

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



Teilbericht

Dokumentation der Bauphase

Bauherr:

ABG Frankfurt Holding GmbH

Fördermittelgeber des Forschungsprojekts:



Darmstadt, März 2011

Autor: Marc Großklos

Reprotechnik: Reda Hatteh

IWU-Bestellnummer: 01/11

ISBN 978-3-941140-17-2

Institut Wohnen und Umwelt GmbH
Rheinstraße 65
64295 Darmstadt
Tel. 06151 - 2904-0

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

Inhalt

1	Einleitung	1
2	Vorhabensbeschreibung	5
2.1	Zustand der Gebäude vor der Modernisierung	5
2.2	Modernisierungsmaßnahmen an der Gebäudehülle.....	7
2.3	Modernisierungsmaßnahmen im Bereich der Anlagentechnik	11
2.4	Ergebnisse der Energiebilanzberechnung	12
3	Dokumentation des Modernisierungsablaufs	13
3.1	Gebäudehülle.....	13
3.1.1	Voruntersuchungen	13
3.1.2	Abbruch- und Rohbauarbeiten.....	13
3.1.3	Fenster und Türen	16
3.1.4	Außenwanddämmung im ersten Bauabschnitt	21
3.1.5	Außenwanddämmung im zweiten und dritten Bauabschnitt.....	24
3.1.6	Dachgeschosse	27
3.1.7	Dämmung im Keller	31
3.1.8	Perimeterdämmung	34
3.1.9	Sonstige Maßnahmen.....	35
3.2	Anlagentechnik	38
3.2.1	Lüftungsanlagen der Wohnungen.....	38
3.2.2	Treppenhauslüftung.....	41
3.2.3	Kellerlüftung.....	42
3.2.4	Wärmeverteilung.....	43
3.2.5	Heizzentrale.....	47
3.2.6	Semizentralen und thermische Solaranlagen	49
3.2.7	Weitere Aspekte der Modernisierung	52
4	Baubegleitende Qualitätssicherung	57
4.1	Messung der Luftdichtheit.....	57
4.2	Thermografische Untersuchung der Gebäude.....	65
4.2.1	Außenthermografie	66
4.2.2	Dokumentation der Nacharbeiten im ersten Bauabschnitt	79
4.2.3	Innenthermografie.....	82
4.2.4	Untersuchung der Anlagentechnik.....	84
5	Zusammenfassung.....	87

1 Einleitung

Die Nutzungsdauer von Gebäuden in Deutschland kann weit über 100 Jahre betragen. In diesem Zeitraum bleiben sie jedoch nicht unverändert bestehen, sondern werden mehr oder weniger häufig technischen wie optischen Erneuerungen unterzogen, da einzelne Teile deutlich kurzlebiger sind als z. B. der Rohbau. Ist das Ende der Lebensdauer eines Bauteils erreicht, so sollte die Erneuerung auf einem Niveau erfolgen, das auch die Anforderungen der kommenden Jahrzehnte erfüllt. Außerdem sollte dieser Zeitpunkt genutzt werden, um energetische Modernisierungen im wirtschaftlichen Optimum durchführen zu können.

Die genauen Anforderungen, die in den nächsten Jahrzehnten an Gebäude gestellt werden, sind selten im Voraus bekannt. Die unterschiedlichen Kriterien, wie Einfluss der Lage des Gebäudes, Wünsche der Kunden oder gesetzliche Vorgaben, können für die Zukunft nur erahnt werden. Umso hilfreicher sind langfristige Vorgaben, die die zukünftige Entwicklung grob vorzeichnen. Eine dieser Vorgaben ist die Richtlinie zur Gesamteffizienz von Gebäuden, die von der Europäischen Union 2002 erstmals verabschiedet und 2010 novelliert wurde¹. Diese Novelle definiert das Ziel, dass ab dem Jahr 2021 alle Neubauten in der gesamten Europäischen Union als so genannte „fast Null-Energie-Häuser“ nur noch einen minimalen Restenergiebedarf aufweisen und darüber hinaus zu einem nennenswerten Anteil mit regenerativen Energieträgern versorgt werden sollen. Für Bestandsgebäude sind bisher keine konkreten Zeitvorgaben definiert, aber auch diese sollen mittelfristig einen vergleichbar niedrigen Energieverbrauch wie Neubauten aufweisen.

Diese langfristigen Vorgaben auf europäischer Ebene bieten Anhaltspunkte, welche Kriterien Modernisierungskonzepte von heute erfüllen müssen, um die energetischen Anforderungen der kommenden Jahrzehnte noch zu erfüllen, bis eine weitere Erneuerung ansteht. In diesem Kontext muss auch die Modernisierung der Gebäude Rotlintstraße 116-128 gesehen werden, die dieser Bericht dokumentiert.



Abb. 1.1-1: Vergleich der Gebäude vor (links) und nach (rechts) der Modernisierung

Die Gebäude Rotlintstraße 116-128 waren an einem solchen wichtigen Wendepunkt angekommen. Sie bedurften nach 50 Jahren ununterbrochener Nutzung einer grundlegen-

¹ EU-Richtlinie 2010/31/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 19.05.2010 über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden (Neufassung), Amtsblatt der Europäischen Union vom 18.06.2010

den Sanierung (siehe Abb. 1.1-1 links). Die Lage am nördlichen Ende der Innenstadt von Frankfurt kann mittelfristig als gut eingestuft werden, so dass es auch wohnungswirtschaftlich geboten war, an dieser Stelle den Wohnraum zu erhalten bzw. zu erweitern. Damit die aufgrund der langen Nutzungszeit nötigen Investitionen langfristig Nutzen bringen, wurde für die Gebäude ein nachhaltiges energetisches Konzept entwickelt, das die zwischenzeitlich von der EU formulierten Ziele bereits erfüllt.

Die wichtigsten energetischen Ziele, die im Zuge der Modernisierung erreicht werden sollten, sind:

- Modernisierung auf Passivhaus-Standard
- Einsatz von nachwachsenden Dämmstoffen
- Reduktion der Verteilverluste von Heizung und Warmwasser
- Effizienzsteigerung beim Hilfsstrom für die Anlagentechnik und Unterstützung der Mieter bei der Reduktion des Haushaltsstromverbrauchs
- Überwiegend regenerative Energieversorgung der Gebäude mit einem Rapsöl-Blockheizkraftwerk und thermischen Solaranlagen
- Während der Nutzung in der Jahresbilanz (netto) keine Treibhausgasemissionen für Heizung, Warmwasserbereitung und Anlagentechnik (Netto-Null-Emissions-Gebäude)

Die Planungen zu dem Projekt begannen im Frühjahr 2008, die anschließende Umsetzung wurde in drei Bauabschnitte unterteilt, mit der Modernisierung wurde im Spätsommer 2008 begonnen worden. Der erste Bauabschnitt wurde im Oktober 2009 bezogen, der zweite im Oktober 2010, der dritte wurde im Frühjahr 2011 fertig gestellt.

Von den zahlreichen Firmen, die an dem Projekt gearbeitet haben, zeigt Tabelle 1.1-1 die am Planungsprozess direkt Beteiligten.

Tabelle 1.1-1: Aufgabenverteilung im Modernisierungsvorhaben

Name	Funktion
ABG Frankfurt Holding Wohnungsbau- und Beteiligungsgesellschaft mbH, Frankfurt	Eigentümer und Bauherr
faktor10 Gesellschaft für Siedlungs- und Hochbauplanung mbH, Darmstadt	Planung, Bauleitung
bauart Konstruktions GmbH & Co. KG, Lauterbach	Statik, Brandschutz
Ingenieurbüro Baumgartner, Mörlenbach	Fachplanung Heizung/Sanitär/Elektro
ITA Ingenieurgesellschaft für technische Akustik mbH, Wiesbaden	Schallschutz
freiraum Landschaftsarchitektur, Frankfurt	Außenanlagen
Institut Wohnen und Umwelt GmbH, Darmstadt	Begleitforschung

Die vorliegende Baudokumentation soll interessierten Planern und Entscheidungsträgern die in der Rotlintstraße 116-128 umgesetzten Energiesparmaßnahmen bildlich erläutern und dadurch Know-how zur Durchführung von Gebäudemodernisierungen auf höchstem energetischen Niveau weiter verbreiten. Sie ist Teil der Gesamtdokumentation des Projekts durch das IWU, die in vier Berichte aufgeteilt ist.

Der erste Bericht über die Planungsphase und das Null-Emissions-Konzept wurde im September 2010 veröffentlicht². Er enthält detaillierte Beschreibungen des Sanierungskonzepts und der geplanten Maßnahmen, weiterhin Details zur Fassadenkonstruktion, zur Wärmebrückenminimierung, dem Luftdichtheitskonzept, den Einflussgrößen auf die Energiebilanz sowie Überlegungen zu Mindestanforderungen an Null-Emissions-Häuser.

Der vorliegende zweite Bericht dokumentiert die Bauphase und die umgesetzten Maßnahmen. Auf Details des Modernisierungskonzepts und der Energiebilanz wird an dieser Stelle nicht eingegangen sondern auf den ersten Bericht verwiesen.

Der dritte Bericht wird die Kosten der Modernisierung darstellen und Vorschläge zu einer weitgehenden Umsetzung vergleichbarer Maßnahmen in bewohnten Gebäuden entwickeln.

Der Schlussbericht wird schließlich die Messdatenauswertung dokumentieren, die Ergebnisse mit den Planungswerten vergleichen und eine Gesamtbewertung des Projekts liefern.

Der Autor bedankt sich 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.

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 Großklos, M.; Koch, T.; Diefenbach, N.: Wissenschaftliche Begleitung der Sanierung Rotlintstraße 116-128 in Frankfurt am Main, Teilbericht Planungsphase und Null-Emissions-Konzept, IWU, Darmstadt, 2010; kostenloser Download im Internet unter www.iwu.de



Abb. 1.1-2: Zweiter Bauabschnitt nach der Modernisierung

2 Vorhabensbeschreibung

Das folgende Kapitel gibt einen Überblick über den Zustand der Gebäude vor der Modernisierung und über die einzelnen energetischen Maßnahmen an den Gebäuden und der Anlagentechnik.

2.1 Zustand der Gebäude vor der Modernisierung

Die Gebäude der Rotlintstraße wurden 1956 errichtet und liegen in einem nachgefragten Wohnviertel im Frankfurter Nordend; sie waren vor der Modernisierung voll vermietet. Die Wohnungen waren von der ABG Frankfurt Holding bei Mieterwechsel zwar immer wieder saniert worden (Fenster austausch, Gasetagenheizungen, neue Bäder), zentrale Installationen stammten jedoch teilweise noch aus der Errichtungszeit der 50er Jahre des letzten Jahrhunderts.



Abb. 2.1-1: Rotlintstraße 116-120 (links) und Rotlintstraße 126-128 (rechts) vor der Modernisierung

Auch das äußere Erscheinungsbild der Gebäude war – vom Zahn der Zeit angegriffen – als trist und wenig attraktiv zu bezeichnen (Abb. 2.1-1). Die Balkone wiesen nennenswerte Schäden auf (Abb. 2.1-2). Sowohl an den Außenfassaden als auch in den Treppenhäusern zeigten sich Risse in den Wänden (Abb. 2.1-3).

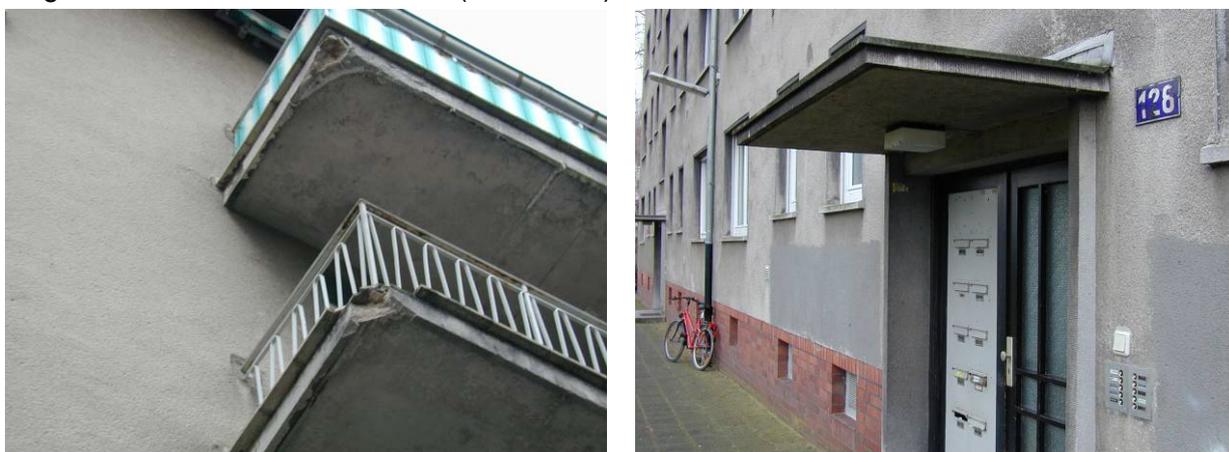


Abb. 2.1-2: Detailansichten vor der Modernisierung: Balkone wiesen deutliche Schäden auf (links), Eingangssituation im Stil der 50er Jahre (rechts)



Abb. 2.1-3: Innenansichten vor der Modernisierung: Riss in der Treppenhauswand (links), Undichtigkeiten am alten Rollladenkasten mit Schlieren an der Wand (rechts)

Aufbau der Gebäudehülle vor der Modernisierung

Die Gebäude sind in ihrer Konstruktion typisch für Nachkriegsbauten in westdeutschen Großstädten. Die Wände sind mit 30 cm dicken Trümmerhohlblocksteinen gemauert, die aus den Trümmern der im Zweiten Weltkrieg zerstörten Gebäude Frankfurts von der Trümmer-Verwertungs-Gesellschaft (TVG) hergestellt worden waren. Innenwände waren überwiegend aus Trümmer-Vollziegel hergestellt. Die Geschossdecken sind 16 cm starke Stahlbetondecken. Nur in den Treppenhäusern waren noch einfach verglaste Holzfenster vorhanden, die Wohnungen besaßen bereits Isolierverglasungen in Kunststoffrahmen unterschiedlichen Alters.

Die Wärmeleitfähigkeit der Bauteile konnte nicht genau ermittelt werden. Auf Basis historischer Literaturangaben für Trümmerziegel ergab sich für die Außenwände ein Wärmedurchgangskoeffizient (U-Wert) von ca. $1,4 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, dies ist ein typischer Wert für Nachkriegsbauten. Die obersten Geschossdecken waren bereits mit 4 cm Zusatzdämmung und einer weiteren Estrichschicht energetisch leicht verbessert worden, der U-Wert lag hier bei $0,6 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Der Wärmeverlust über die Kellerdecke lag bei $1,4 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ und die Fenster erreichten gar nur U-Werte von ca. $2,9 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Als Wärmebrücken besonders erwähnenswert waren die Balkone, die ohne thermische Trennung an die Geschossdecken anbetoniert waren. Tabelle 2.1-1 gibt einen Überblick über die Bauteilaufbauten und die ungefähren U-Werte.

Während im Urzustand die Wohnungen über Einzelöfen beheizt wurden, waren in den 80er Jahren des letzten Jahrhunderts alle Wohnungen mit Gasetagenheizungen ausgestattet worden, die auch die Warmwasserversorgung mit übernahmen. Die Heizwärmeverteilung erfolgte mit Leitungen auf Putz.

Die Belüftung der Wohnungen erfolgte über Fensterlüftung, in den Küchen waren zusätzliche Lüftungsgitter vorhanden, die aber teilweise von den Mietern mit Tapete verschlossen worden waren. Messungen der Luftdichtheit vor der Modernisierung ergaben n50-Werte zwischen $2,8 \text{ 1/h}$ und $3,5 \text{ 1/h}$, der Mittelwert lag bei $3,2 \text{ 1/h}$. Somit ist die Luftdichtheit für Bestandsgebäude dieses Baualters als typisch zu bezeichnen.

Tabelle 2.1-1: Übersicht über die Bauteile des Gebäudes vor der Modernisierung

Bauteil	Aufbau	U-Wert [W/(m²K)]
Außenwand	2 cm Innenputz 30 cm Trümmerhohlblockstein (TVG) ($\lambda=0,61$ W/(mK) nach Hummel, 1947) 2 cm Außenputz	1,4
Treppenhauswand im DG	2 cm Innenputz 24 cm TVG ¹ -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 sowie Briefkastenanlage aus Metall <u>Keller- und Dachbodentüren</u> : Holztüren, 3 cm dick	4,5 2,0

¹ Frankfurter Trümmerverwertungsgesellschaft

2.2 Modernisierungsmaßnahmen an der Gebäudehülle

Im Zuge der Modernisierung sollten die Gebäude energetisch, unter Aspekten des Schallschutzes, optisch sowie vom Grundrissangebot auf den neuesten Stand gebracht werden. Die Bestandswohnungen wiesen 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 es wurden nicht tragende Innenwände versetzt. Die alten Balkone wurden abgebrochen und durch neue, vergrößerte Balkonanlagen ersetzt. Auf die Bestandsgeschosse wurde jeweils ein Staffelgeschoss mit 3 bzw. 4 Zimmerwohnungen aufgesetzt. Diese Wohnungen besitzen eine großzügige Aufteilung sowie Dachterrassen.

Abb. 2.2-1 zeigt exemplarisch die Grundrisse vor Beginn der Maßnahmen, Abb. 2.2-2 das gleiche Gebäude im Endzustand.

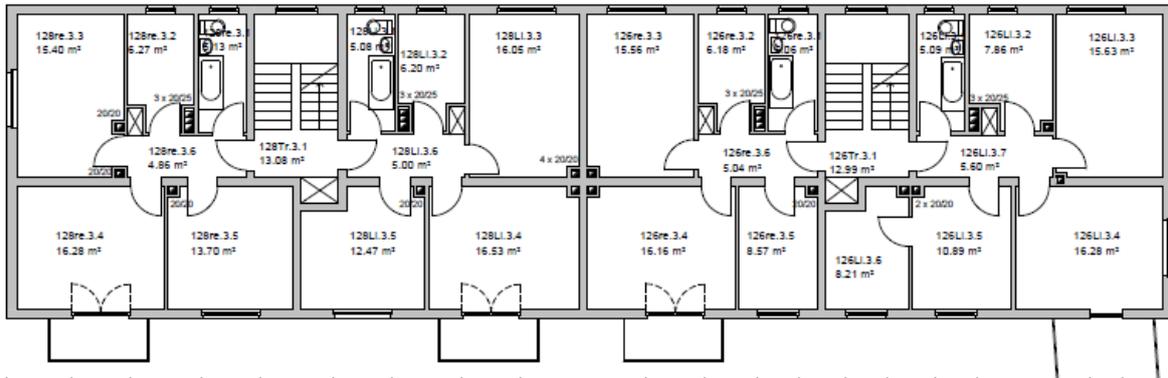


Abb. 2.2-1: Typischer Grundriss im dritten Bauabschnitt vor der Modernisierung

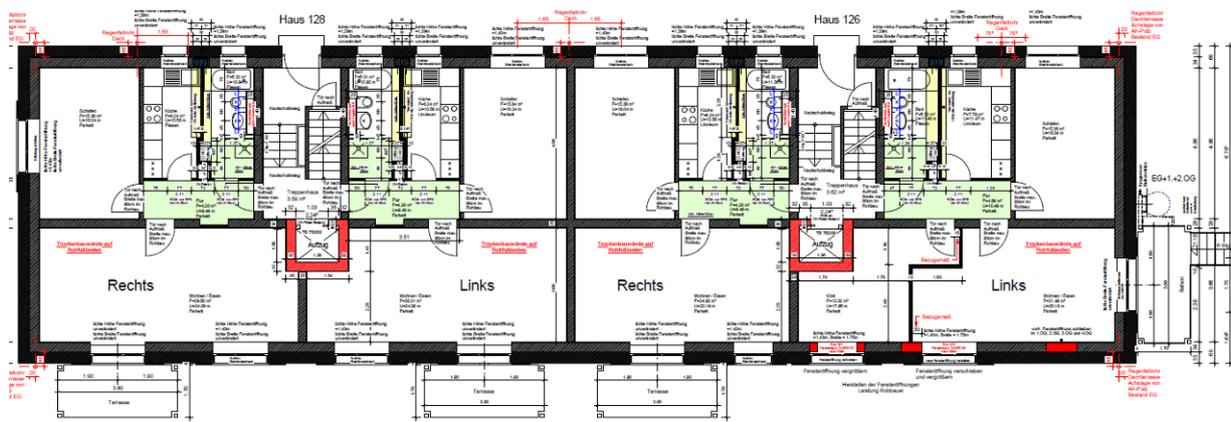


Abb. 2.2-2: Typischer Grundriss im dritten Bauabschnitt nach der Modernisierung

Die Gebäude werden nach der Modernisierung im Mittel über die gesamte Wohnfläche den Passivhausstandard erreichen. Dazu war eine umfassende Dämmung der Gebäudehülle erforderlich, gleichzeitig mussten aber auch Wärmebrücken so weit wie möglich entschärft werden. Bei Bestandsgebäuden sind hier besonders das Kellerdeckenaufleger, die Kellerinnenwände und der Kellerabgang zu nennen, deren Wärmeverluste sich deutlich auf die Energiebilanz auswirken können, da ein vollständiges Vermeiden der Wärmebrücken nicht möglich ist. Somit muss die thermische Hüllfläche in besonders hoher Qualität ausgeführt werden, um das „Handicap“ des Bestandsgebäudes zumindest teilweise zu kompensieren.

Im Folgenden werden die einzelnen Maßnahmen beschrieben.

Dachgeschoss

Bei allen Gebäuden wurden die alten Dächer komplett abgetragen und an ihrer Stelle wurde neuer Wohnraum im Dachgeschoss durch eine Aufstockung geschaffen. Das Staffelgeschoss wurde mit vorgefertigten Holzleichtbau-Konstruktionen errichtet, die vor Ort mit Zelluloseflocken ausgeblasen wurden. Den oberen Abschluss bildet ein Gründach auf einer Holzfaserverplatte, die im ersten Bauabschnitt auf einer 8 cm hohen Hinterlüftung angeordnet ist, in den beiden anderen Bauabschnitten auf einer zusätzlichen Mineralfaserdämmung von 5 cm Stärke. Die Dachterrassen wurden ebenfalls mit einer Holzleichtbau-Konstruktion ausgeführt und der Hohlraum mit Zelluloseflocken vor Ort ausgeblasen.

Außenwände

Die Außenwanddämmung sollte überwiegend aus nachwachsenden Rohstoffen bestehen. Aus diesem Grund wurden als Dämmstoff Zelluloseflocken gewählt, für die Unterkonstruktion der Fassade wurden Holzwerkstoffe sowie magnesitgebundene Holzwolleplatten eingesetzt. Im Gesamtprojekt wurden zwei unterschiedliche Konzepte verwirklicht. Die Außenwände im ersten Bauabschnitt (Rotlintstraße 116-120) erhielten ein Fassadensystem mit vorgefertigten Kästen aus OSB-Platten (Oriented Strand Boards - Holzfaserplatten), die mit Metallwinkeln, ohne direkten Wandkontakt, befestigt wurden. Darauf folgten eine Holzsparschalung und eine magnesitgebundene Holzwolleplatte, die verputzt wurde. Die Gesamtdicke dieses Aufbaus liegt bei 36 cm. Details zu dieser Fassade werden in Kapitel 3.1.4 ausgeführt.

Die Unterkonstruktion der Außenwände des zweiten und dritten Bauabschnitts besteht aus Konsolen und außen liegenden Kanthölzern, die an Metallschienen senkrecht an der Bestandswand befestigt werden und die Unterkonstruktion für Sparschalung und Holzspanplatten bilden. Aufgrund des geringeren Holzanteiles konnte bei dieser Konstruktion die Dämmdicke um 2 cm reduziert werden. Details zu dieser Fassade sind in Kapitel 3.1.5 ausgeführt.

Fenster und Türen

Als Fenster kamen im ersten Bauabschnitt Passivhaus-geeignete Fenster vom Typ Kochs eco1 zum Einsatz, im zweiten/dritten Bauabschnitt aufgrund des besseren Rahmen-U-Wertes (U_f) Fenster vom Typ Kochs eco2. Sie wurden vor das Bestandsmauerwerk montiert, der alte Außenanschlag wurde nicht entfernt sondern in Trockenbau geschlossen. Beim Hauseingang wurden zertifizierte, Passivhaus-geeignete Haustüren vom Typ Variotec Thermosafe 100 mit Fensterausschnitt eingesetzt, als Kellerabgangstüren wurden gedämmte Stahltüren verwendet.

Keller

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

Tabelle 2.2-1 zeigt die Zusammenstellung der Bauteilaufbauten und die U-Werte der Gebäude nach der Modernisierung.

