

25 Jahre Passivhaus Darmstadt Kranichstein



Mit Förderung durch das
Hessische Ministerium für Wirtschaft, Energie, Verkehr und Landesentwicklung



Passivhaus Institut Darmstadt

September 2016

25 Jahre Passivhaus Darmstadt Kranichstein

Autoren:

Dr. Wolfgang Feist¹
Dr. Witta Ebel
Søren Peper
Wolfgang Hasper
Dr. Rainer Pfluger²
Dr. Martin Kirchmair³

Herausgeber:

PASSIVHAUS INSTITUT
Dr. Wolfgang Feist
Rheinstraße 44/46
D-64283 Darmstadt
Tel: 06151-82699-0
E-Mail: mail@passiv.de
www.passiv.de

Darmstadt, September 2016

Dieser Bericht entstand mit Fördermitteln des Hessischen Ministeriums für Wirtschaft, Energie, Verkehr und Landesentwicklung.

Wir danken Prof. Dr. Andreas Saxer von der Universität Innsbruck / Arbeitsbereich Materialwissenschaften

Bildnachweis:

Alle Abbildungen und Grafiken dieses Berichtes sind Eigentum des Passivhaus Instituts. Abweichend sind jeweils die Quellen angegeben.

¹ Passivhaus Institut Darmstadt und Universität Innsbruck, Arbeitsbereich Energieeffizientes Bauen

² Universität Innsbruck, Arbeitsbereich Energieeffizientes Bauen, Technikerstr. 13, A-6020 Innsbruck

³ Universität Innsbruck, Institut für Mikrobiologie, Technikerstr. 25d, A-6020 Innsbruck

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung und Zusammenfassung.....	6
2	Das Passivhaus - Pilotprojekt.....	10
2.1	Überblick Passivhaus Darmstadt Kranichstein	10
2.2	Das Forschungsprojekt und der Bau des ersten Passivhauses	11
2.3	Baugebiet “experimenteller Wohnbau Darmstadt Kranichstein”	13
2.4	Ansichten Passivhaus Kranichstein.....	14
2.5	Querschnitt Passivhaus Kranichstein	16
2.6	Grundrisse Passivhaus Darmstadt Kranichstein.....	18
2.7	Wärmeversorgung	21
2.8	Elektroeffizienz und Stromversorgung.....	22
2.9	Energiebilanz mit dem PHPP	23
2.10	Kosten und Wirtschaftlichkeit	27
2.11	Messdatenerfassung	28
2.12	Messergebnisse	29
3	Hochwertige Wärmedämmung	37
3.1	Außenwand- und Kellerkonstruktion.....	37
3.1.1	Außenwände (inkl. Dämmung)	37
3.1.2	Prüfung der Außenwandkonstruktion nach 25 Jahren	39
3.1.3	Konstruktion inkl. Dämmung der Bodenplatte bzw. Kellerdecke mit Anschlusspunkten zu Außen- und Innenwänden	50
3.2	Dachkonstruktion.....	51
3.2.1	Konstruktion (inklusive der Dämmung) des Daches.....	51
3.3	Dauerhafte Vermeidung von Wärmebrücken – Überprüfung durch Infrarot-Thermographie	57
3.3.1	Übersicht: einmal rund um das Gebäude	57
3.3.2	Außenwand und zugehörige Anschlüsse	73
3.3.3	Wärmeverluste zum Keller – Thermographie von den Kellerräumen aus.....	80
3.3.4	Innenthermographie.....	84
4	Fenster und Verglasung	96

4.1	Messtechnische Untersuchung der Verglasungen	100
4.2	Innenthermographie Fenster	104
5	Luftdichtheit	111
5.1	Luftdichtheit Dach und Anschluss Dach - Wand.....	114
5.2	Luftdichtheit Wand und Anschluss Wand - Fensterrahmen.....	118
5.2.1	Bodenanschluss Fenster	122
5.2.2	Luftdichtheit Schalter und Steckdosen in Außenwänden	124
5.3	Luftdichtheit Bodenplatte EG und Anschluss Außenwand.....	125
5.4	Austausch der Fenster- und Tüрдichtungen	126
5.5	Luftdichtheit im Langzeittest - Messergebnisse	127
5.6	Fazit Luftdichtheit	130
6	Lüftung mit Wärmerückgewinnung	131
6.1	Lüftungsanlage in Darmstadt Kranichstein	131
6.1.1	Lüftungssystem und Betriebsweise	131
6.1.2	Lüftungsgeräte mit Wärmerückgewinnung	135
6.2	Wirksamkeit und Effizienz der Lüftungsanlage	138
6.2.1	Stromverbrauch und Wärmebereitstellungsgrad des Wärmerückgewinnungsgerätes .	138
6.2.2	Luftfeuchtigkeit und CO ₂ -Konzentrationen	143
6.2.3	Fazit zur Dauerhaftigkeit der Lüftungsanlage.....	145
6.3	Innenraum-Luftqualität I: Gasförmige Luftverunreinigungen.....	146
6.3.1	VOC und Formaldehyd	147
6.3.2	Radon	149
6.4	Innenraum-Luftqualität II Untersuchung zur Hygiene von Lüftungsanlage und Raumluft im Passivhaus Darmstadt Kranichstein nach 25 Betriebsjahren	150
6.4.1	Hygienemessungen und Probenahme	150
6.4.2	Sichtprüfung und Kamerabefahrung im Zuluftkanalnetz	153
6.4.3	Raumluftproben	155
6.4.4	Luftproben an den Zuluftauslässen und isokinetische Probenahme im Zuluftkanal	157
6.4.5	Abklatschproben an der Zuluftkanalwandung	158
6.4.6	Materialproben	159

