ein Rohr-in-Rohr-System eingesetzt, das in den vertikalen Strängen den Wärmeverlust der Zirkulationsleitung nahezu vollständig eliminiert.

Eine Literaturrecherche ergab, dass bei der energetischen Rapsölnutzung die Treibhausgasemissionen beim Anbau von Raps nicht vernachlässigt werden dürfen. Andererseits besitzt Rapsöl ein nennenswertes Potenzial zur Reduktion des Primärenergiebedarfs, besonders wenn es in Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen mit hohem Nutzungsgrad eingesetzt wird. Beim Einsatz von Rapsöl sollte besonders auf die Einhaltung der Kriterien der Biomassestrom-Nachhaltigkeitsverordnung geachtet werden.

Da noch keine allgemein gültige Definition für Null-Emissions-Gebäude existiert, wurden im Rahmen dieses Berichts Leitlinien formuliert, die solche besonders nachhaltige Gebäude erfüllen sollten. Kernpunkte sind erstens eine möglichst weitgehende Reduktion des Energiebedarfs, zweitens die überwiegend regenerative Deckung des verbleibenden Restenergiebedarfs und im dritten Schritt kann gegebenenfalls eine Kompensation von verbleibenden Treibhausgasemissionen durch eigene Erzeugung erfolgen.

Die Bilanzierung der Gebäude mit dem PHPP ergab, dass zwei der drei Blöcke das Passivhausniveau erreichen, der dritte Block liegt aufgrund seiner Ausrichtung und die Verschattung durch Nachbargebäude beim Heizwärmebedarf ca. 20 % über den beiden anderen Blöcken. Dennoch wird über die gesamte Wohnfläche gemittelt ein Heizwärmebedarf von 15,4 kWh/(m²a) erreicht.

In der Gesamtbetrachtung ergibt sich für die Gebäude unter Berücksichtigung von Stromgutschriften aus dem Rapsöl-BHKW, dass sie Netto keinen Primärenergiebedarf mehr aufweisen (Netto-Null-Energie-Häuser) und zusätzlich Primärenergie im Stromnetz an anderer Stelle eingespart wird. Allerdings verbleibt aufgrund des Erdgas-Spitzenlastkessels ein nicht regenerativer Primärenergiebedarf, so dass sie nicht als „Plus-Energie-Häuser“ gelten können. Betrachtet man die Treibhausgasemissionen, so können diese fast auf Null gesenkt werden. Die verbleibenden Emissionen von nur noch 0,5 kg/(m²a) bedeuten für den betrachteten Bilanzraum (Heizung, Warmwasser, Hilfsenergie) eine Reduktion gegenüber der Situation vor der Sanierung um 98 %. Somit wird das ehrgeizige Ziel einer fast völligen CO₂-Freiheit der Gebäude erreicht. Ebenfalls werden die Leitlinien für Null-Emissions-Häuser bezüglich des niedrigen Wärmebedarfs sowie eines hohen Anteils regenerativer Energien an der Wärmeversorgung voll erfüllt.

In weiteren Berichten werden in den Jahren 2011 - 2012 die Sanierungsphase, die ökonomische Situation, die Erfahrungen der Nutzer und die Ergebnisse des Messprogramms dokumentiert werden.