Tabelle 2.2-1: Übersicht über die Wandaufbauten nach Modernisierung 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
Außenwand 1. Bauabschnitt (Stützkonstruktion mit vorgefertigten U-Profilen 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 magnesitgebundene Holzwolleplatte ($\lambda=0,090$ 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 magnesitgebundene Holzwolleplatte ($\lambda=0,090$ 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 cm • 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 im Dachgeschoss mit 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 ($\lambda=0,7$ W/(mK)) 	0,109
Außenwand im Dachgeschoss (über Bestandswand)	<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 magnesitgebundene Holzwolleplatte ($\lambda=0,090$ 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 bzw. 5 cm Mineralfaser ($\lambda=0,04$ W/(mK)) • 2,5 cm OSB-Platte mit Abdichtung und Gründachsubstrat 	0,105 bzw. 0,090

2.3 Modernisierungsmaßnahmen im Bereich der Anlagentechnik

Lüftung

Bei der Planung von Modernisierungskonzepten muss ein geeignetes Lüftungskonzept ausgewählt werden. In der Rotlintstraße war der Einsatz einer mechanischen Zu- und Abluft mit Wärmerückgewinnung zwingend erforderlich, um den Passivhausstandard erreichen zu können. Jede Wohnung erhielt dazu ein eigenes, individuell einstellbares Lüftungsgerät, das im Badezimmer montiert wurde. 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 zwischen innen und außen berechnet, steuert die Betriebszeiten der Kellerlüftung, um sommerliche Auffeuchtung zu vermeiden.

Wärmeversorgung

Die Energieversorgung der Gebäude wird überwiegend regenerativ erfolgen, da eines der Ziele im Projekt die starke Absenkung der Treibhausgas-Emissionen über den Einsatz regenerativer Energien und die weitgehende Kompensation der verbleibenden Treibhausgasemissionen ist (Null-Emissions-Haus). Zentrales Element der Wärmeversorgung ist ein Rapsöl-betriebenes Blockheizkraftwerk, das gleichzeitig Wärme und Strom erzeugt sowie ein Erdgas-Brennwertkessel als Spitzenlast-Wärmeerzeuger in der neu errichteten Heizzentrale. Die Gebäude werden über ein kleines Nahwärmenetz versorgt, das überwiegend in der Kellerdeckendämmung oder mit einer Zusatzdämmung im Erdreich verlegt ist.

In den blockweise angeordneten Semizentralen in je einem Kellerraum eines Blockes wird die Wärme für die Beheizung verteilt. Auf jedem Block befindet sich eine 32 m² große thermische Solaranlage, die mehr als die Hälfte des Wärmebedarfs für die Warmwasserbereitung deckt und die Solarspeicher der Semizentrale erwärmt. Um den solaren Deckungsgrad zu optimieren und die Verteilverluste zu minimieren, wird die Warmwasserversorgung mit einer Temperatur von ca. 48 °C betrieben. Damit diese niedrige Temperatur möglich ist, wird das Trinkwasser chemisch desinfiziert. Ein Rohr-in-Rohr-System bei der vertikalen Warmwasserverteilung reduziert zusätzlich die Bereitschaftsverluste der Warmwasserzirkulation. Als weitere Maßnahmen wurden in jeder Wohnung ein Trockenschrank im Badezimmer, Standby-Abschalter für das Wohnzimmer sowie eine Erstinstallation an Energiesparlampen zur Reduktion des Verbrauchs an elektrischer Energie eingebaut. Für den Hilfs- und Allgemeinstrom wird zertifizierter Strom aus regenerativen Energiequellen eingesetzt.

2.4 Ergebnisse der Energiebilanzberechnung

Für die Gebäude wurden blockweise Bilanzberechnung mit dem Passivhaus-Projektierungspaket (PHPP) durchgeführt. Unter Berücksichtigung der tatsächlichen Bauausführung und der gemessenen Werte der Luftdichtheit der Gebäudehülle ergibt sich nach der Modernisierung ein mittlerer Heizwärmebedarf von 15,2 kWh/(m²a). Dabei erreichen der erste und dritte Bauabschnitt die Anforderungen an den Heizwärmebedarf von Passivhäusern von 15 kWh/(m²a). Der zweite Bauabschnitt überschreitet aufgrund seiner Ost-West-Orientierung, die den Ertrag aus passiver Solarenergienutzung reduziert, den angestrebten Heizwärmebedarf. Seine Heizlast liegt jedoch bei 10 W/m², so dass auch er die Anforderungen erfüllt.

Durch die Maßnahmen zur Reduktion der Wärmeverluste bei der Warmwasserbereitung und -verteilung erreicht die thermische Solaranlage einen Deckungsgrad von ca. 60 %. Auf Basis der Auslegungsdaten des BHKW und der prognostizierten Struktur des Wärmeverbrauchs für Heizung und Warmwassernacherwärmung ergibt sich für das BHKW ein Deckungsanteil von 75 % an der gesamten Wärmeerzeugung, nur ca. 25 % müssen über die Erdgas-Spitzenlasttherme gedeckt werden. Insgesamt ergeben sich ca. 90.000 kWh Wärmeerzeugung aus dem BHKW und 29.300 kWh aus der Spitzenlasttherme, hinzu kommen 44.500 kWh aus der thermischen Solaranlage für die Warmwasserbereitung.

Die Endenergieeinsparung der Gebäude im Vergleich zum unsanierten Zustand liegt bei 74 % inklusive Warmwasserbereitung und Hilfsenergieeinsatz, die Reduktion bei den Treibhausgasemissionen liegt bei 98 %. Das Ziel, dass die Gebäude nach der Modernisierung als Null-Emissions-Gebäude netto keine Treibhausgasemissionen mehr verursachen, ist somit nahezu umgesetzt und kann bei einer optimierten Betriebsführung des BHKW auch vollständig erreicht werden.

3 Dokumentation des Modernisierungsablaufs

3.1 Gebäudehülle

In diesem Kapitel werden die vorbereitenden Untersuchungen, die Modernisierungsmaßnahmen an der Gebäudehülle und weitere Arbeiten dokumentiert, die ebenfalls Rückwirkungen auf die Energiebilanz der Gebäude haben.

3.1.1 Voruntersuchungen

Im Vorfeld der Modernisierungsplanung wurde eine Reihe von Untersuchungen durchgeführt, um Basisdaten für die Planung zu erhalten. So wurden an der Decke zum Keller, zwischen den Geschossen und zum Dachgeschoss Kernbohrungen durchgeführt, um Informationen über deren Aufbau und die Tragfähigkeit zu gewinnen (Abb. 3.1-1 links). Weiterhin wurde exemplarisch Mauerwerk frei gelegt, um dessen genaue Zusammensetzung zu untersuchen und entnommene Steine auf ihre Festigkeit überprüfen zu können (Abb. 3.1-1 rechts). Für die spätere Befestigung der Fassadedämmung wurden Dübelauszugsversuche in den Außenwänden unternommen, um deren Tragfähigkeit bestimmen zu können. Die schalltechnischen Eigenschaften der geplanten Fußbodenaufbauten wurden mit Messungen mit einem Hammerwerk überprüft. Schließlich wurde der Baugrund um die Häuser und dessen Tragfähigkeit untersucht, um Eingangsdaten für die statischen Bemessungen zu erhalten und um grundlegende statische Probleme an den Gebäuden auszuschließen zu können.



Abb. 3.1-1: Voruntersuchungen: Kernbohrung zur Ermittlung des exakten Aufbaus der Decke (links) und Freilegen Mauerwerks im Bereich der Fenster (rechts)

3.1.2 Abbruch- und Rohbauarbeiten

Die Gebäude in der Rotlintstraße waren während ihrer Modernisierung nicht bewohnt, da den Mietern von der ABG Frankfurt Holding alternative Wohnungen angeboten worden waren. Somit konnten die Gebäude einer umfassenden Modernisierung unterzogen werden. Dazu gehörte der Abbruch der alten Balkone (Abb. 3.1-2 links), die nicht nur klein sondern auch stark sanierungsbedürftig waren. Da einige Räume in ihrer Nutzung geändert wurden, wurden teilweise die vorhandenen Brüstungen an den Fenstern entfernt (Abb. 3.1-2 rechts).



Abb. 3.1-2: Abbruch der Bestandsbalkone und von Fensterbrüstungen

Im Innern wurden alle alten Kamine abgebrochen (Abb. 3.1-3 links). Dieser Raum wurde teilweise für die Verlegung der neuen Steigstränge von Trinkwasser, Abwasser, Heizung und Elektroversorgung verwendet.



Abb. 3.1-3: Abriss der alten Kaminschächte und Demontage der Fenster

Im Zuge der Modernisierung sollte auch der Schallschutz der Wohnungen verbessert werden. Im Haus Rotlintstraße 116 wurde aus diesem Grund der Estrich entlang aller Wände aufgemeißelt und mit Mineralfaserdämmung ausgestopft (Abb. 3.1-4 links). Da der Aufwand für diese Maßnahme jedoch sehr hoch war, die Verbesserung beim Schallschutz aber nicht überzeugte, wurde in allen weiteren Häusern der Estrich komplett entfernt und mit Trittschalldämmung und Schutz vor Körperschallübertragung an den Übergängen zu den Wänden erneuert, um einen zeitgemäßem Standard zu erreichen (Abb. 3.1-4 rechts).



Abb. 3.1-4: Schalltechnische Entkopplung des Estrichs im ersten Gebäude, Demontage des Estrichs in den weiteren Gebäuden

Zwischen Küche und Badezimmer sowie bei einzelnen anderen Räumen wurden nicht tragende Wände entfernt, um den Zuschnitt der Wohnungen an heutige Anforderungen anzupassen (Abb. 3.1-5 links). Weiterhin wurden die alten Dächer sowie die Haustrennwände komplett entfernt, um das neue Staffelgeschoss aufsetzen zu können (Abb. 3.1-5 rechts).



Abb. 3.1-5: Abbruch von nicht tragenden Innenwänden (links) und des Daches (rechts)

Durch den Abbruch der Dächer und das Aufsetzen der neuen Staffelgeschosse änderte sich die Lastverteilung im Gebäude. In der Anfangsphase war überlegt worden, ob die Fundamente aus diesem Grund ertüchtigt werden müssten. Letztendlich wurden die Fundamente nicht frei gelegt, sondern im Keller wurde auf einer Seite des Gebäudes eine ca. 12 cm dicke Platte auf den vorhandenen Fußboden aufbetoniert, um die Lastveränderungen zu kompensieren und einen Grundbruch zu verhindern (Abb. 3.1-6 links).



Abb. 3.1-6: Fundamentertüchtigung im Keller mit aufbetonierter Platte (links) und Ansicht des zweiten Bauabschnitts (rechts)

Abb. 3.1-6 rechts zeigt die Westansicht des zweiten Bauabschnitts nach Abschluss der Abbrucharbeiten.

3.1.3 Fenster und Türen

Alle Bestandsfenster wurden komplett demontiert und die alten Fensterbänke abgebrochen (Abb. 3.1-7 links). Dadurch war im unteren Bereich des Fensterausschnitts unebenes Rohmauerwerk vorhanden, das in einer einfachen Schalung mit Beton gefüllt wurde, um einen ebenen Abschluss der Brüstung zu erhalten (Abb. 3.1-7 rechts).



Abb. 3.1-7: Demontage Bestandsfenster und Herstellen eines ebenen Anschlusses im Bereich der Brüstung

Anschließend wurde unter dem zukünftigen Fensterbank-Anschluss ein Kantholz befestigt (Setzholz), das für eine einfache Montage der Fenster sinnvoll ist (Abb. 3.1-8 links). Die Passivhausfenster wurden dann mit Metallwinkeln von außen vor die Rohbauöffnung geschraubt, wobei zwischen Setzholz und Fensterrahmen noch ein Purenit-Streifen zur thermischen Entkopplung des Fensterbankanschlusses eingefügt wurde (Abb. 3.1-8 rechts).



Abb. 3.1-8: Setzholz unter dem Fenster (links) und Montage der Fenster von außen vor die Fassade mit Purenit-Streifen zur thermischen Entkopplung der Fensterbank (rechts)

Auf der Innenseite des Fensters wurde die Innenlaibung mit Gipskarton-Platten verkleidet (Abb. 3.1-9 rechts), wobei es wichtig war, dass der Gips zur Befestigung der Platten in dem Bereich, in dem das alte Fenster befestigt war (Abb. 3.1-9 links), das Rohmauerwerk gut ausfüllt, da an dieser Stelle die luftdichte Ebene vom Innenputz auf den Außenputz springt. Im Erdgeschoss waren ursprünglich Rollladenkästen vorhanden, die mit Dämmung ausgefüllt und anschließend ebenfalls mit Gipskarton-Platten verschlossen wurden.



Abb. 3.1-9: Fensterlaibung von Innen, bevor innere und äußere Abdichtungen vorgenommen wurden (links) und Füllen der Lücke der alten Fenster mit Gips (rechts)

Schließlich wurde innen die neue Fensterbank montiert (Abb. 3.1-10 links). Außen sitzt die Fensterbank auf einem Dämmklotz aus Polystyrol auf, befestigt ist sie mit Schrauben im Purenit-Streifen unterhalb des Fensters (Abb. 3.1-10 rechts).



Abb. 3.1-10: Fensterbankanschluss innen und außen

Besonders wichtig war das Herstellen eines luftdichten Anschlusses der Fenster an die luftdichte Ebene des Gebäudes. Dazu wurden die Fenster außen mit einem robusten, dauerelastischen Butylband auf die alte Bestandaubung bzw. den neuen Glattnstrich angedichtet (Abb. 3.1-11 links). Zur besseren Haltbarkeit der Verklebung wurde zusätzlich Kartuschen-Kleber eingesetzt, besonders in den Ecken, in denen das Band umgeschlagen werden musste (Abb. 3.1-11 rechts).



Abb. 3.1-11: Abdichtung der Fenster mit Butylbändern und Nacharbeiten in den Ecken

Das Setzholz blieb aus Feuchteschutzgründen teilweise von der Abdichtung ausgespart (Abb. 3.1-12 links) und wurde nur von innen abgedichtet. Weiterhin wurden die Metallwinkel, mit denen die Fenster an die Wand geschraubt wurden, mit Dichtmasse überstrichen, damit es keine Hinterströmung der Abdichtung in diesem Bereich geben kann (Abb. 3.1-12 rechts).



Abb. 3.1-12: Ansichten der eingebauten, abgedichteten Fenster, rechts inklusive Abdichtung der Befestigungswinkel

Mit dieser Vorgehensweise beim Herstellen der luftdichten Ebene im Bereich der Fenster wurden sehr gute Resultate erreicht, wie die Ergebnisse der Drucktests in Kapitel 4.1 belegen.

Um die Fenster herum wurde, wie in den Kapiteln 3.1.4 bzw. 3.1.5 gezeigt wird, bei beiden Fassadenkonstruktionen ein Kasten hergestellt, um die Gefache an dieser Stelle aussparen zu können (Abb. 3.1-13 links). Auf der Fensterseite wurde der Kasten aus Brandschutzgründen mit Gipsfaserplatten verkleidet. Zwischen Kasten und Fenster verblieb ein Zwischenraum von 5 - 6 cm, um den Fensteranschluss thermisch etwas von der senkrechten OSB-Platte und der Gipsfaserplatte zu entkoppeln (Abb. 3.1-13 rechts). Dieser wurde mit Mineralwolle ausgestopft. Anschließend wurde ein Dämmstreifen aus Mineralfaser aufgesetzt und der Fensterrahmen bis auf ca. 2,5 cm komplett überdämmt (Abb. 3.1-14 rechts).



Abb. 3.1-13: Einbindung der Fenster in die Fassadendämmung (links), Bepanung der Fensterumrandung mit Gipsfaserplatten und Ausfüllen der Fugen mit Mineralfaser (rechts)



Abb. 3.1-14: Mineralfaserstreifen zur Überdämmung der Fensterlaibung (links), verbleibender, nicht überdämmter Fensterrahmen (rechts)

Haustüren

Die alten Haustüren besaßen seitlich neben der Tür noch eine Briefkastenanlage aus Metall, die als Einsatz in ein feststehendes Holzelement eingebaut war. Diese Konstruktion war sowohl thermisch als auch aus Gründen der Luftdichtheit der Gebäudehülle nicht mehr sinnvoll, so dass im Rahmen der Modernisierungsarbeiten Haustür und Briefkastenanlage getrennt wurden. Dazu wurde die Öffnung durch Abmauerung auf die Breite der neuen Tür reduziert (Abb. 3.1-15 links).



Abb. 3.1-15: Abmauerung des Hauseingangs (links), Purenit-Streifen unter der Haustür zur thermischen Entkopplung des Anschlusses (rechts)

Am unteren Anschluss der Haustür zum Eingangspodest wurde eine Aussparung für einen 6 cm tiefen Streifen aus schlecht wärmeleitendem, aber druckfestem Purenit hergestellt und die neue Passivhaus-geeignete Haustür eingebaut (Abb. 3.1-15 rechts). Ein Detail der Türschwelle vor der Montage ist in Abb. 3.1-16 links zu sehen. Die umlaufende Fuge wurde mit Ortschaum ausgefüllt und anschließend der Innenputz zur Abdichtung der Tür aufgebracht. Die fertige Eingangssituation ist in Abb. 3.1-16 rechts zu sehen, wobei das Vordach in der Aufnahme noch nicht vorhanden ist. Im zweiten und dritten Bauabschnitt wurden die Briefkasten-/Klingelanlagen frei am Zugangsweg zur Haustür aufgestellt.



Abb. 3.1-16: Detailansicht der Schwelle der Haustür vor Montage (links) und Eingangssituation im ersten Bauabschnitt (rechts)

Kellertüren

Die Türen zwischen Eingangspodest im Treppenhaus und dem Kellerabgang stellen die Schnittstelle zwischen temperiertem Gebäudevolumen und unbeheiztem Keller dar und sind gleichzeitig Teil der luftdichten Hülle. Aus diesem Grund wurden thermisch verbesserte Stahltüren mit einem U-Wert von ca. $1,1 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ eingesetzt. Zusätzlich besitzen die Türen zur Verbesserung der Luftdichtheit sich absenkende Dichtungen in der Schwelle. Die Laibung der Tür zum Keller wurde mit 2 cm dicken PU-Platten gedämmt, um die Wärmebrücke an dieser Stelle zu vermindern (Abb. 3.1-17).



Abb. 3.1-17: Glattstrich nach Demontage der alten Kellertür (links), Dämmung der kleinen Türleibung mit 2 cm PU-Platten

3.1.4 Außenwanddämmung im ersten Bauabschnitt

Für die Gebäude im ersten Bauabschnitt wurde eine Fassadendämmung entwickelt, die überwiegend aus nachwachsenden Dämmstoffen und Baumaterialien besteht. Damit sollten Alternativen zum konventionellen Wärmedämmverbundsystem in Mehrfamilienhäusern erprobt werden. Als Dämmstoff kommen Zelluloseflocken aus recyceltem Zeitungspapier zum Einsatz. Diese benötigen einen abgeschlossenen Hohlraum, in den sie eingeblasen werden. Aus diesem Grund wurde eine Unterkonstruktion entwickelt, die den erforderlichen Hohlraum schafft. Im ersten Bauabschnitt wurden vorgefertigte, geschosshohe U-Profile aus

OSB-Platten (Abb. 3.1-18 links) und aussteifenden Kanthölzern in den Ecken an der Bestandswand mit Metallwinkeln mit 5 cm Abstand zur Wand (Abb. 3.1-18 rechts) montiert. Dadurch konnte die Wärmebrückenwirkung der OSB-Platte deutlich reduziert werden.



Abb. 3.1-18: U-Profile der Fassadenkonstruktion und die Befestigung 5 cm vor der Wand mit Metallwinkeln

Auf die U-Profile wird eine Vollholz-Sparschalung (2,5 cm dick, 25 cm Rastermaß, 10 cm Bretthöhe) aufgebracht (Abb. 3.1-19 links), die ihrerseits als Auflage für magensitgebundene Holzwolleplatten (Abb. 3.1-19 rechts) dient. Die 3,5 cm dicken Holzwolleplatten werden mit Drucknaglern auf der Sparschalung befestigt und schließen den Hohlraum, der die Zellulose-Dämmung aufnehmen wird nach außen ab (Abb. 3.1-20 links). Gleichzeitig dient sie als Putzträgerplatte. Das rechte Bild in Abb. 3.1-20 zeigt die Außenwand mit dem Unterputz und Bohrungen, über die die Zelluloseflocken in den Hohlraum eingeblasen werden.



Abb. 3.1-19: Sparschalung auf der Unterkonstruktion als Untergrund für die Putzträgerplatte und montierte Holzwolleplatte als Putzträger



Abb. 3.1-20: Blick in ein Gefach und Fassadenansicht mit Unterputz und Bohrungen für das Ausflocken mit Dämmung

Auf Höhe der Geschosdecken wurde jeweils ein Kantholz (12 x 12 cm) und ein horizontales Brett aus OSB-Platten befestigt (Abb. 3.1-21 links), die die Gewichtskräfte der Dämmung aufnehmen. Ab dem 1. Stock entsteht dann zwischen den Oberseiten der U-Profile des unteren Geschosses und dem horizontalen Brett ein zusätzliches, ca. 38 cm hohes Gefach, das ebenfalls ausgeflockt wurde. Im Erdgeschoss wurde die Perimeterdämmung bis an die Unterseite des Kantholzes herangeführt (siehe auch Kapitel 3.1.8) und der Zwischenraum mit einem Dämmstreifen gefüllt.



Abb. 3.1-21: Horizontales Kantholz auf Höhe der Kellerdecke und Ansicht Südseite während der Montage der Unterkonstruktion

Am Übergang zwischen Fassadenkonstruktion der Bestandsgehosse und den Holzelementen im Dachgeschoss bzw. der Terrassendämmung wurde die verbleibende Fuge mit Wolle ausgestopft (Abb. 3.1-22 links).

Der Fenstereinbau (Abb. 3.1-22 rechts) wurde in Kapitel 3.1.3 bereits detailliert beschrieben.



Abb. 3.1-22: Anschluss von Außenwanddämmung an die Dämmung der Dachterrassen und Fensterdetail vor Fertigstellung

3.1.5 Außenwanddämmung im zweiten und dritten Bauabschnitt

Für den zweiten und dritten Bauabschnitt wurde die Unterkonstruktion für die Fassadendämmung verändert, um den Arbeitsaufwand bei der Montage zu reduzieren. Im ersten Bauabschnitt hatte sich gezeigt, dass die Montage der Fassadenteile deutlich mehr Zeit in Anspruch genommen hatte als ursprünglich geplant.

Im zweiten Bauabschnitt kamen nun hölzerne Konsolen zum Einsatz, die mit speziell geformten Metallschienen in einem Raster von ca. 68 cm an der Bestandswand befestigt wurden (System „Iambdaplus“). Um die Wärmebrückenwirkung der Konsolen zu minimieren wurden diese nach außen hin abgeschrägt. Abb. 3.1-23 zeigt die Konsolen und die Metallschienen nach der Befestigung an der Fassade. Ein vertikales Vlies an den Konsolen dient der Abgrenzung der verschiedenen Gefache, damit diese gezielt mit Zellulose ausgeflockt werden können. An der Vorderkante der Konsolen befindet sich ein Kantholz, an dem die folgenden Schichten befestigt sind. Auf diese äußeren Kanthölzer wurde in gleicher Weise wie im ersten Bauabschnitt eine Sparschalung aufgebracht und anschließend wurde die Konstruktion mit magnesitgebundenen Holzwolleplatten verkleidet.



Abb. 3.1-23: Abgeschrägte Konsolen tragen die Lasten der Fassade in die Bestandswand (links), Befestigung der Konsolen mit Metallschienen (rechts)

Auch im zweiten und dritten Bauabschnitt wurden um die Fenster herum Kästen angeordnet, die einerseits die Fenster von den Gefachen abtrennt, andererseits der Verbesserung des Brandschutzes dienen (Abb. 3.1-24).



Abb. 3.1-24: Verkleidung der Fenster mit OSB-Platten (links), zusätzlicher Dämmstreifen aus Mineralfaser zur Überdämmung der Fensterrahmens (rechts)

Bedingt durch die Anordnung von Kantholz, Konsole und OSB-Platte am Fenster entstand ein Spalt mit der Dicke der Konsole, der nicht mit Zellulose ausgeflockt werden konnte, da er zu schmal war (Abb. 3.1-25 links). An dieser Stelle musste die Fuge mit Ortschaum vor dem Verschließen der Gefache ausgefüllt werden (Abb. 3.1-25 rechts).



Abb. 3.1-25: Fuge zwischen OSB-Platte und Kantholz durch Konsole, die mit Ortschaum ausgefüllt werden musste

Im Bereich der Geschosdecken wurde im zweiten und dritten Bauabschnitt kein Kantholz mehr vorgesehen, sondern die Metallschienen mit den Konsolen wurden nur auf ca. 6 cm Höhe ausgespart (Abb. 3.1-26 links). Dort wurde eine Brandschutzplatte horizontal angeordnet, um die Gewichtslasten der Zellulosedämmung aufzunehmen. Unterseitig wurde sie auf der gesamten Länge mit Mineralfaserdämmung verkleidet und so auch der

verbleibende Zwischenraum zwischen Platte und sich anschließender Konsole ausgefüllt (Abb. 3.1-26 rechts).