6.4.7	Fazit aus den Hygieneuntersuchungen	160
7	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen.....	161
7.1	Hauptergebnisse	161
7.2	Diskussion und Empfehlungen	167
8	Literatur	172
9	Anhang	176
9.1	Gutachten des RMI zur Haftzugprüfung des Außenputzes	176
9.2	Blower Door Messprotokolle.....	186
9.2.1	Prüfbericht und Messkurve der Blower Door Messung in Haus A nach dem Austausch der Fenster- und Türdichtungen.....	186
9.2.2	Prüfbericht und Messkurve der Blower Door Messung in Haus B nach dem Austausch der Fenster- und Türdichtungen.....	188

1 Einführung und Zusammenfassung

Im Jahr 2016 jährt sich zum 25. Mal der Einzug von vier Baufamilien in das erste Passivhaus, gelegen im Darmstädter Stadtteil Kranichstein. Ein Wohngebäude mit fast keiner Heizung? Die Risiken waren – aus Sicht der Nichtwissenschaftler – nicht gering. Viele ehrgeizige Projekte nach den ersten Ölpreiskrisen hatten ihre Ziele nicht erreicht oder besondere, realitätsferne Anforderungen an das Verhalten der Nutzer gestellt.

Niedrigenergiehäuser hatten in einigen skandinavischen Ländern bereits eine längere Tradition, die zeigte, dass sich die passiven Prinzipien, richtig ausgeführt, bestens bewährten und längere Lebensdauern aufwiesen als aktive Systeme [Feist 1988a]. Hessen hatte sich mit einem kleinen Förderprogramm für Niedrigenergiehäuser vorgewagt – aber trotzdem mochte in Deutschland kaum ein Bauherr oder Architekt daran glauben. Natürlich war die Bauwirtschaft noch nicht auf die notwendige Bauqualität eingestellt (es galt noch die Wärmeschutzverordnung 1982), und die überwiegende Einschätzung war, dass "diese einzelnen Häuser in Deutschland, sofern die Verbrauchswerte tatsächlich gering waren, vermutlich von frierenden Energievegetariern bewohnt wurden". Das Konzept war es, die Prinzipien des Niedrigenergiehauses so auf die Spitze zu treiben, dass der Verbrauch mehrerer ganz normaler Familien auf „fast Null“ reduziert würde. So die Idee der Wissenschaftler, die vor der ersten Realisierung Passivhäuser keineswegs als einen breit umsetzbaren Standard ansahen. Das hessische Wirtschafts- bzw. Umweltministerium unterstützte die Pioniere mit einem Forschungsprojekt und der Förderung der baulichen Mehrkosten für das erste Passivhaus. Dazu gehörte auch die Förderung eines umfangreichen Mess- und Auswertungsprogramms, welches die Vorhersagen bestätigte und eine hohe Nutzerzufriedenheit dokumentierte. Dadurch etablierte sich das Gebäude zu einem Vorbild und Prototyp für den neuen Standard. 1996 wurde dann der „Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser“ gegründet, um weitere Entwicklungen zu diskutieren und zu verbreiten.

Das erste Passivhaus in Kranichstein dokumentierte vor allem dies: Gebäude mit hohem Komfort und sehr geringem Energieverbrauch sind möglich – nicht nur in der Theorie, sondern auch in der Praxis, mit normalen Bewohnern und ohne „performance gap“. Das ist heute, 2016, keine Selbstverständlichkeit beim energiesparenden Bauen, aber für Passivhäuser vieltausendfach reproduziert worden – in Hessen, Deutschland, Europa und weltweit.

Natürlich blieben noch Fragen offen, die erst langfristig beantwortet werden konnten. Zu einer nachhaltigen Lösung gehört auch, dass die Ergebnisse kontinuierlich reprodu-

zierbar bleiben, insbesondere in Bezug auf die Komfortparameter und den Energieverbrauch. Zur Nachhaltigkeit gehört auch, dass die eingesetzten Lösungen und Materialien dauerhaft sind, d.h. eine lange Nutzungsdauer haben. Für eine solche Untersuchung ist das älteste bestehende Passivhaus prädestiniert. Mit der Förderung des hessischen Wirtschaftsministeriums wurden jetzt die relevanten Fragestellungen untersucht. Die Ergebnisse in Kurzform:

- Die **Verbrauchswerte** sind dauerhaft gering. Im langjährigen Mittel werden 94% Heizenergie im Vergleich zum statistischen Durchschnitt von heute eingespart. Das Messergebnis stimmt mit der rechnerischen Ermittlung überein.
- Das **Wärmedämmverbundsystem** ist vollständig intakt, der EPS-Dämmstoff ist unverändert, weder ist er geschrumpft noch weist er veränderte Kennwerte auf (Untersuchung der Univ. Innsbruck). Besonders gut bewährt hat sich das mineralische Putzsystem. Die Putzplatte hat sich als extrem fest und belastbar herausgestellt. Die Festigkeitsprüfung der Fassade zeigt, dass selbst der stärkste Orkan keinen Schaden anrichten würde. Für die Nutzungsdauer kann von mindestens noch einmal 25 Jahren ausgegangen werden.
- Die Häuser sind auch 2016 noch zuverlässig **luftdicht**, und die Ergebnisse der Drucktestmessung sind – nach Nachstellen der Fenster und (erstmaligem) Auswechseln der Lippendichtungen – mit denen der Erstmessung nach Bezug gleichwertig.
- Die **thermografische** Untersuchung zeigt an den opaken Gebäudeflächen keine Veränderungen gegenüber dem ursprünglichen Zustand. Interessant waren die **Fenster**, weil hier ein relevanter Füllgasverlust (Krypton) nicht ausgeschlossen werden konnte. Der Gasverlust ist unterschiedlich hoch, aber sehr gering, dies wurde durch separate U-Wert-Messungen an den Fensterscheiben unabhängig bestätigt⁴. Damit kann auch bei den Fenstern von einer weit höheren (im Wesentlichen unbeeinträchtigten) Nutzungsdauer von mehr als 40 Jahren ausgegangen werden. Das ist deutlich länger als üblicherweise angenommen wird.