Literatur

- [Blocon] Wärmebrückenprogramm HEAT3, Version 4.0.0.3, Dezember 2003, Fa. BLOCON, Schweden
- [Born 2003] Born, Rolf; Diefenbach, Nikolaus; Loga, Tobias: Energieeinsparung durch Verbesserung des Wärmeschutzes und Modernisierung der Heizungsanlage für 31 Musterhäuser der Gebäudetypologie; Institut Wohnen und Umwelt, Darmstadt 2003
- [Brunnengräber, Loga] Brunnengräber, B.; Loga, T.: Jahresdauerlinien für Niedrigenergiesiedlungen, Institut Wohnen und Umwelt, Darmstadt 1996
- [Diefenbach 2002a] Diefenbach, N.; Enseling, A.; Werner, P.: Null-Emissions-Stadt – Sondierungsstudie im Auftrag des Bundesministeriums für Bildung und Forschung, Institut Wohnen und Umwelt, Darmstadt 2002
- [Diefenbach 2002b] Diefenbach, N.: Bewertung von KWK und Biomasse; Institut Wohnen und Umwelt, Darmstadt, 2002
- [EnEV-XL4.0] Berechnungstool EnEV-XL 4.0 – Energiebilanzen gemäß Energieeinsparverordnung und Leitfaden Energiebewusste Gebäudeplanung; Institut Wohnen und Umwelt GmbH, Darmstadt 2010
- [GEMIS] Globales Emissions-Modell Integrierter Systeme, Version 4.5, Öko-Institut Darmstadt, Darmstadt, 2009
- [Großklos 2003] Großklos, M.; Loga, T.: Jahresdauerlinie einer Passivhaussiedlung, 7. Passivhaustagung 2003, Hamburg, Passivhaus Institut, Darmstadt, 2003
- [Großklos 2009] Großklos, M. ; Hörner, M. ; Diefenbach, N.: Energieeffizient, klimaneutral oder nachhaltig? Das Null-Emissions-Passivhaus am Beispiel der Rotlintstraße in Frankfurt; Beitrag zur 12. Passivhaustagung 2009 in Frankfurt am Main; Passivhaus Institut, Darmstadt
- [Heinemann] Prüfbericht des Passivhaus Instituts im Auftrag der Firma Heinemann 2001, zur Verfügung gestellt von Herrn Kink, Firma Heinemann
- [ISE 2002] Russ, C. ; Greuel, S. ; Gindele, T. ; Schabla, U. : Demonstrationsprojekt für ein innovatives Wärmeversorgungskonzept für Passivhäuser auf der Basis von passiver und aktiver Solarenergienutzung in Kombination mit Wärmepumpen; Fraunhofer ISE, Freiburg 2002
- [IWU 2002] Ebel, W. ; Großklos, M. ; Knissel, J. ; Loga, T. ; Müller, K. : Wohnen in Passiv- und Niedrigenergiehäusern, Teilbericht Bauprojekt, messtechnische Auswertungen, Energiebilanzen und Analyse des Nutzerverhaltens, Institut Wohnen und Umwelt, Darmstadt 2003
- [Kaufmann 2009] Kaufmann, B.; Peper, S.; Pfluger, R.; Feist, W.: Planungsbegleitende Beratung und Qualitätssicherung Tevesstraße Frankfurt a. M.; Passivhaus Institut, Darmstadt, 2009
- [Loga 2001] Loga, Tobias; Born, Rolf; Großklos, Marc; Bially, Matthias: Energiebilanz-Toolbox. Arbeitshilfe und Ergänzungen zum Energiepass Heizung/ Warmwasser; IWU Darmstadt, Dez. 2001

[LVPG International]	Unterlagen der LVPG International GmbH, Ober-Ramstadt, www.lvpg-international.de
[LVPG 2009]	Telefonische Auskunft von Herrn Voigtländer, LVPG, Ober-Ramstadt vom 22.01.2009
[Mainova]	Mitteilung von Frau Guse, Mainova AG, Frankfurt, vom 03.06.2009
[n50]	Ingenieurbüro n50, Kassel: Ergebnisse der Blower-Door-Tests für die Rotlintstraße 116-124 vor Sanierung
[Nipkow]	Nipkow, Jürg: Hilfsenergie Haustechnik – Einsparpotenziale und Umsetzungspfade Stromverbrauch und Einspar-Potenziale bei Aufzügen, 14. Schweizerisches Status-Seminar „Energie- und Umweltforschung im Bauwesen“, 7./8. 9.2006, ETH Zürich
[Peper 2009]	Peper, S.; Grove-Smith, J.; Feist, W.: Messtechnische Untersuchung und Auswertung Tevesstraße Frankfurt a. M.; Passivhaus Institut, Darmstadt, 2009
[Petrausch 2009-1]	Mitteilung von Herrn Petrausch, IB Baumgartner vom 27.05.2009
[Petrausch 2009-2]	Mitteilung von Herrn Petrausch, IB Baumgartner vom 18.02.2009
[PHPP2007]	Passivhaus Projektierungs Paket 2007, Passivhaus Institut, Darmstadt 2007
[Resol]	telefonische Auskunft Herr Collet, Firma Resol vom 22.01.2009
[S-Pro]	S-Pro Automation, Nauroth: Produktdatenblatt für BHKW- Greentherm 11-22, Vers. 1.6
[Schüco]	Auslegung der thermischen Solaranlage durch die Firma Schüco vom 29.04.2009 mit dem Programm T-SOL Expert 4.5 sowie Anlagenschema
[Sturm 2009]	Sturm, P.; Diefenbach, N.; Enseling, A.; Werner, P.: Vision Zero Emission Cities; in Raumforschung und Raumordnung 2/2009, Carl Heymanns Verlag Köln 2009
[Variotec]	Zertifikat des Passivhausinstitut Nr. 218 für die Haustür Variotec Thermosafe 100, ohne Datum, übermittelt am 29.05.2009 von der Firma Variotec
[Ventomaxx]	Messungen der Firma Ventomaxx, mitgeteilt in einer E-Mail vom 26.11.2008
[VIEGA]	VIEGA Praxishandbuch 2007, VIEGA GmbH, Attendorn, 2007