Abb. 3.1-26: Ausführung der horizontalen Abschottung der Geschosse: links Trennung der durchlaufenden Schienen, rechts Brandschutzplatte mit Mineralfaserdämmung

Der untere Abschluss der Fassade wurde ebenfalls mit einer nur 1,5 cm dicken Brandschutzplatte hergestellt, die über die gesamte Tiefe der Fassade das unterste Gefach verschließt (Abb. 3.1-27 links).

Die Holzspanplatten konnten nicht immer lotrecht und fugenfrei montiert werden. Verbleibende Spalte in den Platten wurden vor dem Auftrag des Unterputzes mit Ortschaum ausgefüllt (Abb. 3.1-27 rechts).



Abb. 3.1-27: Unterer Abschluss der Fassade im zweiten Bauabschnitt (links), nachträglich mit Ortschaum gefüllte Fuge der Holzspanplatten (rechts)

Bei beiden Fassadenkonstruktionen wurden spezielle Gerüstanker vorgesehen, die es zukünftig erlauben, ein Gerüst am Gebäude zu befestigen, ohne die Fassade durchbohren zu müssen. Dazu wurden Metallwinkel hergestellt, die ein Gewinde aufweisen (Abb. 3.1-28 links). Diese Anker wurden auf Holzklötze gesetzt und an der Bestandswand befestigt. Die Holzklötze reduzierten die Wärmebrückenwirkung der Anker. In der Fassade wurde die Stelle, an der der Anker die Holzspanplatte durchstößt, ausgespart und später mit einer Kappe verschlossen (Abb. 3.1-28 rechts).



Abb. 3.1-28: Gerüstanker zur späteren Befestigung eines Gerüsts: links vor Montage, rechts in endgültiger Einbaulage

Aufgrund des geringeren Holzanteiles der Konstruktion ist der Aufbau im zweiten und dritten Bauabschnitt energetisch günstiger ausgeführt, so dass die Dämmstoffstärke bei gleichem U-Wert der Gesamtfassade von $0,13 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ um 2 cm reduziert werden konnte. Die Metallschienen konnten über die gesamte Fassade angezeichnet werden, was den Arbeitsaufwand bei der Vorbereitung der Montage etwas reduzierte.

Bei beiden Konstruktionen hat sich aber gezeigt, dass im Vorfeld eine genaue Planung für eine korrekte Montage erforderlich ist.

3.1.6 Dachgeschoss

Die Gebäude sollten im Zuge der Modernisierung um ein Staffelgeschoss ergänzt werden. Dafür wurden nach Abbruch der alten Dächer die Dämmung auf der obersten Geschossdecke und die zusätzliche Estrichlage entfernt und eine Bitumenschweißbahn als Abdichtung der darunter liegenden Geschosse gegen Regen in der Bauphase sowie als luftdichter Abschluss der Bestandsgeschosse aufgebracht (Abb. 3.1-29 links). Anschließend wurde ein neuer Treppenhauskopf aufgemauert (Abb. 3.1-29 rechts) und das Staffelgeschoss aus vorgefertigten Holzleichtbau-Elementen aufgesetzt.



Abb. 3.1-29: Abdichtung der Bestandsgeschosse nach Abtragen des alten Daches (links) und Aufmauern neues Treppenhaus im Dach (rechts)

Es kamen zwei Typen von Wandelementen zum Einsatz. An der Seite der Dachterrassen schlanke Elemente mit 18 cm Wandstärke, die nach der Montage zusätzlich mit einem 20 cm starken Wärmedämmverbundsystem aus Polystyrol gedämmt wurden (Abb. 3.1-30 links). An der Seite, an der die Dachelemente in Verlängerung der Dämmung der Bestandswände montiert wurden, wurden Elemente mit 40 cm Dämmung zwischen Doppel-T-Trägern aus Holz (TJI-Trägern) und außen liegender Holzwolles-Platte verwendet (Abb. 3.1-30 rechts).



Abb. 3.1-30: Wandelement an der Dachterrasse mit WDVS sowie Wandelement an der Fassade am Übergang zum Bestandsgeschoss

Die statisch tragenden Konstruktionselemente im Dach sind ebenfalls TJI-Träger (Abb. 3.1-31 links), die nach innen mit einer OSB-Platte verschlossen wurden (Abb. 3.1-31 rechts). Im ersten Bauabschnitt ist oben zwischen Dämmung und Unterkonstruktion für die Dachbegrünung eine 8 cm starke Hinterlüftung vorhanden, im zweiten und dritten Bauabschnitt liegt über der Zellulosedämmung noch eine 5 cm dicke Polystyrol-Dämmung auf.



Abb. 3.1-31: Blick in noch nicht geschlossenes Dachelement und Situation nach Verschließen der Felder

Im nächsten Schritt wurden die Wand- und Dachelemente mit vorbereiteten Folienstreifen abgedichtet. Die Abdichtung erfolgte entweder an die Bitumenschweißbahn auf der obersten Geschossdecke (Abb. 3.1-32 links) oder an die Ringanker aus Beton am neuen Treppenhaukopf (Abb. 3.1-32 rechts). Schwierigkeiten bereiteten dabei teilweise die Befestigungswinkel der Elemente (Abb. 3.1-32 links Mitte), bei deren Befestigung die Folie

wieder beschädigt werden konnte. Aus diesem Grund wurden anschließend die Befestigungswinkel nochmals mit einem Folienstreifen überklebt.



Abb. 3.1-32: Abdichtung der Bestandsgeschosse und neues Treppenhaus

Die Fenster wurden in den Wänden zur Dachterrasse außenbündig in die Wandelemente (Abb. 3.1-33 links) eingebaut so dass der Fensterrahmen anschließend mit dem WDVS teilweise überdämmt werden konnte. In den tieferen Wandelementen zur Außenwand wurden die Fenster etwa mittig montiert (Abb. 3.1-33 rechts) und mit einem Mineralfaserstreifen als Rahmenüberdämmung versehen. In beiden Einbauarten sitzen die Fenster auf einem Purenit-Streifen zur thermischen Entkopplung des Fensterbankanschlusses.



Abb. 3.1-33: Wandelement zur Terrasse vor Einbau der Fenster und Montage des WDVS (links), Fenster im eingebauten und abgeklebten Zustand auf Purenit-Streifen unten (rechts)

Die Dachterrassen bilden in einigen Bereichen den oberen Abschluss der thermischen Hülle der Bestandsgeschosse. Die Terrassendämmung wurde mit vorgefertigten Holzleichtbauelementen mit Gefälle und punktuellen Kanthölzern zum Lastabtrag auf die oberste Geschossdecke aufgelegt (Abb. 3.1-34 links). Zum Ausgleich von Unebenheiten ist zwischen Bestandsdecke und Terrassendämmung ein zusätzlicher, 3 cm dicker Streifen aus Mineralfaser vorhanden. Der durch die Dämmung entstehende Versatz zwischen Innenraum und Dachterrasse wurde durch eine Trittstufe vor den Terrassenfenstern ausgeglichen. Anschließend wurden alle Elemente mit Zellulose ausgeflockt (Abb. 3.1-34 rechts).



Abb. 3.1-34: Auf das Bestandsgeschoss wurde im Bereich der Dachterrasse ein Leichtbauelement zur Terrassendämmung aufgelegt (links), Ausflocken der Wandelemente mit Zellulose (rechts)

Abb. 3.1-35 links zeigt die Ansicht der fertigen Dachterrasse. Auf die obere Abdichtung der Terrassendämmung wurde das Gerüst der Pergola aufgestellt und anschließend mit Betonplatten verkleidet. Für die Mieter wurden noch große Kübel aufgestellt, um die Pergola beranken zu können. Die Dächer erhielten ein Substrat für eine extensive Begrünung (siehe auch Abb. 3.2-22 rechts).



Abb. 3.1-35: Ansicht der fertigen Dachterrassen (links), Nordseite des Dachgeschosses mit Bewegungsfuge (rechts)

Im rechten Bild von Abb. 3.1-35 ist die fertige Nordansicht des Dachgeschosses zu sehen, die sowohl die Metallschiene zur Überdeckung der horizontalen Bauteilfuge zwischen Bestandsgeschoss und Dachgeschoss als auch die vertikale Fuge an der Stirnseite der Wandelemente zeigt. Letztere zeichnete sich bei der thermografischen Untersuchung im Falschfarbenbild deutlich ab, da hier die Dämmung unterbrochen ist (siehe auch Abb. 4.2-8).

3.1.7 Dämmung im Keller

Das Anbringen einer für den Passivhaus-Standard ausreichend dicken Kellerdeckendämmung ist in vielen Gebäuden schwierig umzusetzen, da die Deckenhöhe nicht ausreicht. In den Gebäuden der Rotlintstraße war die Situation deutlich günstiger, da die Deckenhöhe bei 2,30 m lag. Da die Durchgänge durch die tragenden Kellerwände 2 m hoch waren, konnte der Gesamtaufbau für die Kellerdeckendämmung bis zu 30 cm dick gewählt werden. Da bereits in den Außenwänden und in den Dachgeschossen Zelluloseflocken eingesetzt wurden, sollte dieser Dämmstoff auch für die Kellerdeckendämmung verwendet werden. Dazu wurde unter der Kellerdecke ein Schienensystem montiert, das punktförmig in einem Raster von ca. 70 cm an der Decke befestigt ist (Abb. 3.1-36 links). Zusätzliche senkrechte Platten unterteilen den Hohlraum in einzelne Gefache, um ein gezieltes Ausblasen des Hohlraums zu ermöglichen (Abb. 3.1-36 rechts). An der Unterseite wird das Schienensystem mit Gipsfaserplatten zweilagig beplankt um die Brandschutzanforderungen in den Kellerräumen zu erfüllen. Effektiv ergab sich eine Dämmstoffdicke unter der Kellerdecke von mindestens 26 cm.



Abb. 3.1-36: Abhängung der Kellerdecke mit einem Schienensystem und punktuellen Befestigungen

Ein Großteil der horizontalen Verteilung für Heizwärme und Warmwasser sowie die Kaltwasserleitung wurden ebenfalls in der Kellerdeckendämmung verlegt (Abb. 3.1-37 links). Dadurch reduzieren sich die Wärmeverluste der Rohrleitungen, die innerhalb der Kellerdeckendämmung mit der Mindestdämmung gemäß Energieeinsparverordnung (EnEV) versehen sind, auf ca. die Hälfte des Wertes, der sich bei der in der vertikalen Verteilung umgesetzten Dämmung mit dem 2,5-Fachen der EnEV-Anforderungen ergeben würde. Um die Strangregulier- und Absperrventile jederzeit zugänglich zu halten, wurden diese durch eine Abstellung von der Kellerdeckendämmung ausgenommen. Dies erhöht zwar die Wärmeverluste, die Maßnahme wurde jedoch auf Wunsch des Bauherren so umgesetzt, damit im Leckagefall auch die Mieter einzelne Stränge einfach absperrern können (Abb. 3.1-37 rechts).



Abb. 3.1-37: Verlegung der horizontalen Wärmeverteilung innerhalb der Kellerdeckendämmung (links) und freie Zugänglichkeit der Absperrarmaturen (rechts)

Kellerfenster

Um eine kontrollierte Belüftung der Kellerräume zu gewährleisten, wurden alle Kellerfenster mit magnesitgebundenen Holzwoleplatten verschlossen und die Nische des Kellerfensters mit Mineralfaserdämmung aufgefüllt (Abb. 3.1-38). Die Belüftung der Kellerräume wird in Kapitel 3.2.3 genauer beschrieben.



Abb. 3.1-38: Die alten Kellerfenster werden verschlossen und gedämmt

Kellerabgang

Der Kellerabgang stellt ein kompliziertes geometrisches Gebilde dar, das teilweise an beheizte Bereiche grenzt und aus diesem Grund adäquat gedämmt werden musste. Die Oberseite des Kellerabgangs (entspricht der Unterseite der Treppe zum 1. Obergeschoss) wurde mit kaschierten Dämmplatten aus Polyurethan mit einer Wärmeleitfähigkeit von 0,025 W/(m²K) und einer Dicke von 8 cm gedämmt (Abb. 3.1-39 links). In gleicher Weise wurde die Unterseite der Treppe vom Eingangspodest zum Erdgeschoss gedämmt.

Die Seitenwände erhielten je 4 cm dicke PU-Dämmplatten (Abb. 3.1-39 rechts). Da die Decken und Wände nicht eben und nicht lotrecht waren, mussten die Fugen mit Ortschaum gefüllt werden (Abb. 3.1-39 links). Eine weitere Fläche im Keller, die an das Treppenhaus und somit an die thermische Hülle des Gebäudes grenzt, sind die Treppenhauswände im Keller zwischen Außenwand und Kellertreppe. Auch hier wurden kaschierte PU-Platten mit 4 cm Dicke montiert. Beim Baustellenkontrollen stellte sich aber heraus, dass die Platten zu

kurz waren und nicht den gesamten warmen Bereich des Treppenhauses überdeckten, so dass an dieser Stelle Platten ergänzt werden mussten (Abb. 3.1-40).



Abb. 3.1-39: Am Kellerabgang wurden die Decke (ist Unterseite der Treppe zum 1. OG) (links) und die Seitenwände (rechts) mit PU-Verbundplatten gedämmt



Abb. 3.1-40: Blick vom Keller hoch zur Kellertür: die seitliche Dämmung ist bis ca. 1m unterhalb der Geschossdecke der Wohnung rechts gezogen (links); Dämmung von Kellerwänden, die an das Treppenhaus grenzen (rechts)

Weitere Details im Keller

Auf eine Flankendämmung der Kelleraußen- und innenwände zur Verringerung der Wärmebrückenwirkung der in die Kellerdeckendämmung einbindenden Wände wurde in diesem Projekt verzichtet, da durch die 26 cm Kellerdeckendämmung bereits ein Teil der Flankendämmung quasi vorhanden ist und der angestrebte Heizwärmebedarf von 15 kWh/(m²a) zumindest bei zwei Bauabschnitten auch ohne die Flankendämmung unterschritten wurde. Dennoch wurden im Keller weitere Bereiche gedämmt. Dazu gehören im ersten Bauabschnitt die Türen im Keller zum Garten (in den folgenden Bauabschnitten sind keine Gartentüren mehr vorhanden), bei denen der Türsturz mit einer Trockenbaukonstruktion eine Dämmung von ca. 8 cm erhielt (Abb. 3.1-41).



Abb. 3.1-41: Herstellen eines Türsturzes im Trockenbau

Als verbleibende Wärmebrücke in der Kellerdeckendämmung, die nicht mit vertretbarem Aufwand weiter entschärft werden konnte, sind die Stürze von Durchgängen durch tragende Innenwände zu erwähnen, die bei einer lichten Höhe von 2 m lagen. Eine weitere Dämmung dieser Bereiche hätte die Durchgangshöhe zu stark reduziert, so dass darauf verzichtet werden musste. Die damit verbundenen Wärmebrücken wurden in der Energiebilanz entsprechend berücksichtigt.



Abb. 3.1-42: Durchgänge durch Kellerinnenwände, die die Kellerdeckendämmung durchstoßen

3.1.8 Perimeterdämmung

Da die Gebäude auf der Außenseite der Kellerwände keine Abdichtung gegen von außen eindringende Feuchte besaßen, wurden die Kellerwände freigegeben, eine Drainage verlegt (Abb. 3.1-43 oben links), die Außenwände mit einem Dichtanstrich versehen und mit 10 cm dicken Platten aus extrudiertem Polystyrol (XPS) gedämmt (Abb. 3.1-43 oben rechts). Diese Dämmung reichte bis knapp unterhalb der Oberkante des Erdreichs. Der Bereich zwischen dieser Kellerdämmung und der Außenwanddämmung wurde mit 30 cm dicken Polystyrol-Dämmplatten ausgefüllt (Abb. 3.1-43 unten). Diese wurden mit ihrer Oberkante an dem untersten Kantholz der Fassadendämmung angestoßen und ohne Verdübelung an der Vormauerung des Sockels angeklebt. Hier zeigte sich bei der thermografischen Untersuchung, dass diese Platten teilweise Fugen aufwiesen, die nicht ausgeschäumt

worden waren. Die energetischen Auswirkungen dieser Schwachstelle sind zwar begrenzt, können jedoch einfach mit Ortschaum beseitigt werden.



Abb. 3.1-43: Arbeitsschritte im Perimeterbereich: Verlegen der Drainage (oben links), Auftragen des Dichtanstrichs und Dämmung der Kelleraußenwand mit 10 cm Stärke (oben rechts), Montage der 30 cm dicken Dämmplatten außerhalb des Erdreichs (unten links, rechts)

3.1.9 Sonstige Maßnahmen

Im Folgenden werden eine Reihe weiterer Maßnahmen beschrieben, die ebenfalls zur energetischen Optimierung der Gebäude beitragen, primär aber nicht energetisch motiviert waren.

Balkone

An Stelle der alten, abgebrochenen Balkone erhielt jede Wohnung einen vergrößerten, überdachten Balkon. Die Balkone wurden als Stahlbaukonstruktion mit Betonfertigplatten auf eigenen Fundamenten und thermisch getrennt vor der Fassade aufgestellt (Abb. 3.1-44 links oben). Sie wurden mit vier speziellen Anker je Balkonanlage am Gebäude befestigt, die auf der Innenseite der Außenwände angebracht (Abb. 3.1-44 rechts oben) und durch die Außenwand hindurchgeschraubt wurden. Sie sollen Zug- und Druckkräfte aus den Balkonen aufnehmen. Zur Reduktion der Wärmebrückenwirkung der Anker wurden diese aus Edelstahl gefertigt.



Abb. 3.1-44: Montage der thermisch getrennten Balkone (oben links) und Ansichten der Halteanker: oben rechts von innen, unten links von außen während der Bauphase, unten rechts mit fertig montiertem Balkon

Schiebeläden

Alle Süd-, und die meisten West- und Ostfenster in den Bestandsgeschossen erhielten motorisch betriebene Schiebeläden, die den Mietern die Möglichkeit der Verschattung, der Verdunklung und einen Sichtschutz ermöglichen sollten. Durch den motorischen Antrieb ist es nicht erforderlich die Fenster zum Bedienen der Läden zu öffnen, so dass es keine, die luftdichte Ebene durchstoßenden, mechanischen Elemente gibt. Somit entstehen im Winter keine zusätzlichen Lüftungswärmeverluste durch das Bedienen der Schiebeläden.

Die Laufschiene der Läden werden mit Winkeln auf der Sparschalung der Fassade befestigt (Abb. 3.1-45 links oben). Durch die besondere Konstruktion der Fassade in der Rotlintstraße ist es möglich, solche Elemente wärmebrückenfrei an einer Passivhausfassade zu montieren. Der Antriebsmotor sitzt dabei innerhalb der Laufschiene (Abb. 3.1-45 links unten).



Abb. 3.1-45: Detailansichten der Schiebeläden: oben links Haltewinkel an der Sparschalung befestigt, die anderen Bilder zeigen Ansichten der Schiebeläden von außen und innen (mit Verdunkelungswirkung bei voller Sonneneinstrahlung)

In den Dachgeschossen sind für die Verschattung der Fenster und den Sichtschutz der Mieter Außenjalousien vorhanden.

3.2 Anlagentechnik

Die Gebäude der Rotlintstraße weisen bei der Anlagentechnik, neben den für Passivhäuser üblichen Lüftungsanlagen, einige Besonderheiten auf, die im Folgenden ebenfalls dokumentiert werden sollen.

3.2.1 Lüftungsanlagen der Wohnungen

Jede Wohnung erhielt eine individuell einstellbare, mechanische Lüftungsanlage mit Zu- und Abluft und Wärmerückgewinnung. Das Lüftungsgerät wurde im Badezimmer montiert, die Verteilung der Luft erfolgt in der abgehängten Decke im Flur. Zu Beginn der Modernisierungsarbeiten wurde die Trennwand zwischen Küche und Badezimmer entfernt (Abb. 3.2-1 links) und durch eine leicht versetzte Trockenbauwand ersetzt. Dadurch konnte einerseits eine Badewanne quer im Bad untergebracht werden, andererseits wurde der obere Bereich der Trennwand dafür verwendet die Frisch- und Fortluftleitungen zur Außenwand zu verlegen (Abb. 3.2-1 rechts).



Abb. 3.2-1: Abriss der Trennwand zwischen Bad und Küche, im Bild links wird gerade der Durchbruch für die Frisch- und Fortluftleitungen hergestellt; rechts: die Frisch- und Fortluftkanäle werden unter der Decke in einem abgekofferten Bereich verlegt, der anschließend mit Zelluloseflocken ausgeblasen wird

Für die Durchführung der Lüftungskanäle durch die Außenwand wurde ein metallisches Formteil verwendet, das für den Lastabtrag sorgt. Eine Schwierigkeit war, die Durchführung bei der Montage lückenlos abzudichten, da dieser Bereich danach nur noch schwer zugänglich ist (Abb. 3.2-2 links). Nachdem es im ersten Bauabschnitt Probleme mit der Dichtheit dieser Durchführung gab, wurden diese in den weiteren Bauabschnitt beidseitig von innen und außen abgedichtet.

Die Kanäle wurden mit einer dampfdiffusionsdichten Basisdämmung versehen. Da die beiden Kanäle zeitweise deutlich niedrigere Temperaturen aufweisen als die beiden angrenzenden Räume, wurde die gesamte Abkofferung zur Verbesserung der Isolierung mit Zellulose ausgeblasen. Dabei war es wichtig, eine Folie als Dampfbremse zwischen den beiden Lagen der Gipskarton-Platten zu verlegen, um die Wasserdampfdiffusion in diesem Bereich zu reduzieren (Abb. 3.2-2 rechts).



Abb. 3.2-2: Die Durchführung der Leitungen durch das metallische Formteil (links) und Abkofferung um die Frisch- und Fortluftleitungen mit vorbereitetem Folienstreifen als Dampfbremse

Das Lüftungsgerät mit Wärmerückgewinnung wurde jeweils in eine Nische im Badezimmer direkt unter der Decke montiert (Abb. 3.2-4). Von dort wird die Zuluft in den Bestandsgeschoss über das Wasser-Luft-Nachheizregister (Abb. 3.2-3 links), das im abgehängten Bereich im Badezimmer montiert ist, weiter zum Flur und dort innerhalb einer Deckenabhängung verlegt (Abb. 3.2-3 rechts). Die Zuleitung für jeden Raum erhielt einen separaten Schalldämpfer mit flacher Bauform, so dass noch eine Deckenhöhe von 2,25 m im Flur erhalten blieb. In den einzelnen Räumen wird der Zuluftkanal mit einer Kernbohrung durch die Zimmerwand geführt. Dort sind direkt Weitwurfdüsen aufgesetzt, so dass in den Wohnräumen (außer in den viel größeren Dachgeschossen) im Regelfall keine weiteren Kanäle oder Abkofferungen erforderlich waren.

In den Bestandsgeschossen liegen die beiden Ablufträume Bad und Küche direkt nebeneinander, so dass hier mit kurzen flexiblen Leitungen die beiden Räume an das Lüftungsgerät angeschlossen werden konnten.



Abb. 3.2-3: Wasser-Luft-Heizregister der Zuluft im abgehängten Bereich im Bad (links), Verlegung der Lüftungsleitungen im Flur mit flachen Schalldämpfern (rechts)

Das Lüftungsgerät besitzt einen Kondenswasserablauf über den im Winter die auskondensierte Abluftfeuchte in den Kanal abgeleitet wird (Abb. 3.2-4 links). Dabei wurde in jeden Ablauf ein Siphon-Bogen eingebaut, um zu verhindern, dass ein Luftaustausch zwischen Abfluss und Lüftungsgerät auftritt. Nicht bewährt hat sich die im Bild gezeigte flexible

Verlegung mit einem Schlauch, da diese von den Mietern zum Aufhängen von Gegenständen oder Kleiderbügeln genutzt wurde und der Schlauch dadurch vom Gerät abrutschen konnte. Ab dem zweiten Bauabschnitt wurde stattdessen ein starres Rohr verwendet.

Außen wurde auf die Frisch- und Fortluftleitung ein Stutzen aufgesetzt, der die Lüftungsöffnungen nach oben abdeckt und die Luftströme ein wenig führt, um eine Vermischung von Frisch- und Fortluft zu begrenzen (Abb. 3.2-4 rechts).



Abb. 3.2-4: Lüftungsgerät in einer Nische im Badezimmer (links) - der Kondenswasserablauf (Pfeil) wurde später als Rohr ausgeführt; Nordansicht eines der Gebäude mit den Aufsätzen für Luftansaugung und Fortluft (rechts)

In Abb. 3.2-5 links ist ein Abluftventil zu sehen, das in der Küche eingesetzt wird. Es besitzt einen metallischen (Fett-)Filter, der von den Mietern leicht ausgebaut und in der Spülmaschine gereinigt werden kann. Das rechte Bild in Abb. 3.2-5 zeigt ein Zuluftventil, wie es in den Wohn- und Schlafräumen eingesetzt wird. Dieses Weitwurfventil unter der Decke sorgt für einen weiteren Transport der Zuluft in den Raum hinein, so dass dieser ständig mit frischer Luft versorgt wird. Die Oberseite der Türzarge ist beidseitig ausgespart (Pfeile), so dass Luft der Wohnräume in den Flur und dann in die Ablufträume strömen kann. Dadurch sind keine Gitter in der Wohnungstür oder vergrößerte Spalte unter der Tür erforderlich, die den Schallschutz innerhalb der Wohnung verschlechtern hätten.