⁴ Unter der Annahme, dass sich die Beschichtung der Verglasung (Metallbedampfung) über die Jahre nicht maßgeblich verändert hat.

- Das im Objekt realisierte **Dach** ist ohne eine Hinterlüftung ausgeführt. Daher war es wichtig, die Feuchtigkeit in der Dachkonstruktion zu kontrollieren. Es wurde festgestellt, dass die Werte auch nach 25 Jahren unbedenklich sind.
- **Lüftungsanlage:** Die Lüftungsrohre auf der Außen- und Zuluftseite sind auch nach 25 Jahren noch sehr sauber, eine Reinigung ist nicht erforderlich. Der hochwertige Filter (F8) hat sich bewährt. Die Mehrzahl der 4 mal 2 Ventilatoren funktioniert einwandfrei, einige wurden über die Jahre bei Defekt ausgetauscht. Die Effizienz der Wärmerückgewinnung liegt unverändert bei über 80%. Der Stromverbrauch der Anlage ist extrem gering.
- **Luftqualität:** Die Werte der chemischen und der mikrobiologischen Untersuchung lassen – wie schon bei den in den Anfangsjahren durchgeführten Messungen – keine Belastungen erkennen, insbesondere keine, die vom Gebäude verursacht wären.

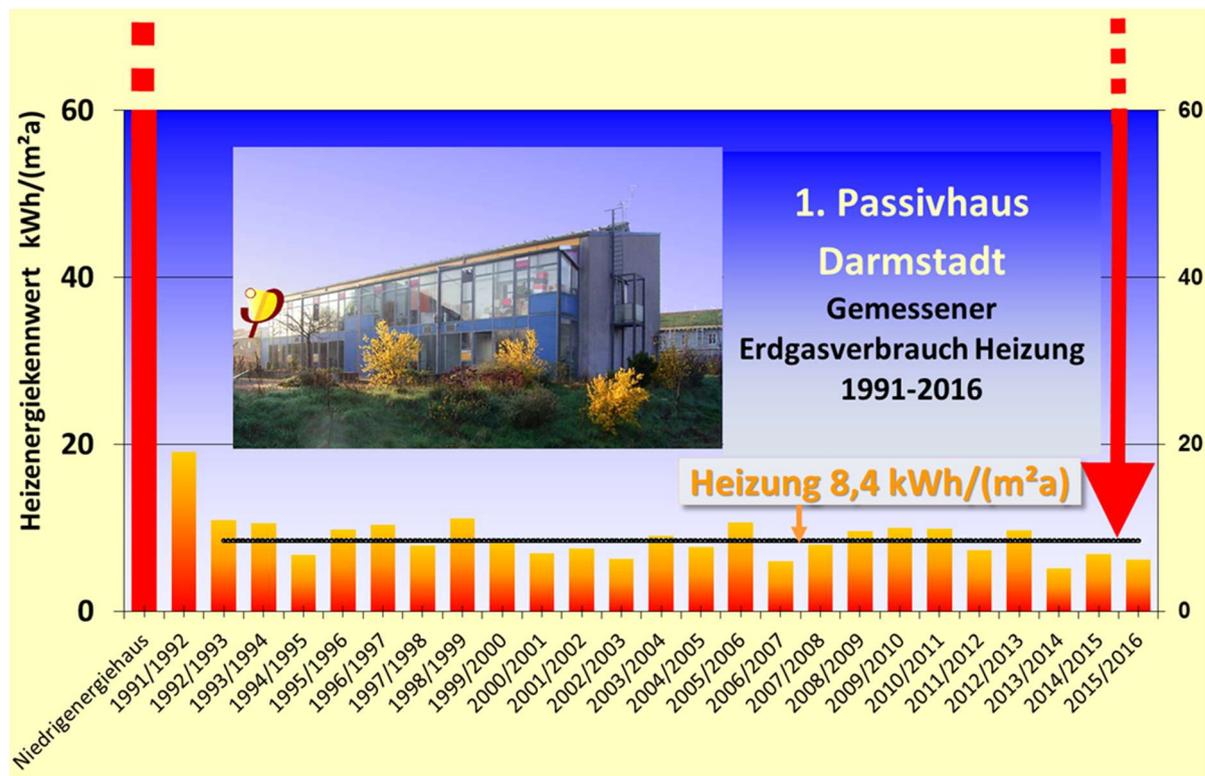


Abbildung 1: Gemessener Jahresheizenergieverbrauch im Durchschnitt aller vier Wohnungen des ersten Passivhauses im Zeitraum zwischen 1991 und 2016. Zum Vergleich: Niedrigenergiehaus bzw. Neubau 2016. Die realisierte Einsparung gegenüber dem damaligen (zum Zeitpunkt der Realisierung gültigen) Neubausstandard beträgt ca. 94%.

Aus diesen Untersuchungsergebnissen ergeben sich, zusammen mit den Gesamterfahrungen aus dem Projekt, die folgenden Schlussfolgerungen:

Passivhäuser funktionieren dauerhaft, mit planbarer Energieeffizienz und ohne „performance gap“. Das Konzept kommt den Nutzerwünschen entgegen: Thermischer Komfort und dauerhaft gute Luftqualität sind garantiert. Passivhäuser erfordern keine besonderen Kenntnisse oder besondere Bedienung, keine komplizierte Regelung oder aufwändige Energieversorgung. Die Mehrinvestitionen für Passivhäuser sind gering und machen sich bereits über die eingesparten Energiekosten bezahlt.

Das Passivhauskonzept hat seine Bewährungsprobe bestanden. Mit Passivhäusern lassen sich die „Nearly zero energy buildings“ der Europäischen Gebäuderichtlinie kostengünstig und nutzerfreundlich umsetzen. Jeder Bauherr und Planer ist gut beraten, sich an diesem Standard zu orientieren und ihn konsequent umzusetzen.

2 Das Passivhaus - Pilotprojekt

2.1 Überblick Passivhaus Darmstadt Kranichstein

Das Gebäude ist das erste realisierte und gleichzeitig normal bewohnte Passivhaus. Vier private Bauherren haben den Auftrag zur Planung 1990 an das Architekturbüro Bott/Ridder/Westermeyer erteilt. Es wurden vier Reiheneinheiten mit je 156 m² Wohnfläche und identischen Grundrissen realisiert [Feist 1988b]. Die baulichen Mehrinvestitionen des Projektes und die wissenschaftliche Auswertung wurden zu 50% durch die hessische Landesregierung gefördert. Die Zielsetzung des Forschungsprojektes war es, zu überprüfen, wie weit der Energieverbrauch in Wohngebäuden durch ausschließlich passive Maßnahmen gesenkt werden kann. Nach der Auswertung von inzwischen 25 Messjahren erfüllt das Haus die Erwartungen in Bezug auf die Energieeffizienz. Gegenüber dem damaligen Durchschnitt deutscher Wohngebäude wurde der gemessene Heizenergieverbrauch auf ein Fünfundzwanzigstel gesenkt, der gesamte Endenergieverbrauch für Heizung, Warmwasser und Haushaltsstrom auf ungefähr 12% der durchschnittlich üblichen Werte.

Diese Ergebnisse werden durch die Optimierung des Wärmeschutzes in Verbindung mit dem Potential für passiv-solare Wärmegewinne erreicht. Die folgende Tabelle stellt einige wesentliche Bauteilqualitäten im Überblick dar.

Tabelle 1: Bauqualitäten beim ersten Passivhaus

U-Wert Außenwand	0,137 W/(m ² K)
U-Wert Kellerdecke	0,131 W/(m ² K)
U-Wert Dach	0,108 W/(m ² K)
U-Wert Fenster	0,79 W/(m ² K)
Wärmerückgewinnung	80%
Dichtheit Drucktest n ₅₀	0,2 bis 0,3 h ⁻¹

Zusätzlich wurden thermische Sonnenkollektoren für die Warmwasserbereitung installiert und mit einer Grauwasser-Wärmerückgewinnung experimentiert. Eine Regenwassernutzung ist installiert, und wie alle Gebäude des Baugebiets wurde das Dach als Grasdach ausgeführt. An dem westlichen Endhaus wurde im Jahr 2016 zudem eine Photovoltaikanlage (4,1 kWp) nachgerüstet.

2.2 Das Forschungsprojekt und der Bau des ersten Passivhauses

Bevor mit dem Bau begonnen wurde, waren zunächst eine Reihe von Forschungsfragen zu klären. Das vorbereitende Forschungsprojekt, finanziert vom hessischen Wirtschaftsministerium, hatte sich zur Aufgabe gemacht, auf der Basis von dynamischen Simulationen mit dem selbstentwickelten Gebäudesimulationsprogramm „Dynbil“ [Feist 1993] das Gebäude zu optimieren und die entscheidenden innovativen Komponenten zu entwickeln – und zwar unter den Vorgaben eines engen finanziellen Rahmens.

Das Projekt musste privat finanziert werden, und zwar mit einer 50%igen Förderung allein der Mehrkosten für die Passivhausbauweise. Diese Randbedingungen und dieses Vorgehen führten neben einer für damalige Verhältnisse ungewöhnlich guten Dämmung u.a.

- zur erstmaligen Produktion und dem Einsatz von Dreifach-Wärmeschutzverglasungen und wärmegeprägten Fensterrahmen,
- zu für das Gebäude optimierten Fenstern bzgl. Tageslicht und Heizung (vgl. Abbildung 2),
- zu einer Lüftungsanlage mit einer (nach zielführendem Umbau der Originalgeräte) hocheffizienten Wärmerückgewinnung mit sehr geringem Stromverbrauch. Zusätzlich wurden ein Erdreichwärmetauscher und eine bedarfsgeführte Regelung eingesetzt,
- zu einer Grauwasser-Wärmerückgewinnung und
- zu einer konsequenten Ausstattung mit möglichst sparsamen Elektrogeräten.

Systematisch vermieden wurden dagegen besonders teure Komponenten mit geringer Perspektive zu wesentlichen Kostendegressionen. Eine Reihe paralleler Projekte in Deutschland und in der Schweiz (z.B. Nullenergiehaus Dörpe, Energieautarkes Solarhaus Freiburg, Kriesi Haus) versuchten, einen Nullenergiebedarf zu erreichen. Im Unterschied zum Passivhaus verfügten sie über einen saisonalen Speicher mit hohem Raumbedarf, um im Sommer über Solarkollektoren aufgewärmtes Wasser im Winter für die Heizung zu nutzen. Stattdessen setzte das Passivhaus aus technischen, vor allem aber auch aus ökonomischen Gründen auf die konsequente Weiterentwicklung passiver Maßnahmen. An der wissenschaftlichen Diskussion zur Realisierung von

„Nullenergiehäuser“ beteiligte sich das Projektteam mit zusätzlichen energiebewahrenden Maßnahmen, insbesondere der Entwicklung und dem Feldeinsatz von dichtschießenden wärmedämmten Schiebeläden, durch die über mehrere Jahre an einem der Reihenhäuser überhaupt keine Heizung mehr erforderlich war. Dieser Entwicklungsstrang wurde aber nicht weiter verfolgt, weil die extrem geringen Verbrauchswerte des Passivhausstandards mit weit geringerem Aufwand erreichbar sind und aus ökologischer und ökonomischer Sicht bereits zielführend sind.