Abb. 3.2-5: Abluftventil in der Küche mit einem metallischen Fettfilter (links), Zuluftventil in einem Wohnraum mit Überströmöffnungen (Pfeile) über der Tür (rechts)

Die Einstellung der Lüftungsstufe erfolgt mit einem zentralen 4-stufigen Schalter im Flur oder im Wohnzimmer (Abb. 3.2-6). Stufe 1 sorgt für einen ca. 0,2-fachen Grundluftwechsel, der bei längerer Abwesenheit und im Sommer eingestellt werden sollte (die Mieter können die Lüftungsgeräte nicht komplett abschalten). Stufe 2 entspricht der Normallüftung mit ca. 0,35-fachem Luftwechsel, mit den Stufen 3 und 4 kann der Luftwechsel bis auf 0,5-fach erhöht werden.

Mit einem thermostatischer Einstellregler kann die gewünschte Raumtemperatur eingestellt werden. Liegt die Solltemperatur über der Isttemperatur, wird das Nachheizregister thermoelektrisch freigegeben und die Luft erwärmt. Neben dem Heizregister für die Zuluftnacherwärmung besitzt jede Wohnung einen Heizkörper im Badezimmer (Abb. 3.2-4 links, unter dem Lüftungsgerät), in den großen Dachgeschosswohnungen sind ggf. weitere Heizkörper vorhanden, die aber teilweise sehr klein gewählt werden konnten (Abb. 3.2-15).



Abb. 3.2-6: 4-Stufen-Schalter zur Einstellung des Luftaustauschs in der Wohnung (links), Temperatureinstellung über einen thermostatischen Regler (rechts)

Die Lüftungsanlagen werden zweimal im Jahr von einer Fachfirma regelmäßig gewartet. Dabei werden Geräte und Ventile gereinigt, die Filter gewechselt und die Umstellung von Sommer- auf Winterbetrieb vorgenommen.

3.2.2 Treppenhauslüftung

In den Gebäuden in der Rotlintstraße werden auch die Treppenhäuser mechanisch belüftet, da sie innerhalb der thermischen Hülle liegen und verstärktes Lüften im Treppenhaus sich auch auf den Heizwärmebedarf des Gebäudes auswirken kann. Um dies zu vermeiden, wurde ein Lüftungsgerät mit Zu- und Abluft und Wärmerückgewinnung, das normalerweise zur dezentralen Belüftung eines einzelnen Raumes eingesetzt wird auf dem ersten Treppenabsatz montiert (Abb. 3.2-7 links). Frisch- und Fortluft wird als kurze, gerade Kanäle durch Außenwand und Außendämmung geführt. Die Zuluft wird direkt am Gerät in das Treppenhaus eingeblasen. Die Abluft wird am oberen Ende des Treppenhauses abgesaugt, über einen Flachkanal aus Kunststoff innerhalb der Außendämmung zum Lüftungsgerät geführt (Abb. 3.2-7 rechts) und dann in dieses eingeleitet. In die Außenwand wurde ein gedämmtes Formteil eingelassen, in das das Lüftungsgerät später eingesetzt werden konnte (Abb. 3.2-7 links bzw. Abb. 3.2-8 rechts).



Abb. 3.2-7: Formteil für das Lüftungsgerät, das in die Außenwand eingelassen wurde (links), das rechte Bild zeigt den Abluftkanal, der auf der Bestandsfassade vom Dachgeschoss zum ersten Treppenpodest geführt wird

Die Lüftungsgeräte werden so betrieben, dass ca. 20 m³/h gefördert werden, was in etwa einem 0,1-fachen Luftwechsel entspricht. In Abb. 3.2-8 rechts ist eine Innenthermografieaufnahme des Lüftungsgerätes im Betrieb dargestellt. Man erkennt gut die Abluftzuführung, die mit ca. 20 °C in das Lüftungsgerät eingeleitet wird. Während der Aufnahme lag die Außentemperatur bei ca. -2 °C. Die Zuluft wird mit ca. 14 °C - 15 °C in das Treppenhaus eingeblasen. Der Luftstrahl ist nicht in das Treppenhaus, sondern an der Außenwand nach oben gerichtet, so dass auch keine Zugscheinungen auftreten.



Abb. 3.2-8: Einbausituation der Treppenhauslüftung vor dem abschließenden Beiputzen um die Öffnungen (links), Überlagerung von Foto und Innenthermografie beim Lüftungsgerät im Treppenhaus

3.2.3 Kellerlüftung

Besonders in Mietshäusern stellt die Kellerlüftung oft ein Problem dar. Wird von den Mietern nicht oder zur falschen Zeit (z. B. im Sommer bei großer Hitze) gelüftet, besteht die Gefahr, dass die deutlich kühleren Keller feucht werden. Aus diesem Grund wurden die Kellerfenster in der Rotlintstraße verschlossen (siehe Abb. 3.1-38) und stattdessen eine mechanische Lüftung vorgesehen. Dazu wurde Rohre durch die Kellerwand geführt und beidseitig mit Gittern verschlossen (Abb. 3.2-9 links). Neben diesen Zuluftelementen gibt es innerhalb der Keller Überströmöffnungen, damit ein gerichteter Luftstrom von den Zuluftelementen durch

alle Keller bis zum Abluftraum entsteht, in dem ein Abluftventilator die „verbrauchte“ Kellerluft nach draußen transportiert (Abb. 3.2-9 rechts).



Abb. 3.2-9: Zuluftelement für die Kellerlüftung (links) und Lüftungsgerät mit Regelung über die Differenz der absoluten Feuchte innen-außen (rechts)

Die Regelung erfolgt über die Differenz der absoluten Feuchten innen und außen. Sowohl auf der Kellerseite als auch auf der Außenwand ist dazu ein Temperatur-/Feuchtefühler vorhanden. Die Regelung berechnet die Differenz der absoluten Feuchten und schaltet den Ventilator ein, wenn dadurch Feuchte nach draußen abgeführt werden kann.

3.2.4 Wärmeverteilung

Heizung und Warmwasser

Bei der Verlegung der Verteilleitungen für Heizung und Warmwasser wurden die Verteilverluste mit mehreren Maßnahmen minimiert. Dazu wurden alle warmen Verteilleitungen mit dem 2,5-Fachen der Anforderungen der EnEV isoliert. Abb. 3.2-10 links zeigt, wie die Rohre für die Heizungsverteilung in zwei Lagen mit Mineralfaserdämmung versehen werden. Abb. 3.2-10 rechts zeigt, dass dadurch die Leitungen der vertikalen Verteilung sehr dick werden können. Die vertikale Verteilung wurde teilweise an Stelle der ehemaligen Kamine durch die Gebäude verlegt. Ein Teil des zusätzlichen Platzbedarfs konnte kompensiert werden, indem für die Zirkulationsleitungen der Warmwasserversorgung ein Rohr-In-Rohr-System verwendet wurde. Bei diesem wird die Zirkulationsleitung innerhalb der Warmwasserleitung in einem dünnen Kunststoffrohr verlegt. Einerseits werden hierdurch die Verteilverluste der Zirkulation drastisch reduziert, andererseits ist keine zusätzliche Leitung im Schacht erforderlich.



Abb. 3.2-10: Zweilagige Dämmung der Verteilungen

Die horizontale Verteilung wurde innerhalb der Kellerdeckendämmung verlegt. Hier erhielt die Leitung eine Dämmung nach den Mindestanforderungen der EnEV (Abb. 3.1-37 links), zusätzlich reduzieren dann die Zelluloseflocken der Kellerdeckendämmung die Wärmeverluste dieser Leitungen auf ca. ein Viertel des Wertes, der bei einer Dämmung nach den Anforderungen der EnEV erreicht worden wäre. Im zweiten Bauabschnitt konnten aus statischen Gründen nicht alle horizontalen Verteilleitungen in der Kellerdecke untergebracht werden, da hier noch zusätzlich die Nahwärmeverteilung verlegt werden musste. Dann wurden die Leitungen teilweise an den Wänden mit 2,5-facher Dämmstärke verlegt.

Wo möglich, wurden Armaturen mit Formstücken gedämmt, wie dies in Abb. 3.2-11 links zu sehen ist; allerdings standen diese nicht immer zur Verfügung. Weiterhin ergaben sich Schwierigkeiten bei der Abstimmung zwischen verschiedenen Firmen, wenn z. B. Messeinrichtungen nachträglich montiert wurden und dadurch Messstrecken nicht mehr gedämmt wurden (Abb. 3.2-11 rechts). Hier bestehen noch Optimierungsmöglichkeiten bei der Reduktion der Verteilverluste (siehe auch Kapitel 4.2.4).



Abb. 3.2-11: Formstücke zur Dämmung von Armaturen (links) standen nicht immer zur Verfügung (z. B. rechts beim nachträglichen Einbau der Wärmemengenzähler)

Alle Durchbrüche durch die Kellerdecke mussten sowohl wegen Brandschutzanforderungen als auch zur Erzielung einer guten Luftdichtheit der Gebäudehülle verschlossen werden (Abb. 3.2-12 links). Dazu wurde teilweise Gips, teilweise ein Brandschutzschaum verwendet, der nicht nur als Brandschott dient, sondern gleichzeitig die Durchbrüche auch luftdicht verschließt. Bei den Rohrleitungen hat sich diese Vorgehensweise auch durchweg bewährt,

bei Elektrodurchführungen musste teilweise nachgearbeitet werden, da der Schaum nicht in die Zwischenräume zwischen den Kabeln gelangte.

Am oberen Abschluss jedes Steigstranges wurden absperrbare automatische Entlüfter angeordnet, um Luft aus dem System entfernen zu können, damit diese sich nicht in den Nachheizregistern im Dachgeschoss ansammeln kann, was zu einer reduzierten Heizleistung führen könnte (Abb. 3.2-12 rechts).



Abb. 3.2-12: Verschuss von Durchführungen zum Keller mit Brandschutzschaum bzw. Gips (links), zusätzliche Entlüftung der Steigstränge (rechts)

Warmwasser-Zirkulation

Die Warmwasserzirkulation wurde in den vertikalen Strängen innerhalb der Warmwasserleitung als 12 mm Kunststoffrohr in einem Rohr-in-Rohr-System verlegt. Dafür wurde das Warmwasserrohr eine Dimension größer gewählt. Am oberen Ende der Warmwassersteigleitung wurde ein spezielles Passstück (Abb. 3.2-13 links) gesetzt, welches das warme Wasser in die Zirkulationsleitung umlenkt. Von dort wird die Zirkulation bis zum unteren Ende des vertikalen Stranges im Warmwasserrohr geführt und dann wieder von diesem getrennt (Abb. 3.2-13 rechts). Durch dieses Rohr-in-Rohr-System können die Wärmeverluste der vertikalen Zirkulationsleitungen nahezu eliminiert werden. Allerdings ist auf einen korrekten Abgleich der Stränge zu achten.



Abb. 3.2-13: Oberer und unterer Abschluss der vertikalen Zirkulationsleitung

Nahwärme

Die drei Blöcke werden über eine Nahwärmeleitung aus dem Heizhaus mit Wärme für die Beheizung der Wohnungen und die Nacherwärmung des Warmwassers versorgt. Diese

Nahwärmeleitungen verlaufen im Keller des zweiten Bauabschnitts sowie im Erdreich zu den Semizentralen der beiden anderen Blöcke. Im Keller wurden die Leitungen, wie auch die übrige Verteilung, mit dem 2,5-Fachen der Dicke gedämmt, die die EnEV vorschreibt. Für die erdverlegten Leitungen wurden Duorohre verwendet, bei denen Vor- und Rücklauf in einem gemeinsamen Mantelrohr eingeschäumt sind (Abb. 3.2-15 links). Da die Dämmdicke dieses Mantels aber nicht dick genug war, um die Verluste ausreichend stark zu reduzieren, wurden die Duo-Leitungen zusätzlich in zwei Lagen mit je 7 cm verrottungsfesten Polyethylen-Dämmmatten gedämmt. Abb. 3.2-14 rechts zeigt die Durchführung der Nahwärmeleitung in den Keller des dritten Bauabschnitts und die zusätzliche Dämmung.



Abb. 3.2-14: Duo-Nahwärmeleitung (links), verlegte Nahwärmeleitungen mit zusätzlicher Dämmung (rechts)

Heizkörper

Neben den Zuluft-Heizregistern steht jeder Wohnung im Badezimmer ein zusätzlicher Heizkörper zur Verfügung, der nicht nur das Badzimmer zusätzlich temperieren, sondern indirekt in begrenztem Umfang auch zusätzlich zur Beheizung der Wohnung dienen kann (Abb. 3.2-15 links). In den Dachgeschosswohnungen war eine ausschließliche Beheizung über die Zuluft nicht gewährleistet, so dass dort in ungünstig gelegenen Räumen zusätzliche Heizkörper montiert wurden. Wie in Abb. 3.2-15 rechts zu sehen, sind die Heizkörper aber sehr klein.



Abb. 3.2-15: Kleiner Handtuchheizkörper im Bad (links), Kleiner Zusatzheizkörper im Dachgeschoss (rechts)

3.2.5 Heizzentrale

Rapsöl-BHKW

Kernstück der Wärmeversorgung der Gebäude bildet das Rapsöl-Blockheizkraftwerk (BHKW), das in einem separaten Heizhaus neben dem Keller des Hauses 122 in einer Beton-Fertigteilkonstruktion errichtet wurde. Das Heizhaus ist thermisch und schalltechnisch vom Gebäude entkoppelt und besitzt eine Dämmung zur Reduktion der Wärmeverluste (Abb. 3.2-18 rechts). Im Heizhaus sind das BHKW (Abb. 3.2-16), die Gastherme (Abb. 3.2-17 links hinten), der Pufferspeicher (Abb. 3.2-19 links) sowie die zentrale Regelung der gesamten Anlagentechnik untergebracht.

Das BHKW besitzt eine maximale elektrische Leistung von 11 kW und eine maximale thermische Leistung von 22 kW. Es steht mit Dämpfern auf einem Betonsockel (Abb. 3.2-17 rechts), der seinerseits mit Elastomeren auf dem Boden des Heizhauses aufliegt. Diese Konstruktion wurde gewählt, um eine Übertragung von Körperschall weitestgehend auszuschließen.

Die Luftansaugung erfolgt aus dem Heizhaus, das zwei mit Schalldämpfern versehene Lüftungsöffnungen an der Gartenseite des Gebäudes besitzt. Die Rapsöl-Tankanlage befindet sich in einem der Kellerräume des benachbarten Hauses (Abb. 3.2-18 links). Von dort wird das Öl in das Heizhaus gepumpt und vor der Verbrennung im BHKW mit Motorwasser vorgewärmt.



Abb. 3.2-16: Rapsöl-BHKW im Heizhaus und Blick in das Innere des BHKW



Abb. 3.2-17: Abgasstrang des BHKW, vor der Dämmung des Rohres und Erdgas-Therme (links), Dämpfer zur Reduktion von Schallübertragungen (rechts)

Die Erdgas-Brennwerttherme übernimmt die Spitzenlastversorgung der Anlage. Sie besitzt eine Leistung von 100 kW und wurde auf die volle Nennleistung ausgelegt, damit die Wärmeversorgung auch bei Stillstand des BHKW gesichert ist. Für BHKW und Therme sind an der Außenwand zwei separate Abgasrohre an der Fassade befestigt.

BHKW und Therme speisen gemeinsam in den 2000 Liter großen Pufferspeicher (Abb. 3.2-19 links) ein, aus dem das Heizungswasser für das Nahwärmenetz entnommen wird.



Abb. 3.2-18: Rapsöllagerung im Keller (links), Heizhaus (Pfeil) mit Abgasanlage (rechts)



Abb. 3.2-19: Pufferspeicher im Heizhaus mit 2000 Liter (links), Gastherme (rechts)

Alle eingesetzten Umwälzpumpen sind besonders stromsparende, geregelte Hocheffizienzpumpen (Abb. 3.2-20 links). Angesteuert werden sie von der zentralen Anlagenregelung, die im Heizhaus und in allen Semizentralen die relevanten Temperaturen erfasst und sowohl die Pumpen als auch BHKW und Spitzenlast-Therme bei Bedarf einschaltet (Abb. 3.2-20 rechts). In dieser Regelung sind auch Zeitprogramme für den Heizbetrieb und Informationen für die Nacherwärmung der Warmwasserspeicher hinterlegt.



Abb. 3.2-20: Effiziente Umwälzpumpe und Anlagendarstellung der Regelung

3.2.6 Semizentralen und thermische Solaranlagen

Jeder der drei Bauabschnitte besitzt im Keller eine eigene Semizentrale, in der einerseits die Nahwärme zu den Strängen der Heizungsverteilung weitergeleitet wird, andererseits das Brauchwarmwasser erwärmt wird. Zur Warmwasserbereitung dienen je 32 m² große thermische Solaranlagen, die auf den Dächern der Gebäude angeordnet sind (Abb. 3.2-21). Die Kollektorfelder sind je nach Platzangebot entweder in einer oder in zwei Reihen mit exakter Südausrichtung aufgestellt. Die Solarleitungen sind mit einer verstärkten Dämmung ausgestattet (Abb. 3.2-22) und werden durch das begrünte Flachdach durch das Gebäude bis zur Semizentrale im Keller geführt.



Abb. 3.2-21: Thermische Sonnenkollektoren auf den Dächern des ersten (links in einer Reihe) und zweiten Bauabschnitts (rechts in zwei Reihen)



Abb. 3.2-22: Dämmung der Solarleitungen und Durchführung durch das Flachdach

In jeder der Semizentrale befinden sich zwei Solarspeicher mit je 800 Liter Volumen, die in Reihe oder parallel geschaltet werden können, um den Solarertrag je nach Einstrahlung zu optimieren (Abb. 3.2-23 links). Die Solarwärme wird mit einer Frischwasserstation an einen 300 Liter-Speicher übergeben, der als hydraulische Weiche eingesetzt wird und mit Trinkwasser gefüllt ist. Von dort gelangt das Warmwasser in einen 500 Liter Bereitschaftsspeicher (Abb. 3.2-23 rechts), an den die Warmwasserverteilung des Blocks und die Zirkulationsleitung angeschlossen sind. Die Nacherwärmung des Warmwassers erfolgt, wenn die Energie in den Solarspeichern nicht ausreicht, über einen Wärmetauscher im Bereitschaftsspeicher mit Nahwärme.



Abb. 3.2-23: Zwei Solarspeicher mit je 800 Litern Volumen (links), Brauchwasserspeicher (550 Liter + 300 Liter) neben den Solarspeichern (rechts)

Wasserbehandlung (Diaphragmalyse)

Um die Wärmeverluste der Warmwasserbereitung zu reduzieren und gleichzeitig den möglichen Solarertrag zu maximieren, wird die Temperatur der Warmwasserbereitung in den Semizentralen nur auf 48 °C bis 50 °C eingestellt. Da dadurch eine thermische Desinfektion des warmen Trinkwassers nicht mehr gewährleistet ist, wird eine chemische Desinfektion (Diaphragmalyse) eingesetzt. Dieser Prozess erzeugt aus einer wässrigen Lösung von Salzttabletten hypochlorige Säure und dosiert diese in das Trinkwasser ein.



Abb. 3.2-24: Details der Wasserbehandlungsanlage: links Dosieranlage, rechts Solebehälter

Die Abb. 3.2-24 zeigt im linken Bild die Dosierpumpe der Wasserbehandlung, rechts ist das Vorratsbecken mit der Salzlösung zu sehen. Die Regelung der Anlage und eine Gesamtansicht sind in Abb. 3.2-25 abgebildet.

Um die Wasserbehandlung betreiben zu können, wurde die Wasserversorgung des gesamten Projekts dahingehend geändert, dass es nur noch einen Hausanschluss für Trinkwasser gibt. An diesen ist die Diaphragmalyse angeschlossen, d. h. das gesamte Trinkwasser – auch das kalte Wasser – wrd über die Anlage keimfrei gehalten. Danach wird das Wasser auf die drei Semizentralen verteilt. Die einwandfreie chemische und biologische Qualität des Trinkwassers wird in den Gebäuden zweimal im Jahr vom Gesundheitsamt überprüft.



Abb. 3.2-25: Regelung der Diaphragmalyse und Blick auf die Gesamtanlage

3.2.7 Weitere Aspekte der Modernisierung

In diesem Kapitel werden Maßnahmen der Modernisierung dargestellt, die nicht primär energetisch motiviert sind, bei denen aber energetische Aspekte berücksichtigt werden mussten.

Aufzüge

Die Gebäude im zweiten und dritten Bauabschnitt besitzen fünf bzw. sechs Geschosse. Aus diesem Grund sollten Sie an Stelle eines alten Lastenaufzuges, der auch ursprünglich in den Gebäuden vorhanden war, einen kleinen Personenaufzug erhalten. Um den kleinsten verfügbaren Aufzug in den Gebäuden einbauen zu können, wurde der alte Aufzugsschacht abgebrochen (Abb. 3.2-26 links) und leicht vergrößert. Anschließend wurde vom Keller aus ein neuer Aufzugsschacht aus Kalk-Sandstein aufgemauert, dann wurde der Aufzugsschacht bis zum Dachgeschoss gemauert und oben auf den Schacht eine Überfahrt aufbetoniert (Abb. 3.2-27 links).



Abb. 3.2-26: Abbruch des alten Aufzugs (links) und voll ausgedämmter Sockel des neuen Schachtes (rechts)

Der Aufzugsschacht ist Bestandteil der thermischen und luftdichtenden Hülle des Gebäudes, so dass hier der Ausführung besondere Aufmerksamkeit geschenkt werden musste. Im Bereich der Unterfahrt mussten die Kellerinnenwände gedämmt werden, da die thermische Hülle die Kellerdecke hier nach unten durchstößt. Unterhalb der notwendigen Unterfahrt wurde der Bereich vollständig mit Perliteschüttung gedämmt (Abb. 3.2-26 rechts, unter der Betonplatte). Außerdem war eine luftdichte Ausführung erforderlich (siehe auch Kapitel 4.1). Die Überfahrt durchstößt die Dachebene nach oben und wurde mit zwei Lagen PU-Platten gedämmt (Abb. 3.2-27 rechts), wobei auch hier die luftdichte Ausführung wichtig war.

Der Aufzugsschacht besitzt keine dauerhaft unverschlossenen Öffnungen zum Rauchabzug, sondern eine Lift-Smoke-Anlage, die kontinuierlich Luft aus dem Aufzugsschacht entnimmt und auf Rauch überwacht (Abb. 3.2-28 links). Im Brandfall wird die Dunkelklappe im Schachtkopf automatisch geöffnet, so dass Rauch und Wärme nach oben abgeführt werden können.

Ein weiterer wichtiger Aspekt bei der Planung des Aufzugs war die Verringerung des Standby-Verbrauchs. Hierzu wurde unter anderem eine Beleuchtung aus stromsparenden LED-Leuchten eingesetzt (Abb. 3.2-28 rechts).



Abb. 3.2-27: Aufzugsschacht mit der aufbetonierten Überfahrt (links), Dämmung der Überfahrt mit PU-Dämmplatten (vor Montage der Dunkelklappe) (rechts)



Abb. 3.2-28: Zur Rauchüberwachung im Aufzugsschacht (Lift-Smoke-Control) wird kontinuierlich Luft aus dem Schacht angesaugt und überwacht (links), rechts energiesparende Beleuchtung im Aufzug

Bäder

Im ersten Bauabschnitt wurden vorgefertigte Bäder eingesetzt, bei denen die komplette Wasser- und Abwasser-Installation im Werk vorgefertigt wurde (Abb. 3.2-29 links). Vor Ort wurden die Elemente dann aufgestellt und mit einer optisch ansprechenden Platte verkleidet, ohne dass dort weitere Fliesenarbeiten notwendig geworden wären (Abb. 3.2-29 rechts). Im zweiten und dritten Bauabschnitt wurden die Installationen vor Ort ausgeführt.

Jede Wohnung besitzt im Badezimmer einen Stellplatz für die Waschmaschine unter dem Trockenschrank (siehe Abb. 3.2-30 links). Dort ist neben dem Kaltwasser- auch ein Warmwasseranschluss vorhanden, um den Stromverbrauch der Waschmaschine reduzieren zu können (Abb. 3.2-30 links).



Abb. 3.2-29: Vorgefertigtes Installationselement und fertiges Badezimmer

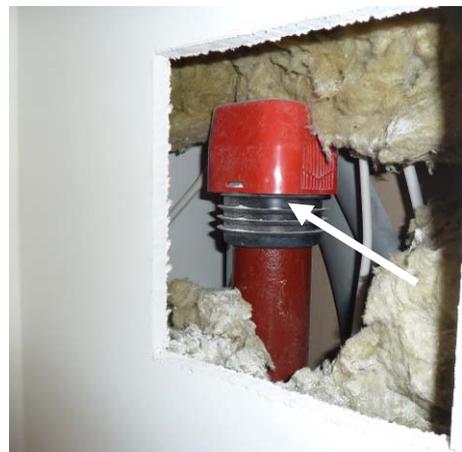


Abb. 3.2-30: Warmwasseranschluss (Pfeil) im Badezimmer (links) und Fallrohrentlüftung innerhalb der thermischen Hülle (rechts)

Fallrohrentlüftung

Fallrohre von Sanitärinstallationen werden üblicherweise über Dach entlüftet, um Druckschwankungen im Abwassernetz auszugleichen. Dies führt jedoch zu Wärmeverlusten, da sich ein kontinuierlicher Luftstrom in den Fallrohren vom Kanal durch das Gebäude zur Entlüftung einstellen kann. Aus diesem Grund werden in Passivhäusern automatische Entlüfter-Ventile eingesetzt, die nur im Bedarfsfall öffnen. Um auch deren Verluste zu minimieren, wurden in der Rotlintstraße die Entlüfter nicht über Dach sondern am oberen Ende der Steigstränge innerhalb der luftdichten Ebene angeordnet. Somit können sich keine zusätzlichen Wärmeverluste über die Entlüfter ergeben (Abb. 3.2-30 rechts).

Energieeinsparung in den Wohnungen

Die einzelnen Wohnungen wurden bereits im Rahmen der Modernisierung mit einer Reihe von Strom sparenden Einbauten ausgestattet, um es den Mietern zu erleichtern, auch weniger Haushaltsstrom zu verbrauchen. So wurde im Flur je eine, in der abgehängten Decke eingelassene Leuchtstofflampe eingebaut (Abb. 3.2-31 links). Im Bad ist sowohl eine Gesamtbeleuchtung mit einer großen Leuchtstofflampe vorhanden als auch eine energie-sparende Beleuchtung des Waschbeckenbereiches über dem Badezimmerspiegel (Abb. 3.2-31 rechts).



Abb. 3.2-31: Strom sparende Lichttechnik in den Wohnungen: Flurbeleuchtung (links), Badezimmerbeleuchtung (rechts)

Im Wohnzimmer jeder Wohnung befindet sich neben der Tür ein Schalter, mit dem die Steckdosen im Bereich der Fernseh-/Multimediaanschlüsse zentral abgeschaltet werden können. Dies ermöglicht den Mietern bequem den Standby-Verbrauch der Unterhaltungselektronik auf Null zu senken (Abb. 3.2-32 links). Weiterhin besitzt jede Wohnung einen extra für das Projekt entwickelten Trockenschrank im Badezimmer, der an die Abluft angeschlossen ist. Die Wäsche kann von der direkt darunter angeordneten Waschmaschine in den Trockenschrank gehängt werden, wo sie von der Badezimmerabluft durchströmt wird und trocknet ohne zusätzlichen Stromverbrauch und ohne Wäschespinnen, die in der Wohnung aufgestellt werden müssen (Abb. 3.2-32 rechts).



Abb. 3.2-32: Zentraler Standby-Abschalter im Wohnzimmer und Trockenschrank im Bad

4 Baubegleitende Qualitätssicherung

Bei der Umsetzung von energetischen Modernisierungsvorhaben ist es wichtig, besonders wenn die hohen Qualitätsanforderungen von Passivhäusern erfüllt werden sollen, dass regelmäßige Qualitätssicherungen durchgeführt werden. Dabei muss der Zeitpunkt so gewählt werden, dass die Gebäudehülle soweit fertig gestellt ist, dass sie sich schon nahe dem energetischen Endzustand befindet, gleichzeitig Schwachstellen noch nachgebessert werden können. Umgekehrt gibt es bei den beiden üblichen Qualitätssicherungsverfahren - Messung der Luftdichtheit mit dem Blower-Door-Verfahren und Gebäudethermografie - die Schwierigkeit, dass sie nicht jederzeit durchführbar sind. Für einen Drucktest muss die Luft dichtende Hülle geschlossen sein, die Verkleidung von Folien und Anschlüssen sollte noch nicht vorhanden sein. Die Gebäudethermografie erfordert eine minimale Temperaturdifferenz zwischen innen und außen und kann somit fast nur im Winterhalbjahr durchgeführt werden, gleichzeitig muss das Gebäude bereits beheizt sein.

Diese sich teilweise widersprechenden Anforderungen konnten auch in der Rotlintstraße nicht immer erfüllt werden. Da das Gesamtvorhaben aber auf drei nacheinander umgesetzte Bauabschnitte verteilt war, wurden die Gebäude im ersten Bauabschnitt als Basis für die Verbesserungen in den folgenden Bauabschnitten verwendet.

4.1 Messung der Luftdichtheit

Das Luftdichtheitskonzept für die Gebäude sieht vor, dass in der Fläche der Innenputz die Luft dichtende Ebene bildet. Die Fenster sind vor die Außenwand montiert und auf die alte Bestandslaibung bzw. den Glatzstrich abgedichtet. Hier springt die Dichtebene, so dass die Innenlaibung sauber gearbeitet werden muss. Nach unten bildet die Betondecke zum Keller den luftdichten Abschluss, das Neubaudachgeschoss wird mit Folien auf der Innenseite abgedichtet, der Übergang zum Bestandsgeschoss wird auf der Oberseite der obersten Geschossdecke hergestellt, die eine Bitumenschweißbahn besitzt. Der Verlauf der luftdichten Ebene ist in Abb. 4.1-1 in rot eingezeichnet.

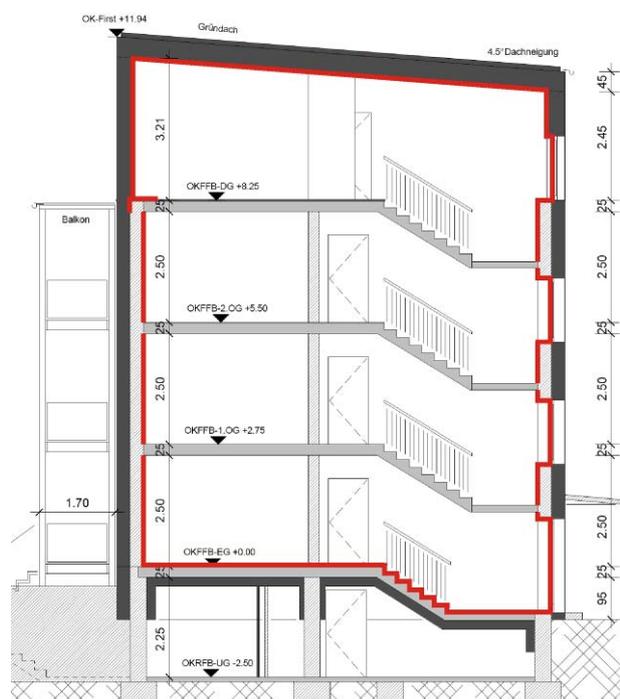


Abb. 4.1-1: Prinzipieller Verlauf der luftdichten Ebene

In den 7 Häusern des Bauprojekts wurden während und nach der Modernisierung insgesamt 10 Messungen zur Überprüfung der Luftdichtheit in Anlehnung an DIN EN 13829 Verfahren A durchgeführt.

Das erste Gebäude im ersten Bauabschnitt (Rotlintstraße 116) wurde nicht nur zur Herrichtung einer Musterwohnung und zum Testen einer Musterfassade verwendet, es

wurde auch als erstes in seiner luftdichten Hülle weitgehend fertig gestellt, so dass die dort gefundenen Schwachstellen bei den weiteren Gebäuden vermieden werden konnten. Im zweiten Bauabschnitt wurden beide Gebäude zweimal auf ihre Luftdichtheit untersucht, da ab diesen Gebäuden der zusätzliche Fahrstuhlschacht mit seinen Durchdringungen der luftdichten Ebene und den Elektro- und Sicherheitseinrichtungen neue Details enthielt, die zusätzlich überprüft werden mussten.

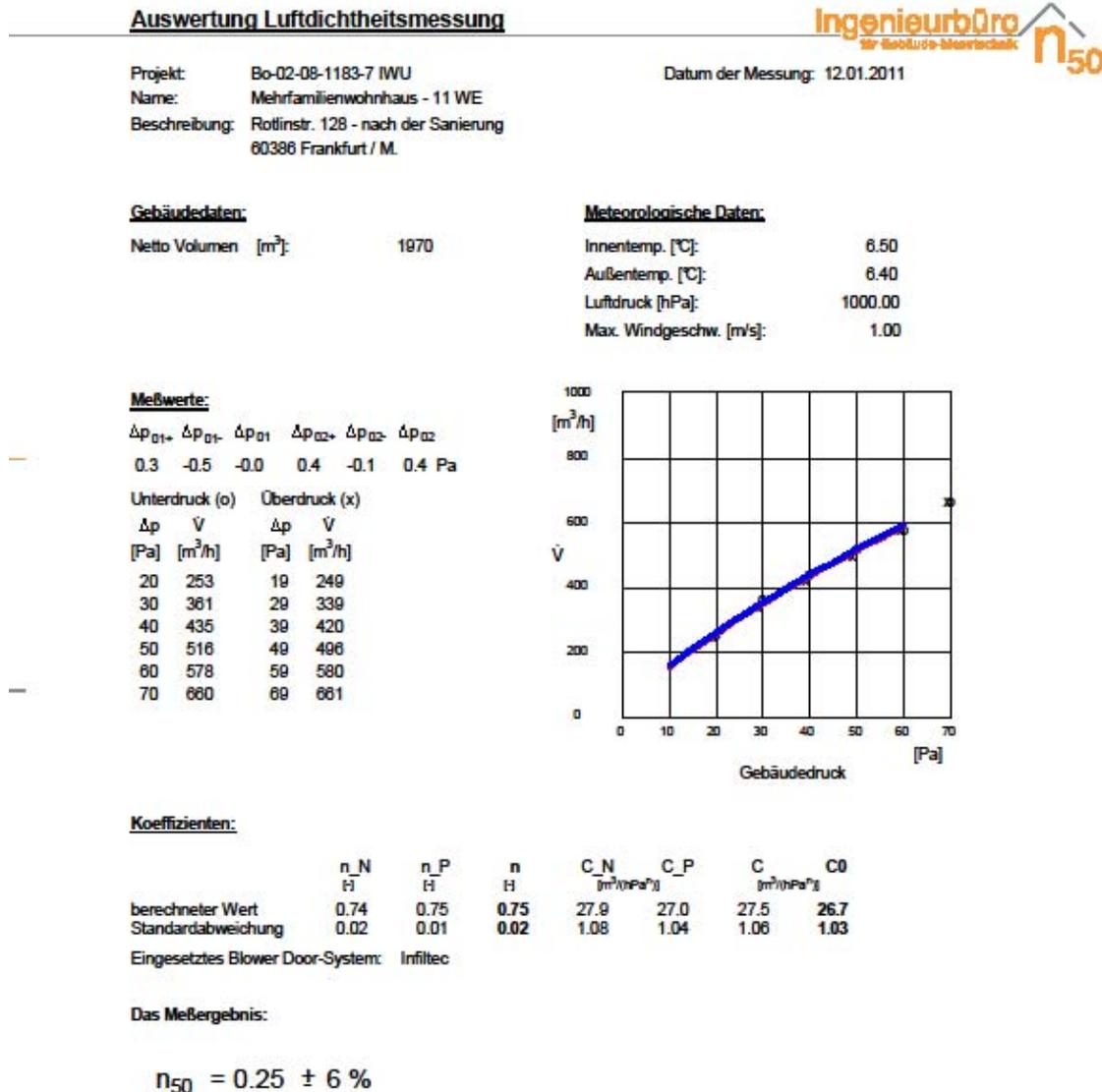


Abb. 4.1-2: Exemplarische Darstellung des Messprotokolls für Haus 128

Die Messungen wurden vom Ingenieurbüro für Gebäudemessstechnik n50 in Kassel im Auftrag des IWU jeweils je Treppenhaus durchgeführt. Soweit erforderlich, wurden alle Siphons mit Wasser gefüllt, die Lüftungsleitungen wurden im ersten Bauabschnitt im Lüftungsgerät abgeklebt, beim zweiten und dritten Bauabschnitt waren die Frisch- und die Fortluft noch bauseits zum Schutz der Rohre vor Verschmutzungen verschlossen.

Abb. 4.1-2 zeigt exemplarisch das Messprotokoll von Haus 128.

Tabelle 4.1-1 zeigt alle Ergebnisse der einzelnen Messungen. Insgesamt ergibt sich für die sanierten Gebäude ein sehr niedriger n_{50} -Wert von im Mittel 0,29 1/h. Vor der Modernisierung erreichten die Gebäude einen n_{50} -Wert von 3,2 1/h. Somit kann das Luftdichtigkeitskonzept und dessen Umsetzung als gelungen bezeichnet werden.

Tabelle 4.1-1: Ergebnisse der Luftdichtheitsmessungen mit dem Blower-Door-Verfahren (Zwischenmessungen sind dunkel hinterlegt)

Gebäude	Volumen	n_{50} -Wert (Verfahren A)	Anmerkungen
Rotlintstraße 116 (Zwischenmessung 30.06.09)	1285 m ³	0,28 1/h +/- 8%	Haustür und Kellertür fehlten, Blower-Door in Haustür eingebaut, Kellertür abgeklebt
Rotlintstraße 116 (29.09.09)	1292 m ³	0,27 1/h +/- 7%	Kellertür fehlte, Blower-Door (BD) in Kellerabgang eingebaut
Rotlintstraße 118 (29.09.2009)	1236 m ³	0,26 1/h +/- 6%	Kellertür fehlte, BD in Kellerabgang eingebaut
Rotlintstraße 120 (29.09.2009)	1241 m ³	0,23 1/h +/- 6%	Kellertür fehlte, BD in Kellerabgang eingebaut, Dachausstieg abgeklebt
Rotlintstraße 122 (Zwischenmessung 18.03.2010)	1458 m ³	0,47 1/h +/- 5 %	Kellertür, Briefkastenanlage und Dachausstieg abgeklebt, BD in alte Haustür eingebaut
Rotlintstraße 124 (Zwischenmessung 18.03.2010)	1481 m ³	0,45 1/h +/- 5 %	Kellertür u. Briefkastenanl. abgeklebt, Dachausstieg gesichert, BD in alte Haustür eingebaut
Rotlintstraße 122 (01.06.2010)	1451 m ³	0,37 1/h +/- 6 %	Kellertür abgeklebt, BD in Haustür eingebaut
Rotlintstraße 124 (01.06.2010)	1486 m ³	0,30 1/h +/- 6 %	Kellertür abgeklebt, BD in Haustür eingebaut
Rotlintstraße 126 (12.01.2011)	1987 m ³	0,32 1/h +/- 7 %	BD in Kellertür eingebaut
Rotlintstraße 128 (12.01.2011)	1970 m ³	0,25 1/h +/- 6 %	BD in Kellertür eingebaut
Mittelwert aller Schlussmessungen	1523 m³	0,29 1/h	

Trotz der sehr guten Messergebnisse wurden bei den Untersuchungen Schwachstellen gefunden. Nennenswerte Leckagen wurden beseitigt, kleinere Leckagen, z. B. in den Ecken der Fensteranschlüsse aber nicht mehr behoben. Im Folgenden werden einige dieser Leckagen dokumentiert.



Die senkrechten Pfosten der Fenster mit einem Flügel und Festverglasung wiesen teilweise Undichtigkeiten auf. Im zweiten und dritten Bauabschnitt trat dieses Schwachstelle nicht mehr auf.



Immer wieder fielen die unteren Ecken von Fenstern mit leichten Undichtigkeiten auf, obwohl sie von außen umlaufend mit Butyldichtungsband und zusätzlichem Kleber abgedichtet waren. Ursache könnten tiefere Risse im Mauerwerk sein, die an nachträglich abgemauerten Stellen oder an Stellen, an denen die alten Balkone abgeschnitten wurden, über den Bereich der Fensterabdichtung hinaus reichten.



Bei einzelnen Fenstern war ein Nachstellen der Beschläge erforderlich.



Auch im Dachgeschoss waren in den Ecken der Fenster teilweise Undichtigkeiten festzustellen.

Abb. 4.1-3: Schwachstellen im 1. Bauabschnitt im Bereich der Fenster



Im Dachgeschoss wurden im Bereich der Ecken bzw. am Übergang der Befestigungen der vorgefertigten Wandelemente am Boden Undichtigkeiten festgestellt. In der Konsequenz wurden die Befestigungswinkel zusätzlich abgeklebt.



Durchführung der Elektrokabel für Außenbeleuchtung und Schiebeläden in den Bestandsgeschoss war teilweise nicht durchgehend abgedichtet. So kam es zu Undichtigkeiten an Schaltern oder Kabelauslässen.



Abdichtung zwischen Aufsatz Dachausstiegs-
klappe und Dachkonstruktion fehlte (wurde
nachgearbeitet)



Dichtung der Dachausstiegsklappe fehlte (wurde
nachgearbeitet)

Abb. 4.1-4: Schwachstellen im 1. Bauabschnitt im Bereich der Wände und Dächer

Der zweite und der dritte Bauabschnitt verfügen über ein bzw. zwei zusätzliche Geschosse und je einen Aufzugsschacht, der die Kellerdecke als die luftdichte Ebene nach unten durchstößt und somit auch höhere Anforderungen zur Erreichung der Luftdichtheit erfüllen muss. In Abb. 4.1-5, Abb. 4.1-6 und Abb. 4.1-7 sind Details aus dem zweiten Bauabschnitt zu sehen.



Undichtheiten im Anschlussbereich des Fußbodens an die vorgefertigte Wand im Dachgeschoss

Abb. 4.1-5: Schwachstellen im 2. Bauabschnitt im Dachgeschoss



Es gelang nicht in allen Fällen zu diesem Zeitpunkt im Bauablauf die Durchführungen der Elektroleitungen im Dachgeschoss abzudichten



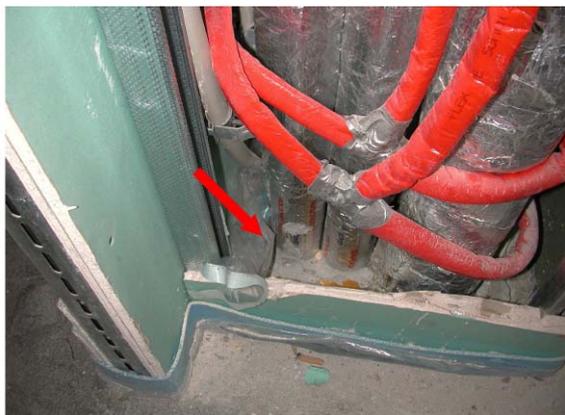
Das Treppenhausfenster zwischen Bestands- und Dachgeschoss war ursprünglich nur außen abgedichtet, wurde aufgrund von Luftströmungen in der Bauteilfuge nochmals zusätzlich von Innen nachgedichtet.

Abb. 4.1-6: Schwachstellen im 2. Bauabschnitt am Mauerwerk



Der Aufzugsschacht wurde ab dem Keller neu gemauert. In den Mauerwerksfugen sowie an einzelnen Bohrungen, die für Befestigungen in der Bauphase erforderlich waren, zeigten sich teilweise starke Luftströmungen. Die Bohrungen wurden verschlossen, das Mauerwerk mit einer dünnen Spachtelung überzogen. Ein flächiges Verputzen war aufgrund der geringen Toleranzen des Aufzugs im Schacht nicht möglich.

Die Abb. 4.1-8 und Abb. 4.1-9 zeigen weitere Schwachstellen des dritten Bauabschnitts.



Leckage im Bereich der Durchführung der Elektrokabel durch die Kellerdecke



In einigen Wohnungen waren leichte Undichtheiten im Bereich der Durchführung der Lüftungsleitungen durch die Außenwand vorhanden.

Abb. 4.1-7: Schwachstellen im 2. Bauabschnitt an Durchführungen der Anlagentechnik



Kabeldurchdringungen im Sockelbereich



Durchführung Elektrokabel des Fahrstuhls (wurde nach Fertigstellung der Lift-Smoke-Control-Anlage verschlossen)

Abb. 4.1-8: Schwachstellen im 3. Bauabschnitt an Durchführungen von Elektrokabeln



Leckagen am Fensterrahmen an sichtbaren Befestigungsbohrungen



Undichtheiten im Gehrungsbereich der Glasleisten

Abb. 4.1-9: Schwachstellen im 3. Bauabschnitt an Fenstern

Fazit

Grundsätzlich zeigen die Ergebnisse der Blower-Door-Messungen auch ohne Berücksichtigung der Nacharbeiten, dass das Luftdichtigkeitskonzept auf der Baustelle gut umgesetzt werden konnte. Dennoch waren die Messungen sinnvoll, da einzelne größere Leckagen erst dadurch erkannt und die Luftdichtigkeit der Gebäudehülle durch die begleitenden Messungen weiter verbessert wurde. So wurde zum Beispiel der Volumenstrom in Haus 120 durch das Abdichten der Dachausstiegsklappe um ca. 100 m³/h reduziert, was etwa 20 % ursprünglich gemessenen Wertes ausmachte. Die Abklebung des Übergangs der vorgefertigten Wandelemente im Dach an die oberste Geschossdecke wurde im Laufe des Modernisierungsvorhabens geändert, so dass generell die Befestigungswinkel nachträglich flächig überklebt wurden. Der neu aufgemauerte Aufzugsschacht war in der Unterfahrt nicht verputzt, wurde aber, nachdem sich deutliche Undichtigkeiten in den Fugen zeigten, mit einer dünnen Spachtelung überzogen.

4.2 Thermografische Untersuchung der Gebäude

Die Gebäude wurden sowohl am 04.02.2010 als auch am 28.01.2011 thermografisch überprüft. Beim ersten Termin wurde von der Firma Protherm im Auftrag des IWU der erste Bauabschnitt untersucht, beim zweiten Termin wurden vom IWU der zweite Bauabschnitt, die Nacharbeiten am ersten Bauabschnitt sowie Untersuchungen von innen und an der Anlagentechnik vorgenommen. Tabelle 4.2-1 zeigt die Randbedingungen an beiden Terminen.

Tabelle 4.2-1: Randbedingungen der thermografischen Untersuchungen

	04.02.2010	28.01.2011
Messzeitraum	6:00 – 7:30	6:15 – 7:45 (außen) 7:45 – 9:00 (innen)
Außentemperatur	1 – 2 °C	-2 °C
Bewölkung	bedeckt, trocken	bedeckt, trocken, ab 7:30 aufklarend
Wind	schwach	schwach bis mittel
Emissionsfaktor ε für opake Flächen	0,95	0,94
Messgerät	Infratec Variocam	testo 882
Spektralbereich	7,5 – 14 μm	8 – 14 μm
Temperaturauflösung bei 30 °C	0,08 K	0,06 K

Zu beiden Terminen war auch der Vortag ein strahlungsarmer Tag mit vergleichbaren Außentemperaturen und ohne nennenswerte solare Einstrahlung. Da die Außentemperatur am zweiten Termin niedriger lag als am ersten, sind die Skalen der Aufnahmen von beiden Messtagen unterschiedlich.

2. Bauabschnitt

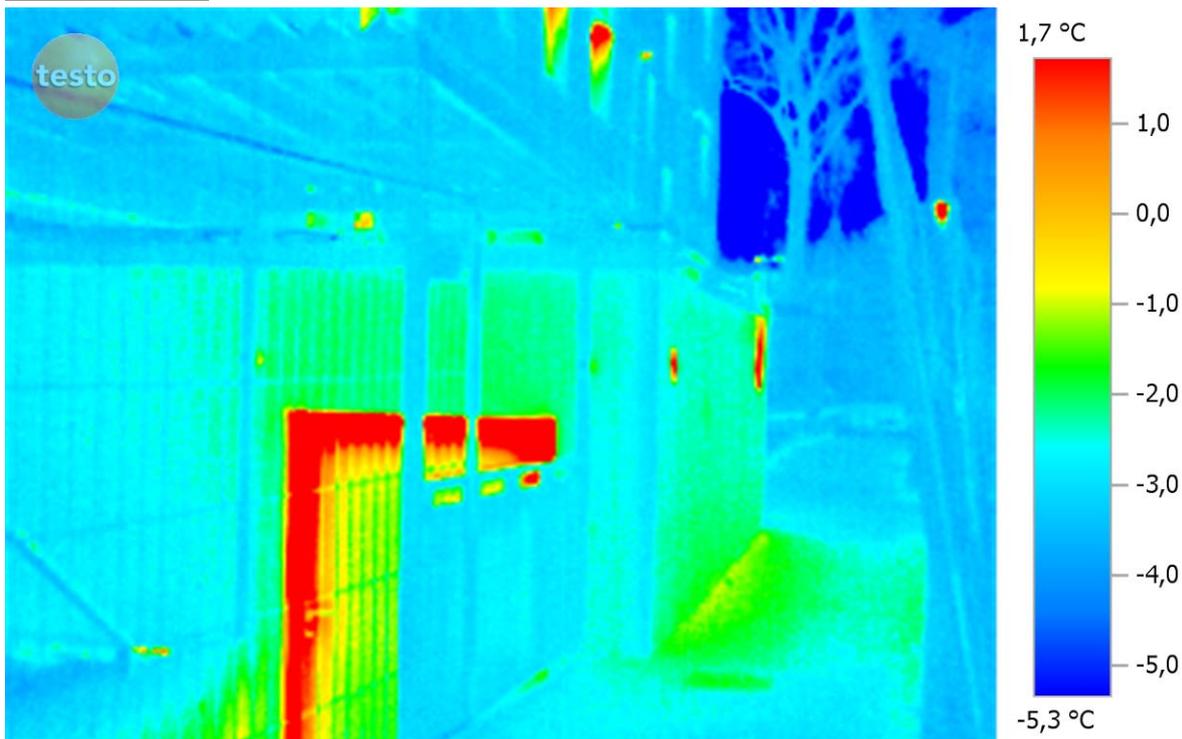


Abb. 4.2-15: Eingang zum Heizhaus an der Ostseite des 2. Bauabschnitts

Das Heizhaus besitzt eine höhere Oberflächentemperatur als die Gebäude, da die Raumtemperatur mit 35 °C deutlich höher liegt und die Wärmedämmung deutlich dünner ausgeführt ist. Bedeutende energetische Schwachstellen sind die Eingangstür sowie die Luftansaugung (seitlich).