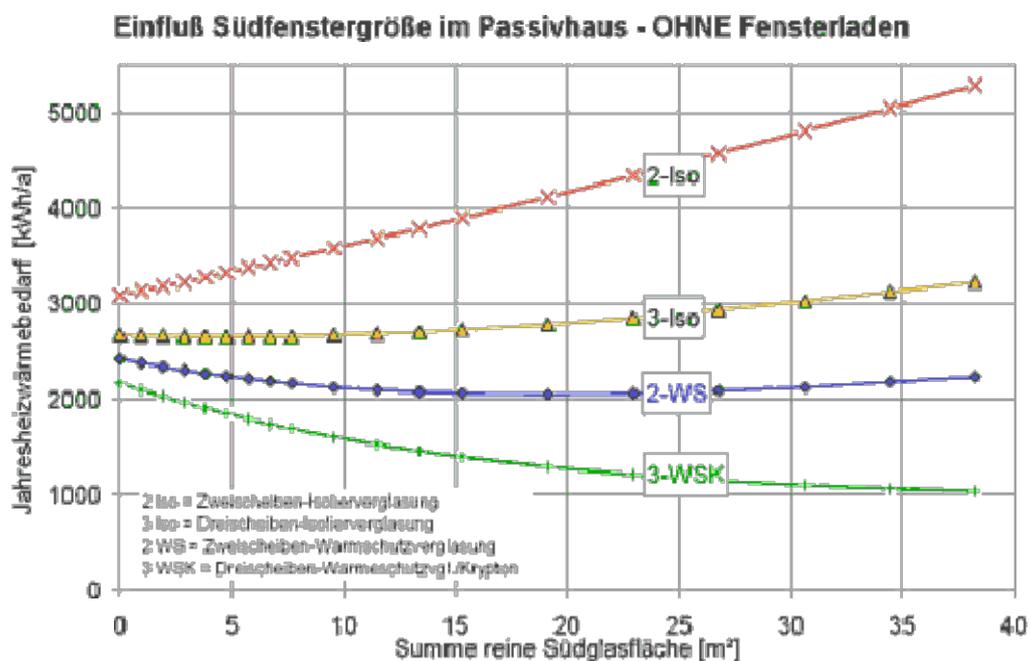


Abbildung 2: Dynamische Gebäudesimulation zur Passivhausentwicklung: Dokumentation der Berechnung der Abhängigkeit des Heizwärmebedarfs von der Größe der verglasten Südfensterfläche in einem Passivhaus bei verschiedenen Verglasungsqualitäten (aus [Feist 1993], hier zitiert nach [Passipedia]). Man erkennt, dass man für günstige Energiebilanzen eine 3-Scheiben-Wärmeschutzverglasung braucht (unterste Kurve). Der Hersteller VEGLA (Aachen) wurde gewonnen, aufgrund der Simulationsergebnisse solche Verglasungen für das erste Passivhausprojekt zu produzieren. Inzwischen sind solche Verglasungen marktgängig und werden sogar bereits mehrheitlich in Deutschland bei Neubauprojekten eingesetzt.

2.3 Baugebiet “experimenteller Wohnbau Darmstadt Kranichstein”

Das erste Passivhaus befindet sich am Westrand des nordöstlichen Stadtteils Kranichstein der Stadt Darmstadt in Südhessen. Das Baugebiet „K7“ wurde Ende der Achtziger Jahre als experimentelles Baugebiet konzipiert. Die Stadt Darmstadt wies eine kurze, südausgerichtete Zeile für das erste Passivhaus-Experiment aus, welche Platz für vier Reihenhäuser bot. Der Abstand zur im Süden davor liegenden, etwa gleich hohen Reihenhausezeile, war groß genug, um – für das damalige Projekt wichtig – mit geringer Verschattung hohe solare Gewinne erzielen zu können. Realisiert wurde hier ein Mehrfamilienhaus mit vier reihenhausartig angeordneten Einheiten.

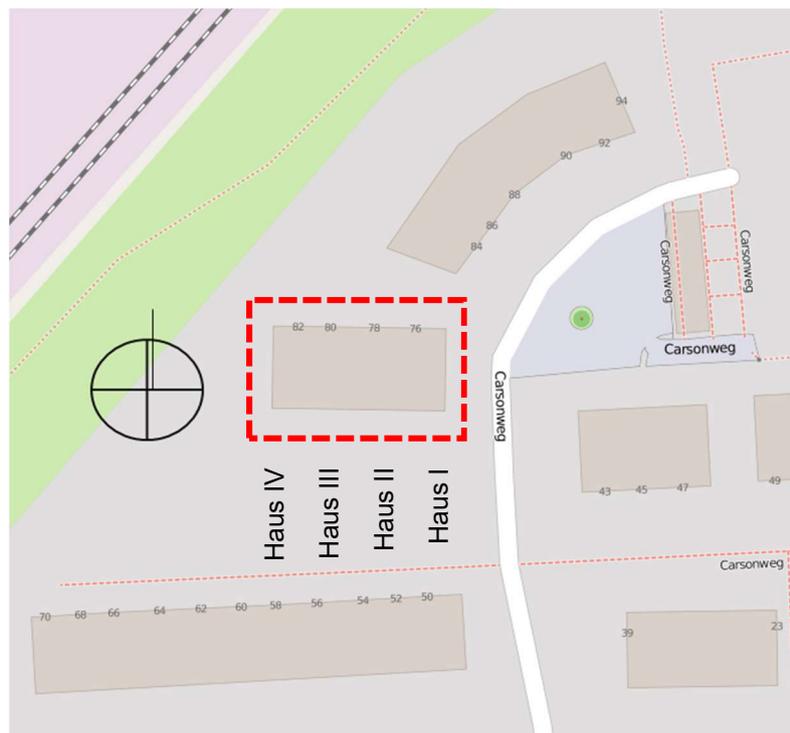


Abbildung 3: Lageplan des Passivhauses Darmstadt-Kranichstein. Das Gebäude ist durch die rote gestrichelte Linie markiert. Die im Bericht verwendeten Nummern der vier Teilgebäude (Haus I bis IV) sind unter dem Gebäude angegeben. (Bild von www.OpenStreetMap.org, Zugriff Juli 2016).