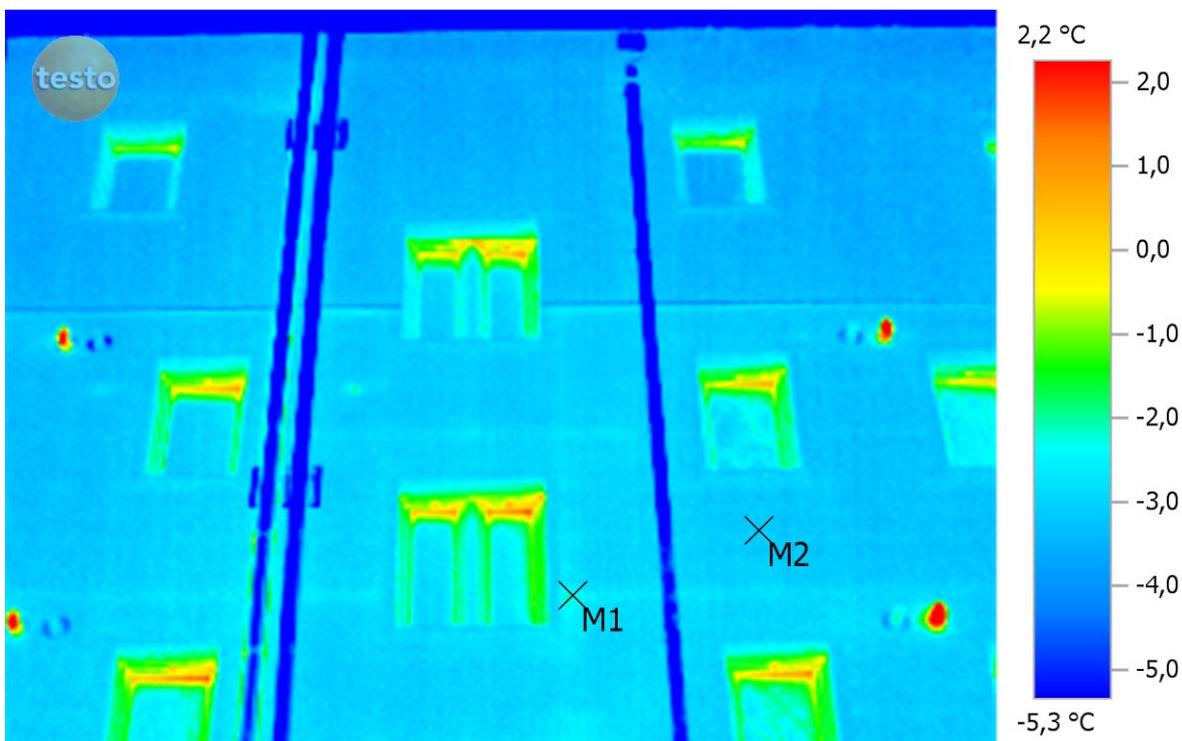


Abb. 4.2-16: Haus 122 Ostseite, Treppenhausfenster

Außer der Unterkonstruktion der Fassade sind hier keine gravierenden Schwachstellen zu erkennen. Während M2 eine Oberflächentemperatur von $-3,1\text{ °C}$ aufweist, liegt diese bei M1 bei $-2,2\text{ °C}$.

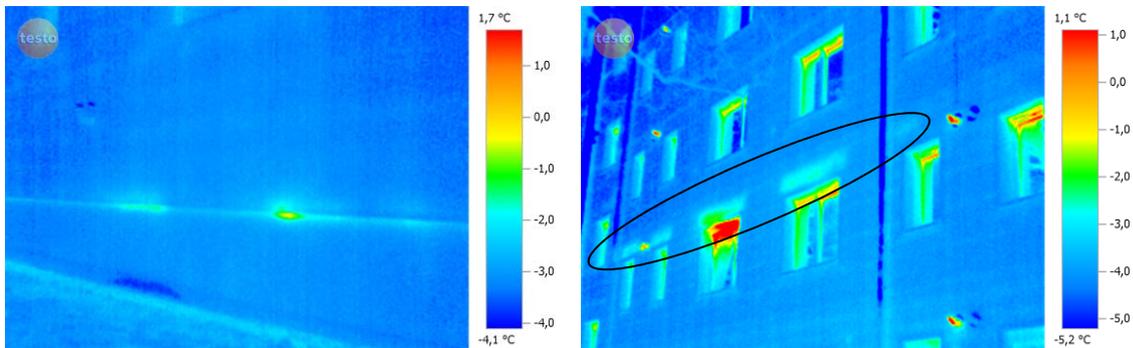


Abb. 4.2-17: Haus 122 Ostseite, Fassade an Perimeterdämmung sowie rechts des Treppenhauses ab 1. OG

Im linken Bild ist an zwei Stellen im Bereich des Übergangs zwischen Fassadendämmung und Perimeter eine unzureichende Abdichtung festzustellen. Die Temperatur ist hier örtlich um $1,8\text{ K}$ erhöht. Die Abbildung rechts zeigt, dass im 1. OG – vergleichbar wie im ersten Bauabschnitt – Bereiche über dem Fenster nicht korrekt mit Zellulose gefüllt wurden. Diese mussten nachgearbeitet werden.

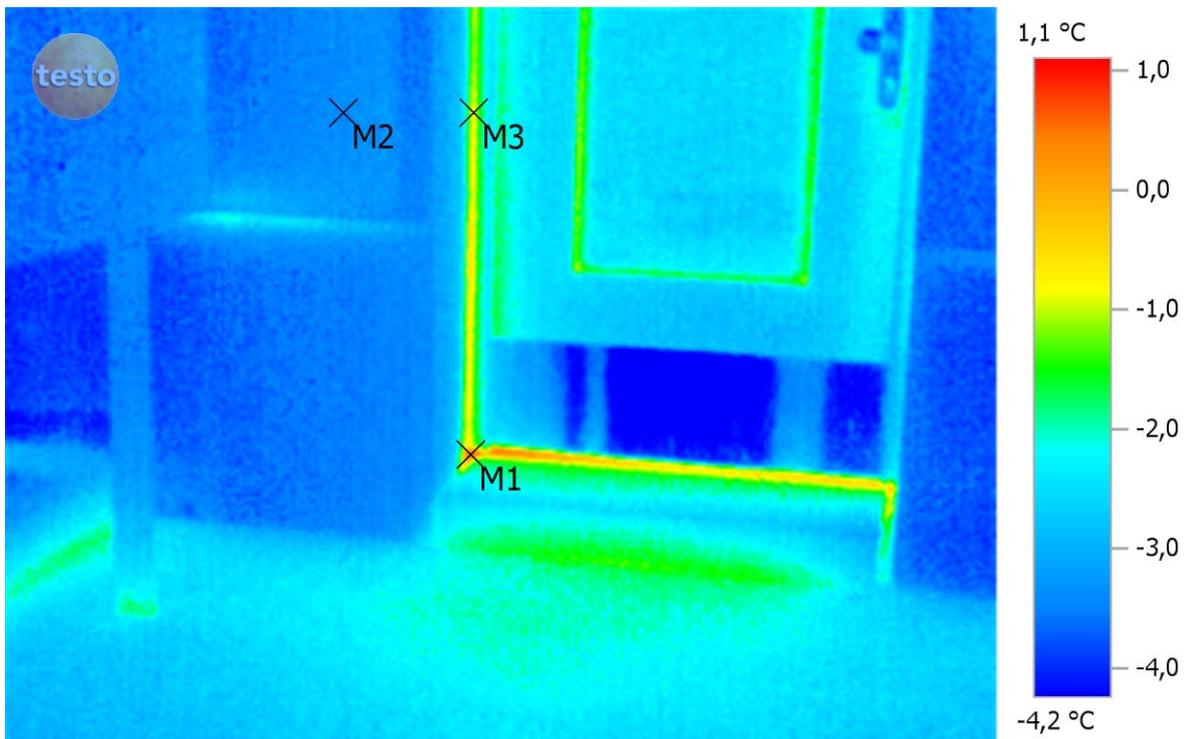


Abb. 4.2-18: Haus 124 Ostseite, Haustür

Während die Wand eine Temperatur von $-3,3\text{ °C}$ aufweist (M2), liegt die Temperatur in der Einbaufuge der Haustür mit $-0,8\text{ °C}$ (M3) bzw. $0,5\text{ °C}$ (M1) deutlich höher. Die Wärmebrückenberechnung an M3 ergibt für vergleichbare Randbedingungen eine Temperaturdifferenz von $1,6\text{ K}$ zur Außenwand. Wird weiter berücksichtigt, dass beide Flächen unterschiedlich stark gegen den Himmel abstrahlen, so liegen die gemessenen Temperaturen in der Kante im tolerierbaren Bereich.

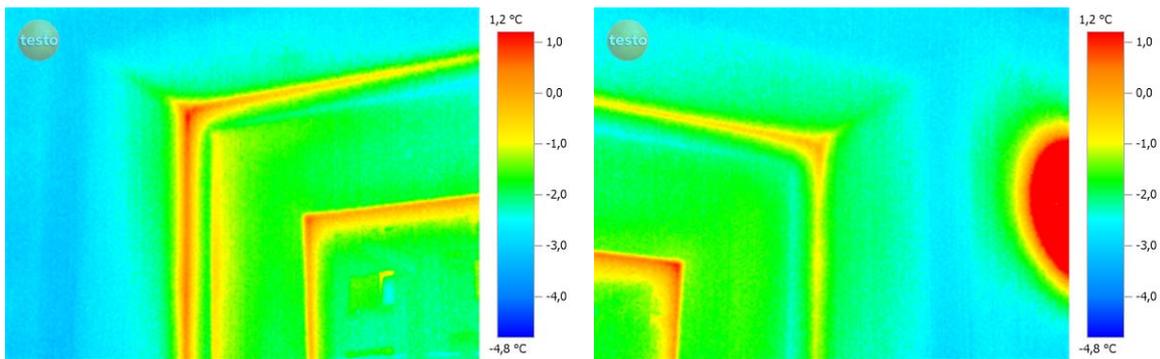


Abb. 4.2-19: Haus 124 Ostseite, Haustür, linke und rechte obere Ecke

Diese Aufnahmen der linken und rechten oberen Ecke der Haustür 124 zeigen, dass die rechte Seite etwas besser ausgeführt wurde, links liegen die Temperaturen etwas höher.

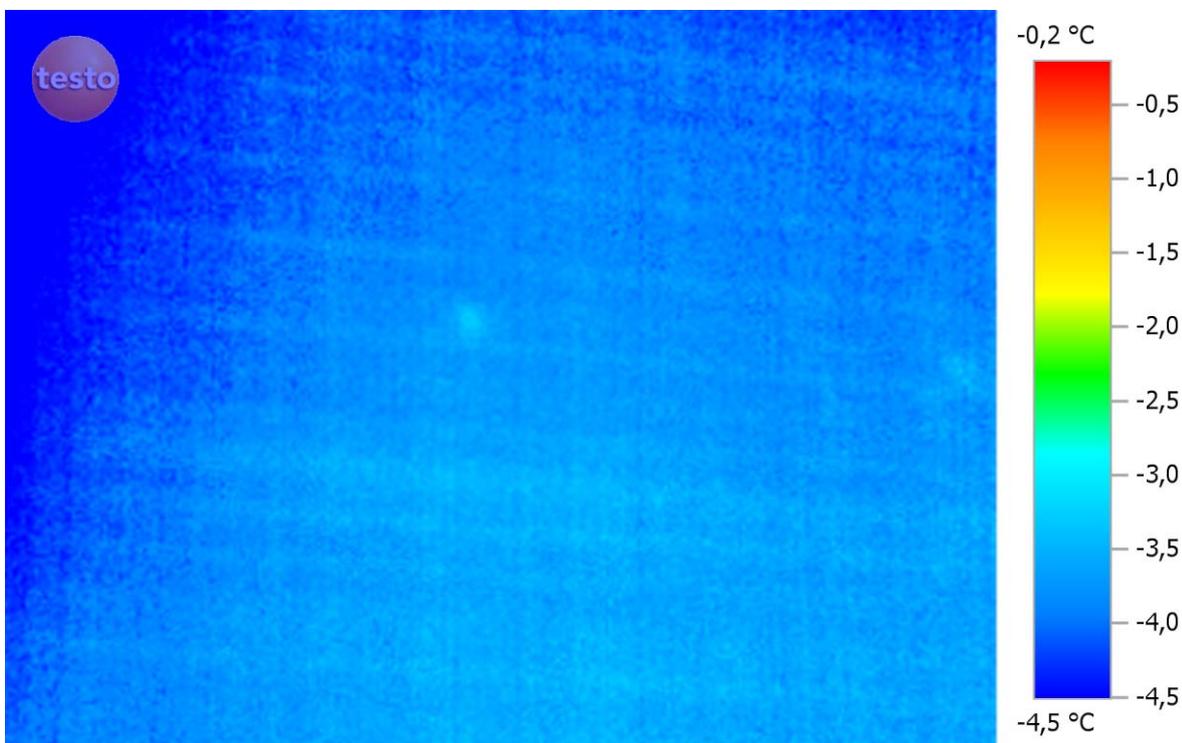


Abb. 4.2-20: Haus 124 Nordseite, östliche Haushälfte

Diese Aufnahme lässt außer zwei Gerüstankern keine Schwachstellen erkennen.

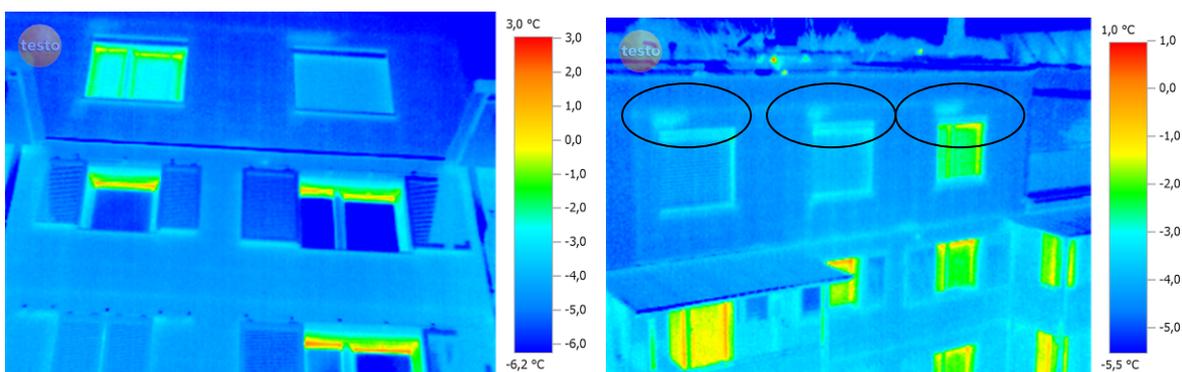


Abb. 4.2-21: Haus 124 Westseite, 2. OG bis DG zwischen den Balkonanlagen sowie DG

Im Bereich der Bestandgeschosse sind keine nennenswerten Schwachstellen zu erkennen. Auf der Dachgeschoss-Westseite von 124 (rechtes Bild) ist bei drei Fenstern eine erhöhte Temperatur im nördlichen Teil des Gefaches über den Fenstern zu erkennen. Hier erreichten die Zelluloseflocken möglicherweise nicht alle Bereiche des Gefachs. Auch hier musste nachgearbeitet werden.

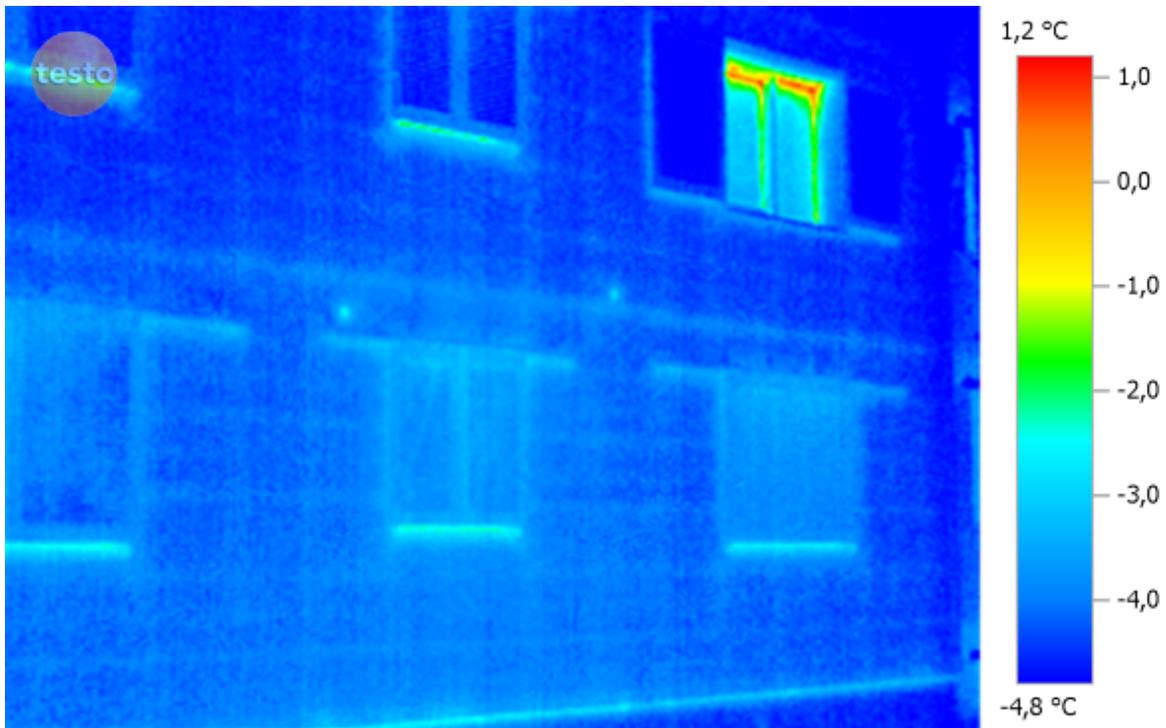


Abb. 4.2-22: Haus 122 Westseite, Richtung Süden: EG und 1. OG

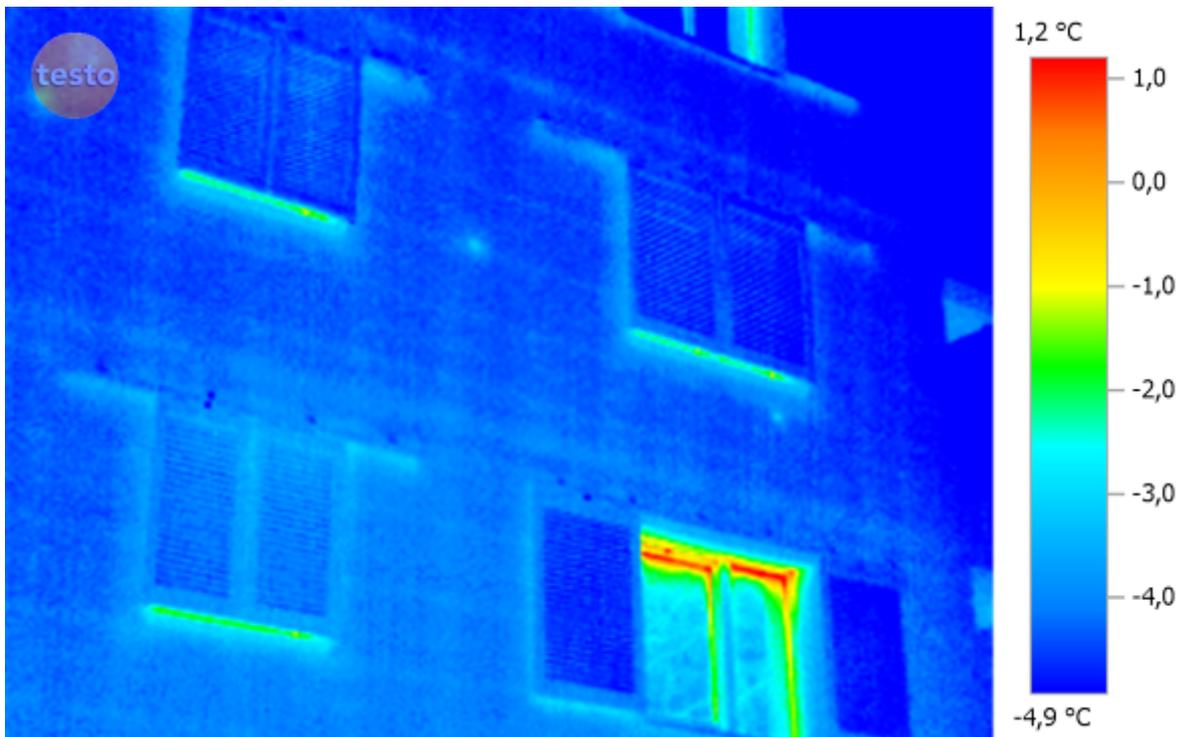


Abb. 4.2-23: Haus 122 Westseite, Richtung Süden: 1. und 2. OG

In den beiden Aufnahmen in Abb. 4.2-22 und Abb. 4.2-23 sind keine nennenswerten Schwachstellen zu erkennen. Sie vermitteln außerdem den Eindruck, dass bei geschlossenen Schiebeläden der Bereich um die Fenster auf einem niedrigeren Temperaturniveau liegt und somit weniger Wärme über geschlossene Schiebeläden verloren ginge. Dies wäre aber eine Fehlinterpretation, da die Schiebeläden stark an den Nachthimmel und die Umgebung abstrahlen und somit stark von dieser Temperatur beeinflusst werden.