Abbildung 4: Die umgebende Bebauung, insbesondere auf der Südseite, ist von ähnlicher Höhe wie das Passivhaus. Blick aus dem 1. Obergeschoss des Passivhauses.

2.4 Ansichten Passivhaus Kranichstein

Im Folgenden sind einige Außen- und eine Innenansicht der Hauszeile dargestellt.



Abbildung 5: An der Westseite des Passivhaus Darmstadt Kranichstein befindet sich ein kleiner Balkon und die Zugangsleiter zum Dach. Die Wetterstation auf dem Dach ist gut erkennbar. Die Schiebläden in Einheit IV wurden 2015 durch Jalousien ersetzt, zugleich wurde zusätzlich Photovoltaik installiert (Foto: P. Cook)



Abbildung 6: Aufnahme Passivhaus Darmstadt Kranichstein von *Nordosten*; Eingangsbereich und Kellertreppen werden durch einen Glasvorbau geschützt. Hier sind in Höhe der Decke über dem EG die Luftansauggitter der vier individuellen Lüftungsanlagen erkennbar



Abbildung 7: Passivhaus Darmstadt Kranichstein, Ansicht von *Südosten*: In der straßenseitigen Giebelwand gibt es nur ein kleines Ost-Fenster im OG. Gut erkennbar: Der Fortluftauslass und der überdachte zentrale Zugang zum Gemeinschaftskeller.



Abbildung 8: Die Innenaufnahme von einem der Häuser (EG) von Küche und Esszimmer in Richtung Wohnzimmer zeigt einen offenen Grundriss mit großzügiger Südverglasung (Foto: P. Cook).

2.5 Querschnitt Passivhaus Kranichstein

In der Schnittzeichnung des ersten Passivhauses fällt die ringsum geschlossene thermische Hülle mit jeweils guter Wärmedämmung sofort ins Auge (Abbildung 9). Das Kellergeschoss und der im Norden gelegene Glasvorbau sind vom beheizten Gebäudeteil thermisch getrennt. Der je Hauseingang individuelle Zutritt zum Keller durch den Glasvorbau ist Teil des Konzeptes.

Der Querschnitt zeigt auch die schematische Leitungsführung der Lüftungsanlage: Über einen Filterkasten im Glasvorbau wird Außenluft angesaugt, die danach im Erdreichwärmetauscher vorerwärmt wird und nach Durchströmen des Gegenstromwärmetauschers den Wohnräumen im Norden und Süden des Hauses zugeführt wird. Verbrauchte Abluft wird zentral im Haus aus Bädern, WC und Küche abgesaugt und nach der Wärmerückgewinnung nach außen geführt.

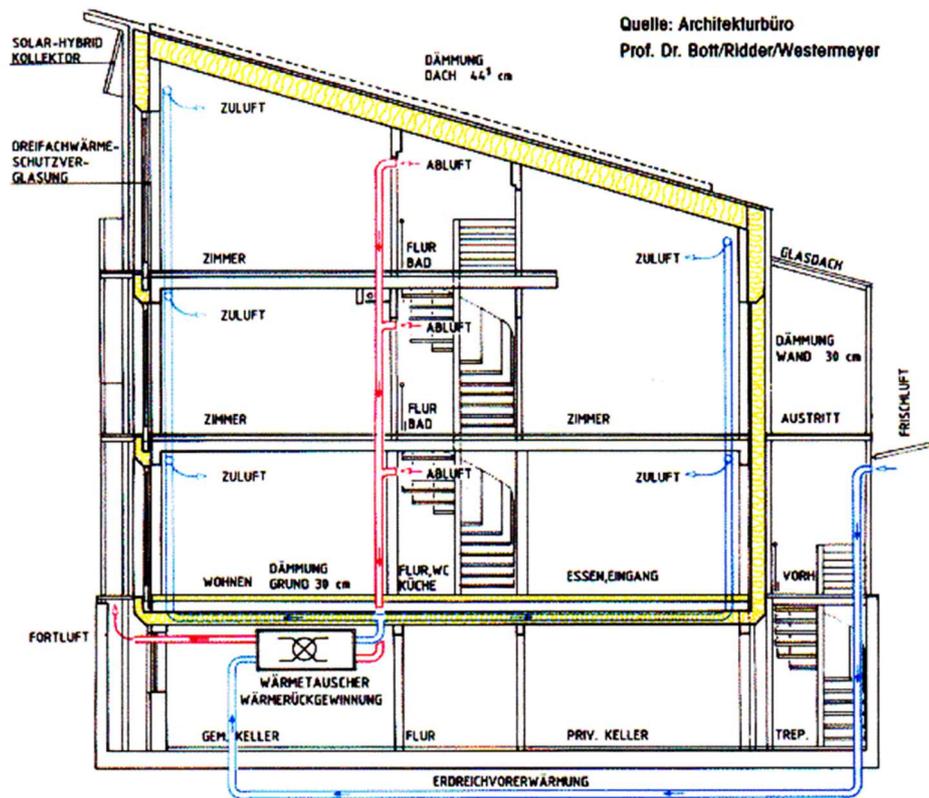


Abbildung 9: Querschnitt durch das Passivhaus Darmstadt Kranichstein. Konsequenterweise: ringsum geschlossene thermische Hülle mit jeweils extrem guter Wärmedämmung, Abtrennung des Kellergeschosses, große Südfenster mit damals erstmalig produzierter Dreifach-Wärmeschutzverglasung Lüftungsanlage: hier mit Erdreichwärmetauscher-Vorerwärmung und Gegenstromwärmetauscher mit hoher Wärmerückgewinnung (WRG).