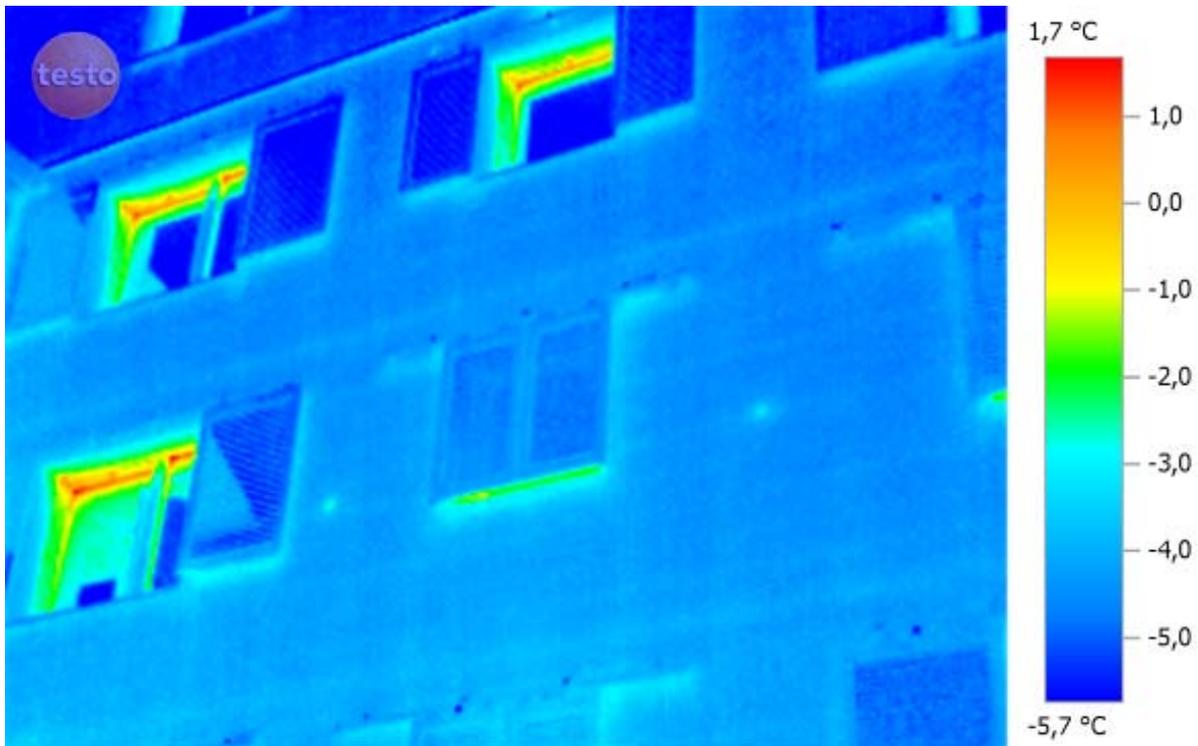


Abb. 4.2-24: Haus 122 Westseite: 2. und 3. OG

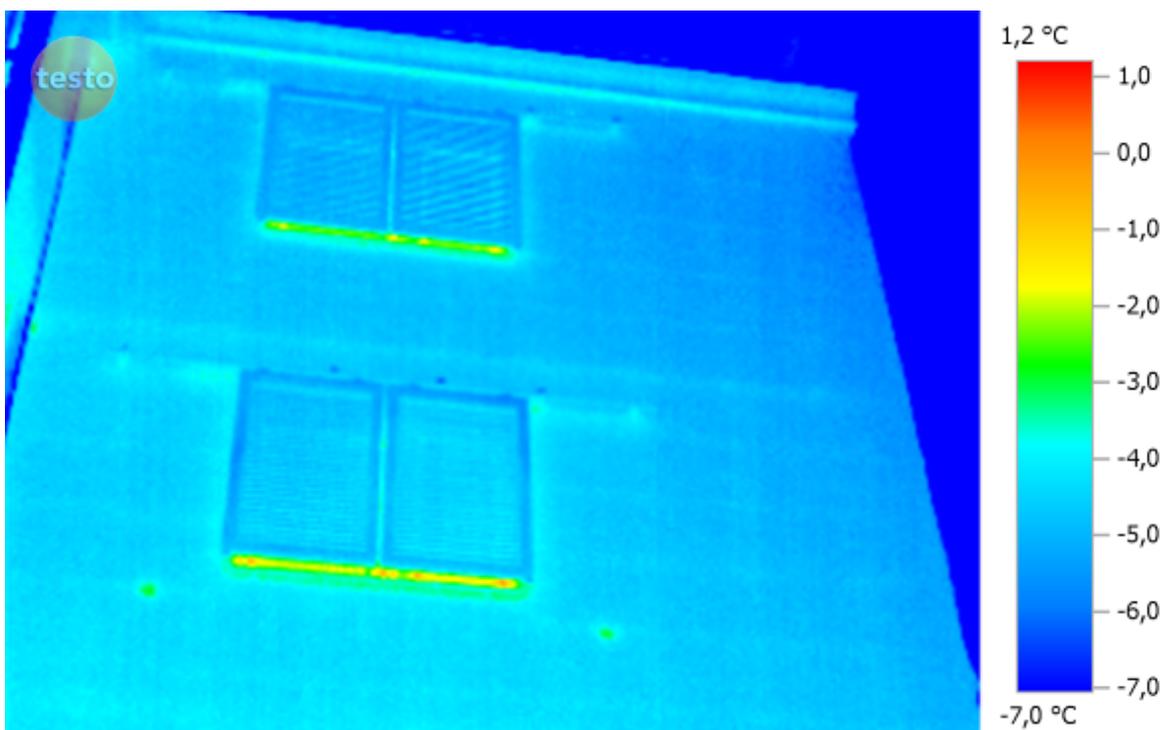


Abb. 4.2-25: Haus 122 Südseite 2. und 3. OG

Auch bei den Aufnahmen in Abb. 4.2-24 und Abb. 4.2-25 sind nur die Gerüstanker als Unregelmäßigkeiten in der Fläche zu erkennen.

Fazit

Die Dämmung der Außenwände mit den beiden unterschiedlichen Fassadendämmsystemen konnte im Wesentlichen gleichmäßig umgesetzt werden. Einzelne Schachstellen, wie ungedämmte Gefache über den Fenstern, die durch die thermografischen Untersuchungen aufgedeckt werden konnten, wurden nachgearbeitet, so dass keine nennenswerten Lücken in der thermischen Hülle mehr vorhanden sind.

4.2.2 Dokumentation der Nacharbeiten im ersten Bauabschnitt

Bei der thermografischen Untersuchung des ersten Bauabschnitts am 04.02.2010 wurde festgestellt, dass bei mehreren Gefachen der Fassade oberhalb von Fenstern sich Auffälligkeiten zeigten, die auf fehlende oder nicht ausreichende Ausflockung des entsprechenden Gefaches hindeuteten.

Die entsprechenden Stellen wurden im Laufe des Jahres 2010 in der Art nachgearbeitet, dass die Gefache, die immer direkt oberhalb eines Fensters lagen, von unten im Bereich der oberen Laibung angebohrt und nachträglich ausgeflockt wurden. Dadurch reichte es aus, nach Verschließen der Öffnung nur die obere Außenseite der Laibung neu zu streichen und es waren keine Malerarbeiten auf der Fassadenfläche nötig, was den Aufwand deutlich reduzierte.

Bei der thermografischen Untersuchung der Gebäude des zweiten Bauabschnitts wurde am 28.01.2011 auch überprüft, ob sich an den genannten Fehlstellen noch Auffälligkeiten im Thermografiebild ergeben oder alle Schwachstellen behoben wurden. Zu berücksichtigen ist, dass die Außentemperaturen im Januar 2011 ca. 4 K niedriger lagen als bei der Messung im Februar 2010. Somit sind das Temperaturniveau bzw. die Skalen nicht identisch. Die zu untersuchenden Stellen müssen im Vergleich zu den sie umgebenden Bereichen beurteilt werden.

Haus 116, Nordseite, Treppenhausfenster zwischen EG und 1.OG

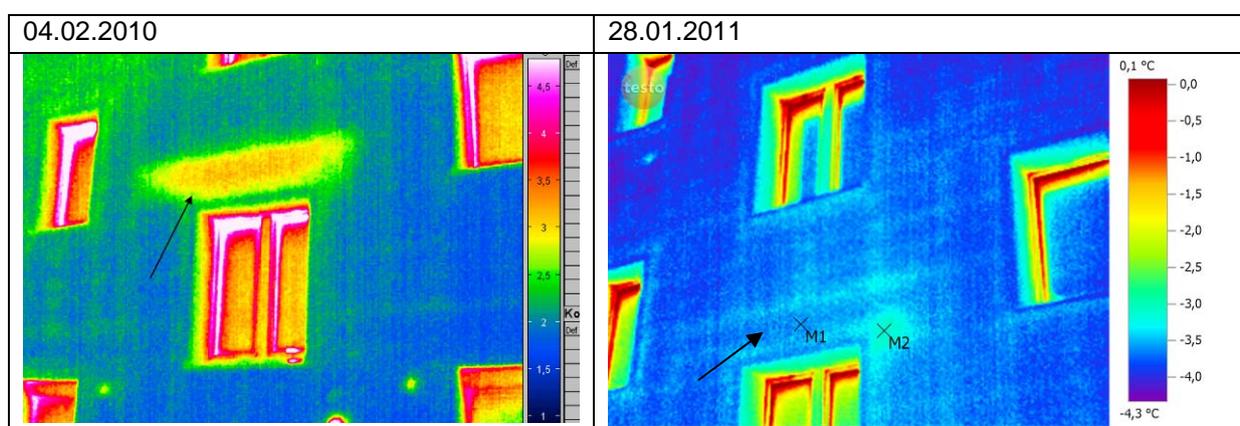
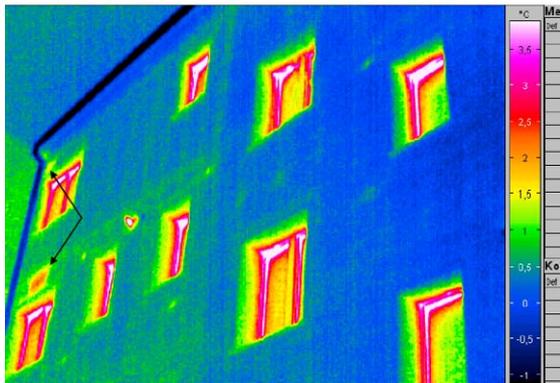


Abb. 4.2-26: Vergleich der Situation über dem ersten Treppenhausfenster 116 vor und nach der Nachbesserung

Abb. 4.2-26 zeigt, dass diese Fehlstelle nahezu vollständig behoben werden konnte, nur rechts oberhalb des Treppenhausfensters ist noch ein Bereich mit leicht erhöhter Temperatur zu erkennen (M2: -3,2 °C, M1: -3,6 °C). Diese verbleibende Fehlstelle tritt an der Kreuzung von mehreren benachbarten Gefachen auf und ist nur noch schwer zu beheben – sie ist aber auch als nicht so gravierend einzuschätzen.

Haus 116, Nordseite, 2. OG und DG links zu Haus 118

04.02.2010



28.01.2011

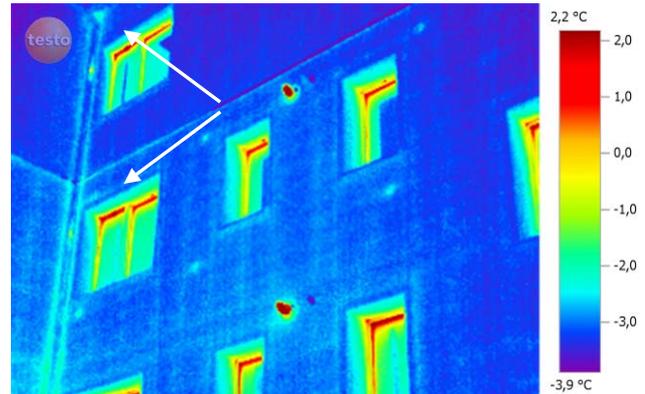


Abb. 4.2-27: Vergleich der Situation über östlichen Fenstern 2.OG und DG in Haus 116

In Abb. 4.2-27 zeigt die Aufnahme vom Januar 2011 am oberen Fenstern keine, am unteren nur noch minimale Fehlstellen. Die folgende Abb. 4.2-28 zeigt nochmals die komplette Nordfassade Haus 116. Der rote Bereich im 2. OG wird durch ein gekipptes Fenster verursacht. Gravierende Fehlstellen sind nicht mehr erkennbar. Die Bereiche der ursprünglich vorhandenen Fehlstellen sind markiert.

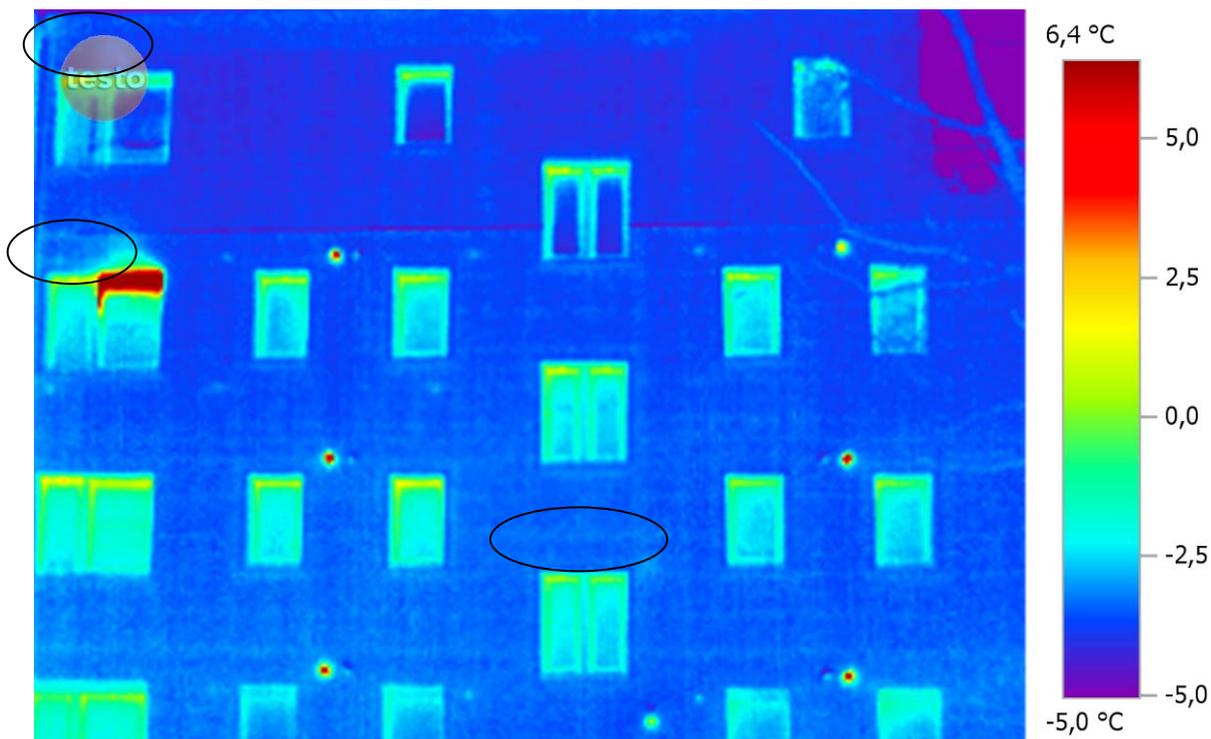


Abb. 4.2-28: Gesamtansicht der Nordfassade Haus 116, die Fehlstellen konnten behoben werden

Haus 120, Nordseite, Treppenhausfenster

04.02.2010

28.01.2011

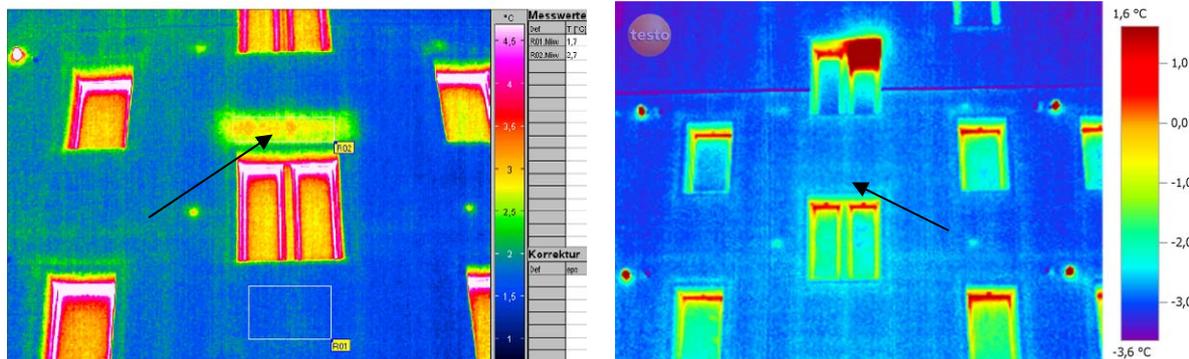


Abb. 4.2-29: Vergleich der Situation über dem Treppenhausfenster zwischen 1. und 2. OG Haus 120

Die Abb. 4.2-29 zeigt, dass die Fehlstelle im nicht ausgeflockten Gefach über dem Treppenhausfenster zwischen 1. und 2. OG durch die Nacharbeiten gut behoben wurde. Die folgende Abb. 4.2-30 zeigt die Ansicht der Nordwand der Häuser 120 (rechts des Treppenhauses) und 118 (links des Treppenhauses). Es sind keine gravierenden Fehlstellen mehr zu erkennen.

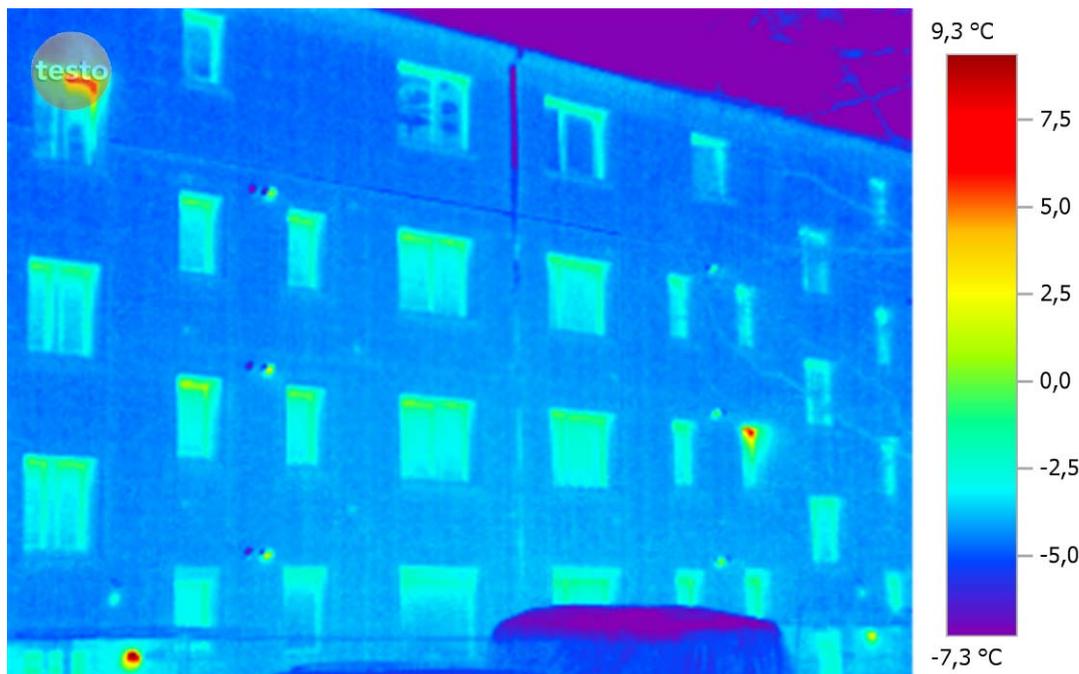


Abb. 4.2-30: Gesamtansicht der Nordfassade Haus 118 (rechte Bildhälfte) und 120 (linke Bildhälfte)

4.2.3 Innenthermografie

Exemplarisch sind im Folgenden einige Details aus dem Inneren der Gebäude dargestellt, die charakteristische Eigenschaften oder Schwachstellen verschiedener Konstruktionen darstellen.

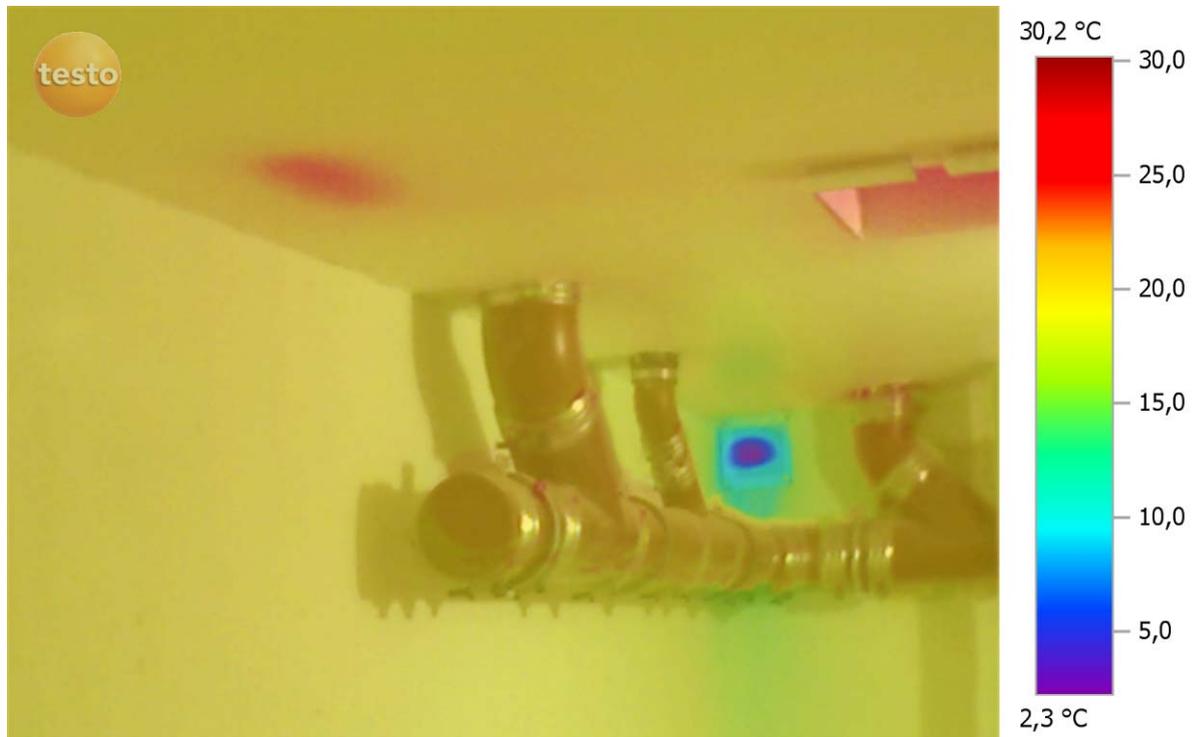


Abb. 4.2-31: Keller Haus 122 - Kellerdecke

In Abb. 4.2-31 ist eine Überlagerung von Foto und Thermografie im Bereich der Kellerdecke des Vorrums zur Semizentrale abgebildet. Es sind drei typische Bereiche zu erkennen:

- Rechts oben an der Decke ist die Aussparung aus der Kellerdeckendämmung für die Absperrventile eines Steigstranges zu sehen. Da an dieser Stelle die Dämmung fehlt, wird der Bereich deutlich hellrot – also wärmer als die Umgebung – dargestellt.
- Etwa in der Bildmitte ist lila die Zuluftöffnung der Kellerlüftung zu sehen, über die kalte Außenluft angesaugt wird, so dass sie kälter als die Umgebung ist.
- Links oben an der Decke der rote Fleck wird von der Stelle verursacht, an der die Zirkulationsleitung aus der Warmwasserleitung herausgeführt wird. Dadurch liegt die warme Zirkulationsleitung nur wenige Zentimeter vom unteren Ende der Kellerdeckendämmung entfernt und gibt somit mehr Wärme nach unten ab. Das Detail ist in Abb. 3.2-13 rechts vor Verschließen der Kellerdecke zu sehen. Man erkennt, dass die Zirkulationsleitung über einige Zentimeter weiter nach unten geführt werden musste. Die energetischen Auswirkungen dieser kleinen Schwachstelle sind aber gering.



Abb. 4.2-32: Haus 122 Kellerflur, Durchgang an tragender Innenwand

Hier ist in einer Überlagerung von Wärmebild und Foto die Wärmebrücke des durchgehenden Türsturzes im Keller gut zu erkennen. Der Türsturz überbrückt die gesamte Dicke der Kellerdeckendämmung und ist an der Unterseite nicht gedämmt, um die freie Durchgangshöhe nicht zu reduzieren. Diese Wärmebrücke wurde in der PHPP-Bilanz berücksichtigt.

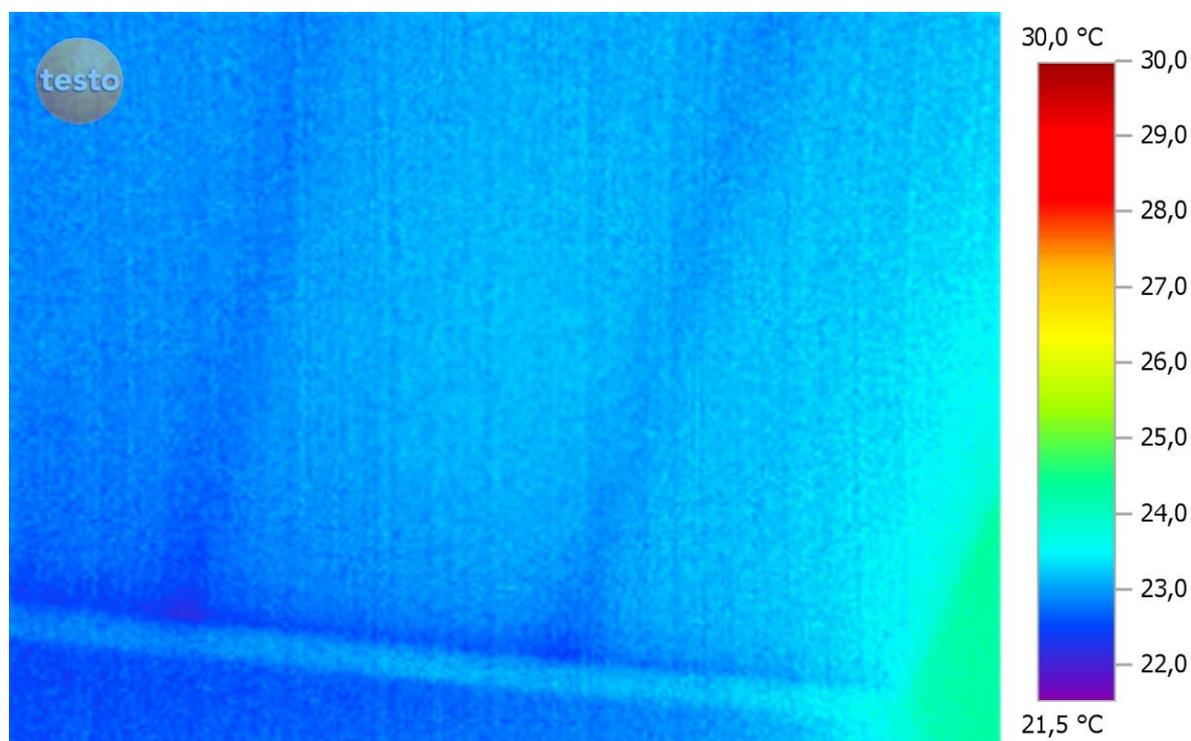


Abb. 4.2-33: Haus 116 Treppenhaus oben, Blickrichtung Dach und Außenwand

In dieser Aufnahme sind bei entsprechender Skalierung die Träger der Dachelemente zu erkennen. Das Bild der Gefache ist sehr homogen und zeigt keine energetischen Schwachpunkte.

4.2.4 Untersuchung der Anlagentechnik

In diesem Kapitel werden exemplarisch charakteristische Details der Anlagentechnik dargestellt.

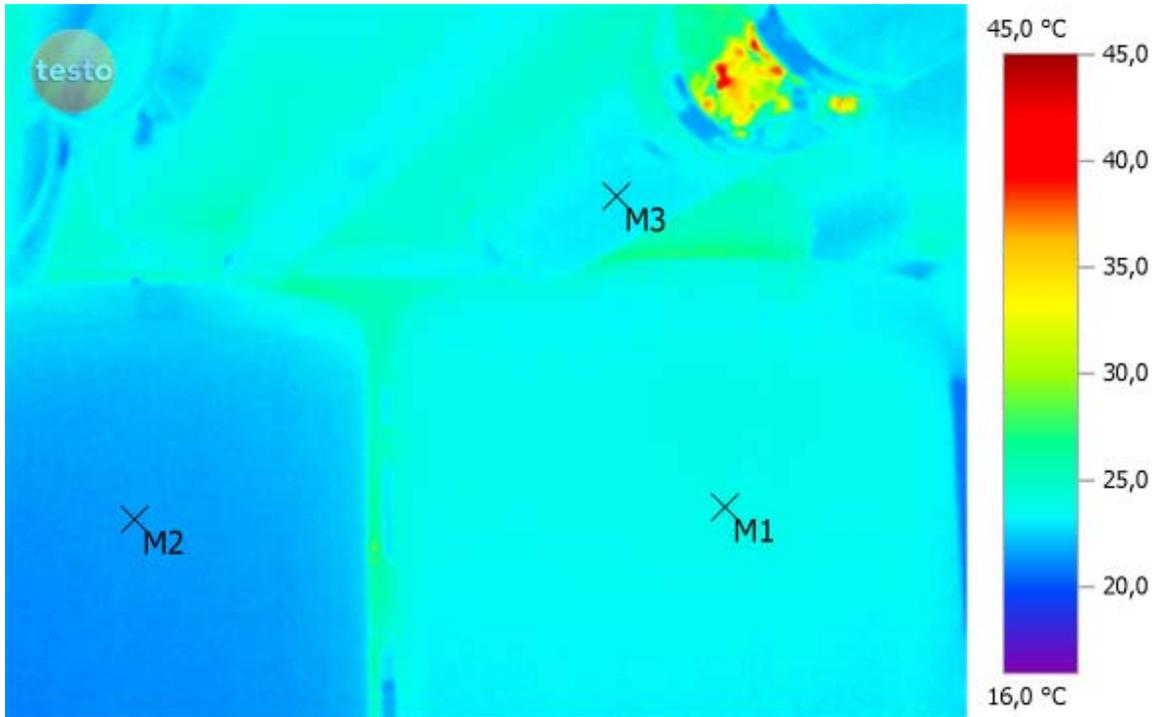


Abb. 4.2-34: Semizentrale 118: Anschluss an Brauchwasserspeicher

In Abb. 4.2-34 sind die Brauchwasserspeicher und deren Anschlüsse dargestellt. Hier wurde die Dämmung lückenlos ausgeführt. Die Oberflächentemperatur der beiden Speicher liegt bei 23,8 °C (M1) bzw. 21,5°C (M2), Letzterer kann je nach Ladezustand aber teilweise mit kaltem Wasser gefüllt sein.

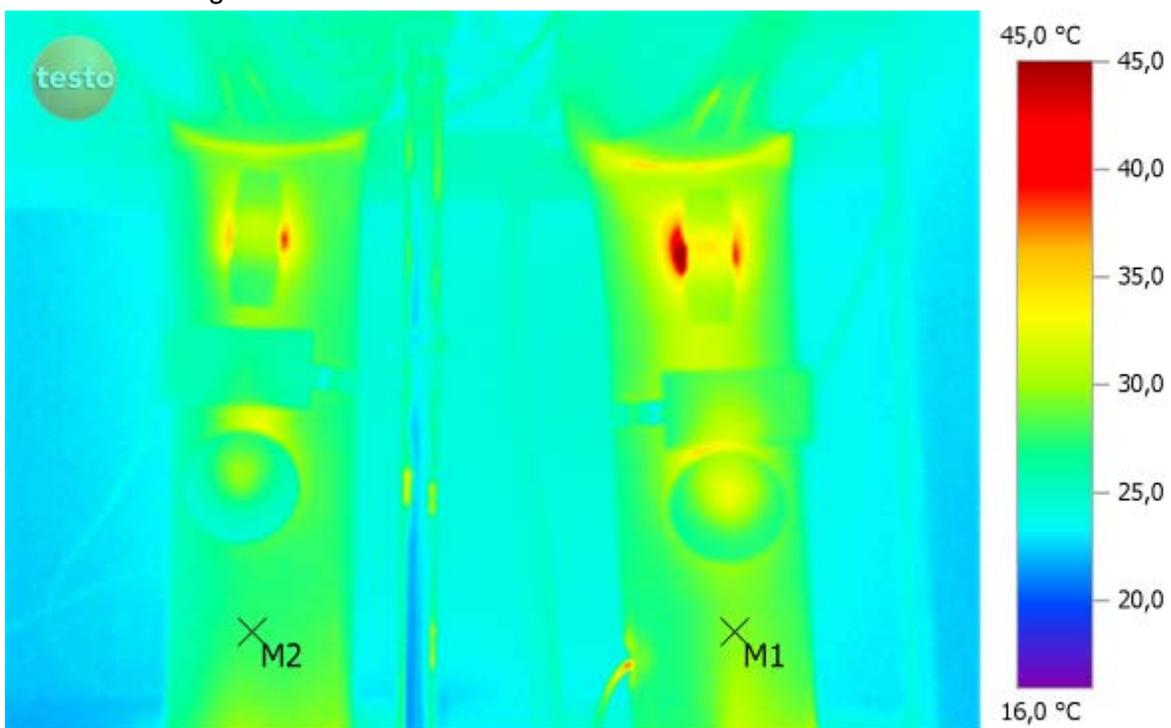


Abb. 4.2-35: Semizentrale 118: Heizungsleitungen

Abb. 4.2-35 zeigt die Heizungsverteilung in der Semizentrale. Das Rohr besitzt im Vorlauf eine Temperatur von 29,3 °C (M1), im Rücklauf 27,6 °C (M2). Es sind nur die üblichen Schwachstellen an den Durchstoßungspunkten der Dämmung (Absperrungen, Temperaturfühler) zu erkennen.

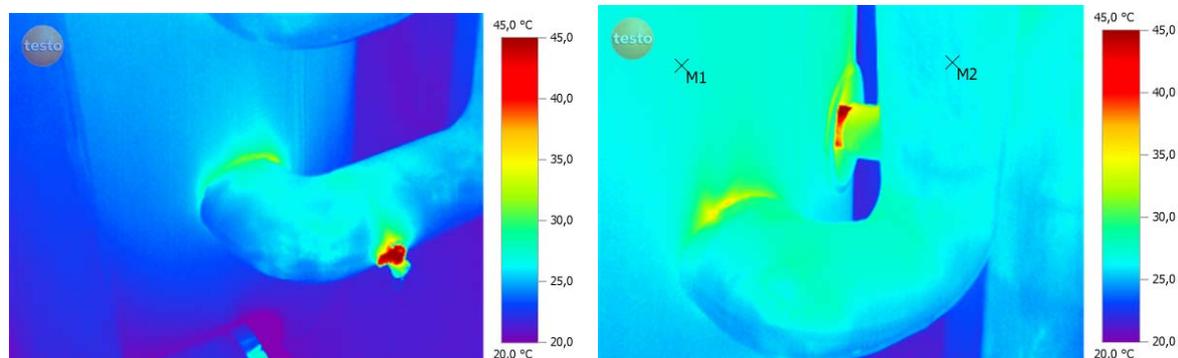


Abb. 4.2-36: Semizentrale 122: links Anschluss Warmwasserspeicher unten, rechts Anschluss Zirkulation

Abb. 4.2-36 zeigt die Anschlüsse an die Warmwasserspeicher. Auffällig ist nur der Entleerungshahn (links) und eine nicht ganz bis zum Stutzen gedämmte Leitung (rechts). Die Oberflächentemperatur des Speichers liegt bei 26,8 °C (M1), die der Warmwassererwärmung bei 26,3 °C (M2).

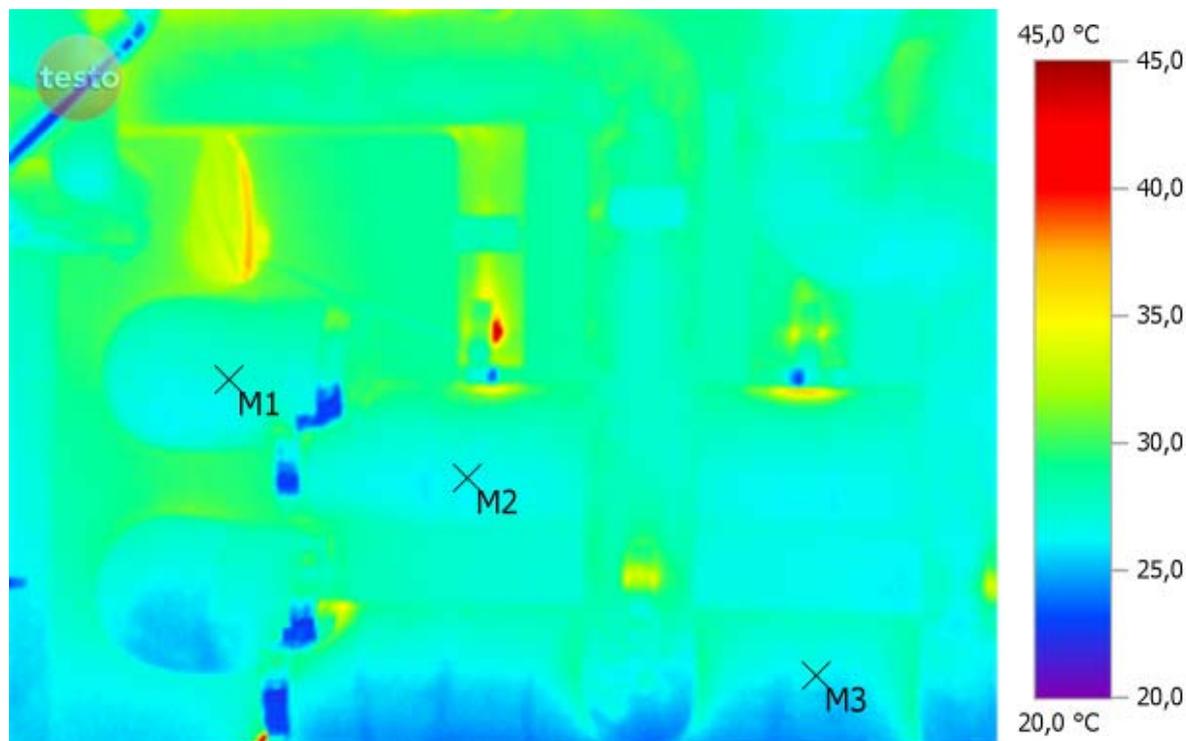


Abb. 4.2-37: Semizentrale 122: Durchführung der Nahwärmeleitungen aus dem Heizhaus

Abb. 4.2-37 zeigt die Durchführung der Nahwärmeleitung aus dem Heizhaus in die Semizentrale. Die Temperaturen der drei Messpunkte liegen alle bei ca. 26,5 °C (bei 23 °C Raumtemperatur und ca. 75 °C in den Leitungen), es treten somit nur minimale Verluste auf.

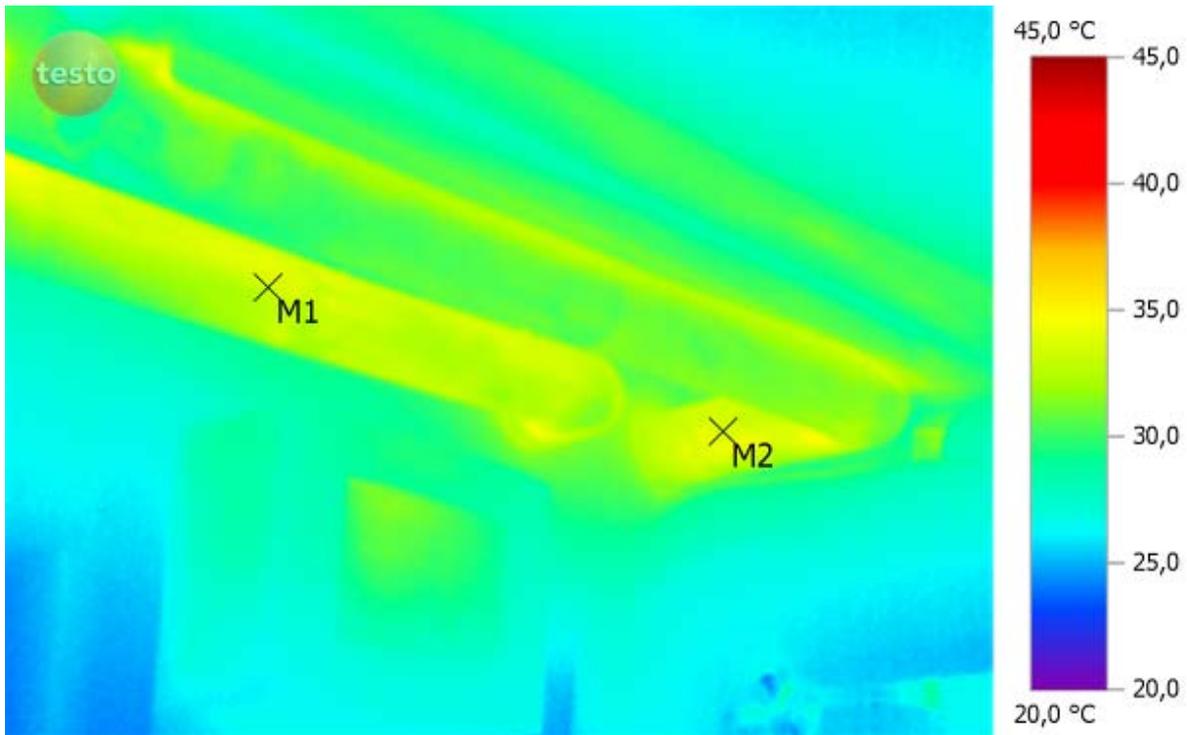


Abb. 4.2-38: Semizentrale 122: Wärmeverteilung

Abb. 4.2-38 zeigt zwei Leitungen der Wärmeverteilung oberhalb der Solarregelung. Diese besitzen eine geringere Dämmstärke, so dass die Temperaturen mit 32,5 °C deutlich höher liegen.

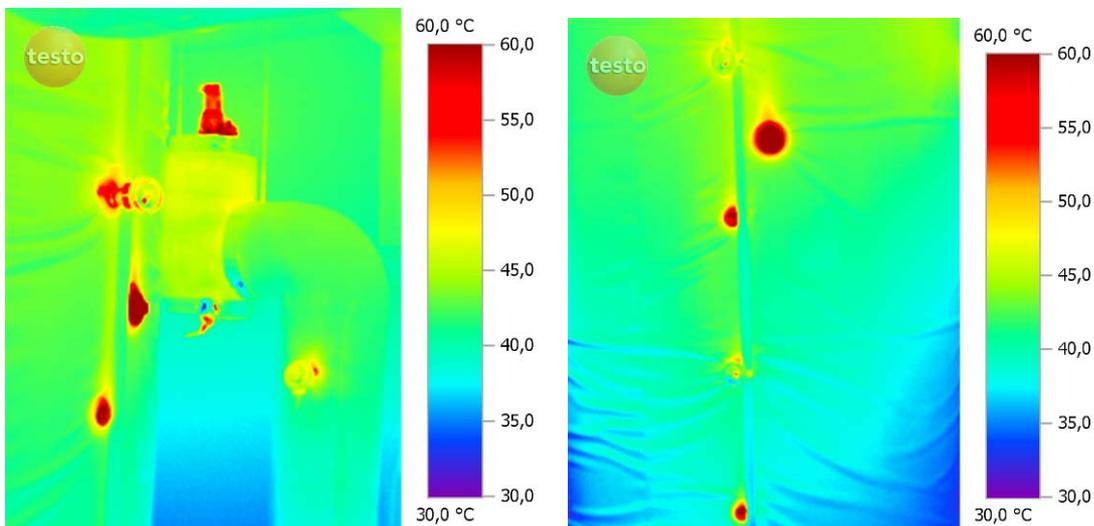


Abb. 4.2-39: Heizhaus: links Anschluss der Nahwärme an den Puffer, rechts ungedämmte Blindstopfen am Pufferspeicher

Beide Bilder der Abb. 4.2-39 zeigen Details des Pufferspeichers im Heizhaus. Dieser ist hervorragend gedämmt, deutlich erkennbar sind aber die ungedämmten Blindstopfen der nicht verwendeten Speicheranschlüsse. Diese können jedoch mit Formteilen nachträglich isoliert werden. Auffällig ist weiterhin der metallene Bereich im linken Bild oben, der ebenfalls ungedämmt ist.

5 Zusammenfassung

Sieben Gebäude aus den 1950er Jahren wurden von der ABG Frankfurt Holding in drei Abschnitten umfassend modernisiert. Die Gebäude erfüllen nach Abschluss der Arbeiten sowohl technisch als auch bezüglich Raumangebot und Ausstattung heutige Anforderungen an attraktiven Wohnraum. Energetisch erreichen sie nach Abschluss der Arbeiten die höchsten verfügbaren Standards. So erfüllen die Gebäude die Anforderungen an den Passivhaus-Standard, obwohl sie als Altbauten in innerstädtischer Lage ungünstige äußere Randbedingungen besitzen. Dazu wurden sie umfassend gedämmt, als Dämmmaterial wurden überwiegend Zelluloseflocken aus recyceltem Altpapier in Kombination mit hölzernen Unterkonstruktionen verwendet. Die dämmende Gebäudehülle besteht somit überwiegend aus nachwachsenden Rohstoffen. Besonders die Außenwanddämmung, die in zwei unterschiedlichen Varianten ausgeführt wurde, musste für das Projekt neu entwickelt bzw. an die speziellen Anforderungen von Mehrfamilienhäusern angepasst werden. Nachdem sich im ersten Bauabschnitt zeigte, dass der Montageaufwand der ersten eingesetzten Konstruktion hoch war, wurde im zweiten und dritten Bauabschnitt eine Konstruktion mit Konsolen an Metallschienen eingesetzt, die schneller zu montieren ist und gleichzeitig energetisch günstiger bewertet werden kann, so dass ihre Gesamtdicke bei gleichem Wärmeverlust um 2 cm verringert werden konnte.

Die Belüftung der Wohnungen erfolgt über wohnungsweise angeordnete mechanische Lüftungsgeräte mit Zu- und Abluft und Wärmerückgewinnung, die in den Bädern der Wohnungen platziert wurden. Die Luftverteilung erfolgt in einer abgehängten Decke im Badezimmer und im Flur der Wohnung. Neben den Wohnungen werden in diesen Gebäuden auch das Treppenhaus und der Keller mechanisch be- bzw. entlüftet. Die Luftdichtheit der Gebäude wird über den Innenputz hergestellt, die Fenster wurden auf den Außenputz des Bestandsmauerwerks abgedichtet, so dass die Luft dichtende Ebene an dieser Stelle von innen nach außen springt. Die Ergebnisse der Luftdichtheitsmessungen von im Mittel 0,29 1/h über alle Häuser zeigen, dass dieses Luftdichtungskonzept auf der Baustelle sehr gut umgesetzt wurde.

Die Wohnungen besitzen eine Zuluftheizung über die Lüftungsanlage und zusätzliche Heizkörper in den Badezimmern sowie teilweise im neu aufgesetzten Dachgeschoss. Die Wärmeerzeugung erfolgt überwiegend mit einem Rapsöl-Blockheizkraftwerk, unterstützt von einem Erdgas-Spitzenlastkessel. Die Heizwärme wird von dem gemeinsamen Heizhaus zu Semizentralen in den einzelnen Gebäudeblöcken verteilt. Dort findet auch die Warmwasserbereitung statt. Thermische Solaranlagen auf jedem Block decken ca. 60 % des Wärmebedarfs für die Warmwasserbereitung ab, der Rest wird über Wärme aus der Heizzentrale abgedeckt. Um den solaren Deckungsgrad zu erhöhen und gleichzeitig die Verteilverluste zu minimieren, wird die Warmwasserbereitung auf einer Temperatur von 48 °C – 50 °C betrieben. Zur Hygienisierung des Trinkwassers ist eine Diaphragmalyse vorhanden. Spararmaturen in den Bädern sollen gleichzeitig den Wasserverbrauch begrenzen. Die vertikalen Zirkulationsleitungen wurden in der Warmwasserleitung als Rohr-in-Rohr-System verlegt, um die Zirkulationsverluste zu reduzieren. Alle Verteilleitungen für Heizung und Warmwasser wurden deutlich dicker gedämmt als nach den Anforderungen der Energieeinsparverordnung vorgegeben (250 % bezogen auf die EnEV-Anforderungen), zusätzlich wurden die horizontalen Leitungen innerhalb der Kellerdeckendämmung verlegt. Dies führt zu einer deutlichen Reduktion der Verluste der Wärmeverteilung.

Neben den bereits erwähnten Gewerken einer energetischen Modernisierung wurden in den Gebäuden noch weitere Maßnahmen zur Effizienzsteigerung ergriffen. So wurden z. B. nicht nur Strom sparende Umwälzpumpen eingesetzt, sondern bei den Fahrstühlen, die in vier der sieben Gebäude nachträglich eingebaut wurden, auf besonders geringen Stromverbrauch und niedrige Standby-Verluste geachtet. In den Wohnungen wurde in Flur und Badezimmer eine sparsame Beleuchtung eingebaut, ein Trockenschrank im Badezimmer trocknet die Wäsche ohne zusätzlichen Energieverbrauch und ein Standby-Abschalter für die Unterhaltungselektronik im Wohnzimmer soll den Mietern die Reduktion des Stromverbrauches erleichtern.

Die thermografischen Untersuchungen dokumentierten die nahezu lückenlose Ausführung der thermischen Hülle der Gebäude – sie haben aber auch einige Schwachstellen aufdecken können, die besonders im Bereich der Fassade nachgearbeitet werden mussten. Bei den Verteilleitungen zeigten sich einerseits die Vorteile einer erhöhten Dämmstoffdicke in geringen Verlusten der Verteilleitungen, es wurden aber auch Bereiche beobachtet, in denen die Isolierung von Anschlüssen und Armaturen nicht lückenlos ausgeführt war.

Ein wichtiges Ziel des Projekts wurde ebenfalls erreicht – die fast vollständige Reduktion der Treibhausgasemissionen für die Bereiche Heizung, Warmwasser und Hilfsenergie. Rapsöl-Blockheizkraftwerk und thermische Solaranlagen erzeugen zusammen über 80 % der benötigten Wärme regenerativ. Die erzeugte elektrische Energie des BHKW wird teilweise für die Anlagentechnik verwendet, der Überschuss wird in das öffentliche Netz eingespeist. Berücksichtigt man die Treibhausgas-Gutschrift gegenüber dem deutschen Kraftwerksmix für die eingespeiste Elektroenergie, so können die Treibhausgasemissionen für die sieben Gebäude mit über 3.800 m² Energiebezugsfläche auf Null reduziert werden. Dies zeigt, dass es mit einer Kombination von Effizienzmaßnahmen bei Gebäudehülle und Anlagentechnik sowie regenerativer Wärme- und Stromerzeugung gelingt, Netto-Nullmissionskonzepte umzusetzen, die bereits heute die sich abzeichnenden Standards der novellierten Richtlinie „Gesamteffizienz von Gebäuden“ der Europäischen Union für das Jahr 2021 erfüllen. Als nächster Schritt auf dem Weg zu einer zukünftigen, vollständig regenerativen Versorgung von Gebäuden muss nun noch der Haushaltsstromverbrauch reduziert und auf eine regenerative Versorgung umgestellt werden. Auch dieser Weg wurde bei den Gebäuden in der Rotlintstraße bereits eingeschlagen.