Im südlichen Bereich des Kellergeschosses liegen gemeinschaftlich genutzte Räume. Das Erdgeschoss der einzelnen Häuser hat durch den zentralen Bereich (Küche, WC und Technikraum) die Möglichkeit der Erschließung mit kurzen Leitungslängen (Zu- und Abwasserleitung, Abluft). Außerdem sind im EG ein Esszimmer (Norden) und das Wohnzimmer (Süden) angeordnet. Im Obergeschoss wird der zentrale Bereich von Treppe und Bad eingenommen, im Norden und Süden befinden sich optional teilbare Räume (z.B. Schlaf- und Kinderzimmer). Im Dachgeschoss ist nur der südliche Teil nutzbar; durch das Pultdach entsteht hier ein großzügiger, sich nach Süden öffnender Raum, der ebenfalls teilbar ist.

2.6 Grundrisse Passivhaus Darmstadt Kranichstein

Die Erdgeschosse haben einen offenen Grundriss, der jedoch individuell weiter unterteilt werden kann (z.B. kann die Küche im Zentrum abgetrennt werden). Im Süden ist jeweils ein großzügiges Wohnzimmer angeordnet, im Zentrum liegt eine Erschließungszone inkl. einer gewendelten Stahlterrasse in die oberen Geschosse. Im Norden befindet sich ein Esszimmer mit unmittelbarem Zugang durch die Hauseingangstür, die aus dem nördlich vorgelagerten zweigeschossigen Glasvorbau Zutritt verschafft.

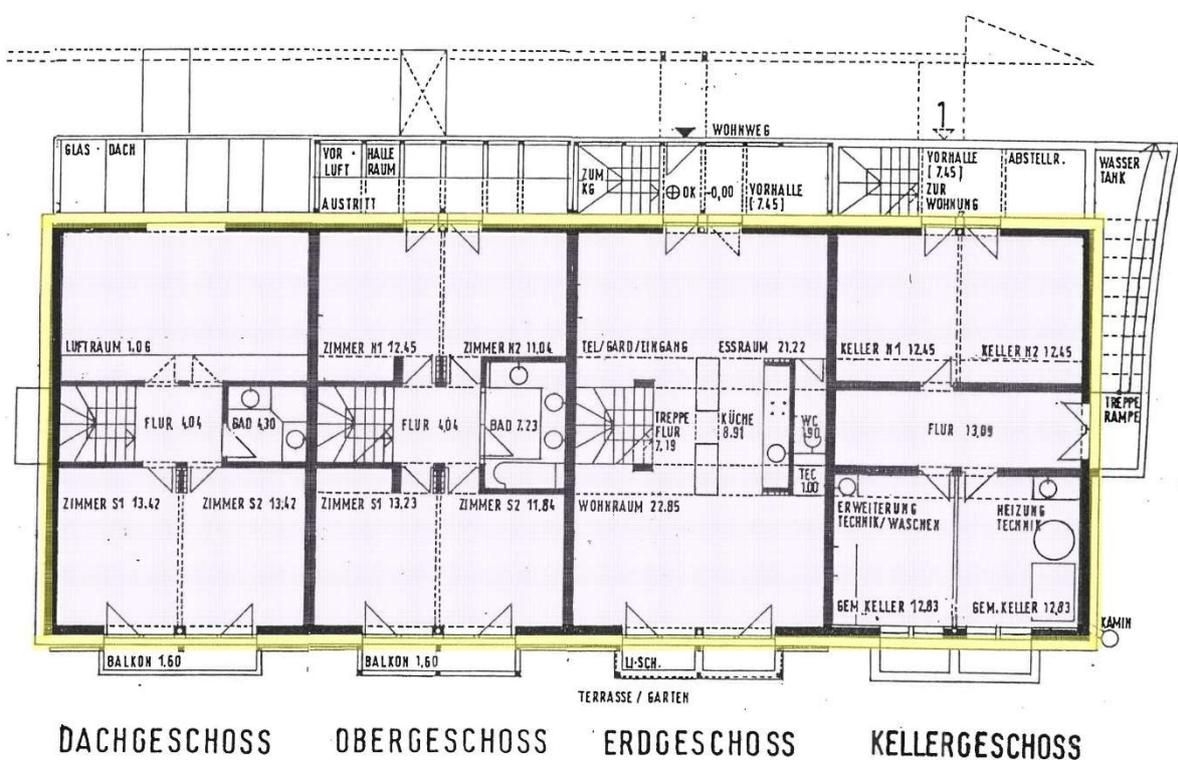


Abbildung 10: Grundrisse des Passivhauses in Darmstadt Kranichstein über alle Etagen (Quelle: Architekten und Stadtplaner Bott/Ridder/Westermeyer).

Die **Obergeschosse** werden von einem an die Treppe anschließenden kleinen Flur erschlossen; im Zentrum befindet sich das Bad, im Norden und Süden jeweils Wohnräume, die entweder als jeweils große Räume belassen oder aufgeteilt werden können (gestrichelte Zwischenwand). Im **Dachgeschoss** ist wegen des nach Norden geneigten Pultdaches nur der Südteil ausreichend hoch für Wohnräume: dort befinden sich ein bis zwei weitere Kinder- bzw. Arbeitszimmer. Im Zentralbereich schließt an den Flur ein Duschbad an; der Raum im Norden ist ein Luftraum, der die Zimmer im darunter liegenden Obergeschoss erhöht.

Rechts in der Darstellung der Grundrisse ist das Kellergeschoss zu sehen, das außerhalb der thermischen Hülle liegt. Es besteht jeweils aus einem privaten Teil im Norden, zusätzlich zugänglich von jeder individuellen Wohneinheit über eine Stahltreppe in der überglasten Vorhalle, und einen Gemeinschaftsteil mit zentralem Erschließungsgang in der Mitte, sowie Gemeinschaftsräume (Heiz/Technikraum, Waschküche, Trockenkeller, Fahrradraum und Abstellraum) im Süden. Der Flur hat einen zusätzlichen gemeinsamen Zugang über die Rampe an der Ostseite. Im Keller befinden sich auch die vier individuellen Lüftungsanlagen.

Das Konzept des Gebäudes und der Aufbau der relevanten Komponenten

- Dämmung und Wärmebrückenvermeidung
- Fenster und Verglasung
- Gebäudedichtheit
- Lüftungsanlage

werden in den folgenden Kapiteln beschrieben. Sie sind Gegenstand der Nachuntersuchungen dieser Studie. Die folgende Abbildung zeigt einen Überblick über die Bauteile.

Bauteil	Beschreibung	Baufoto	U-Wert W/(m ² K)
Dach	Grasdach 50 mm formaldehydfreie Spanplatte, Holzleichtbausträger (Doppel-T- Träger), Konterlattung, fugenlos verklebte Luftdichtung aus PE-Folie, Gipskartonplatte 12,5 mm, Tapete, Dispersionsfarbenanstrich, gesamter Hohlraum (445 mm) mit Mineralwolleeinblasdämmung gefüllt.		0,1
Außenwand	Mineralischer Außenputz, gewebearmiert; 275 mm EPS-Hartschaum- Dämmung (damals: zweilagig, 150+125 mm); 175 mm Kalksandsteinmauerwerk; 15 mm durchgehender Innen- Gipsputz; Raufasertapete, Dispersionsfarbenanstrich		0,14
Kellerdecke	Spachtelung auf Glasfasergewebe; 250 mm Polystyrol -Dämmplatten ; 160 mm Normalbeton; 40 mm Polystyrol-Trittschalldämmung; 50 mm Zement-Estrich; 8-15 mm Stäbchenparkett, geklebt; Versiegelung lösemittelfrei		0,13
Fenster	Dreifachwärmeschutzverglasung mit Kryptonfüllung zwischen den Scheiben U _g -Wert 0,7 W/(m ² K). Holzfensterrahmen mit Rahmendäm- mung aus Polyurethan-Integral- Schaumschalen (CO ₂ -geschäumt, FCKW-frei, einzelhandwerklich gefertigt)		0,7
Wärme- Rück- Gewinnung	Gegenstrom-Luft/Luft- Wärmeübertrager ; Standort im Keller (ca. 9°C im Winter), sorgfältig abgedichtet und wärme- gedämmt, erstmals mit elektronisch kommutierten Gleichstromventila- toren.		Wärme- bereit- stellungs- grad um 80%

Abbildung 11: Konstruktionsmerkmale des Passivhauses Darmstadt Kranichstein. Aus:
[Feist 1997c]

2.7 Wärmeversorgung

Für die Bereitstellung des Wärmebedarfs – Warmwasser und Restheizung – wurden im ersten Passivhaus eine kleine Brennwerttherme (für alle 4 Häuser zusammen) sowie ein Sonnenkollektor installiert. Die thermische Solaranlage besteht aus 24 m² Vakuum-Flachkollektoren und einem (gemeinsamen) 1 m³ Warmwasserspeicher. Weil der Heizlastfall vor allem dann auftritt, wenn der Solareintrag durch die Fenster sehr gering ist, war es nicht nötig, einen Beitrag der Solaranlage zur Raumheizung vorzusehen. Der solare Deckungsgrad für die Warmwasserbereitung betrug je nach Jahr 65 bis über 70 % und trug damit nennenswert dazu bei, dass der Gesamtenergiebedarf des Gebäudes sehr gering war.

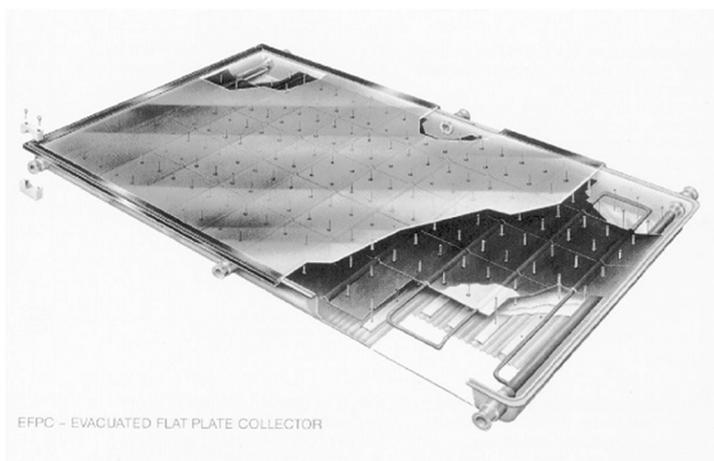


Abbildung 12: Der thermische Flachkollektor wurde auf dem Dach des Passivhauses aufgeständert. Verwendet wurden auf etwa 50 mbar evakuierte Flachkollektoren (bei diesem Unterdruck ist Konvektion im Füllgas (Argon) praktisch unterdrückt; es bleibt der Wärmeverlust durch Wärmeleitung).

Die Solaranlage wurde (vermutlich durch Eisschlag) äußerlich beschädigt und ist seit einigen Jahren außer Betrieb, wodurch der Wärmeverbrauch für die Nachheizung des Warmwassers gestiegen ist. Zusätzlich wurde aufgrund neuer Vorschriften die Temperatur im Zirkulationskreislauf erhöht, was ebenfalls einen etwas höheren Verbrauch bedingt.



Abbildung 13: Aufgeständerte thermische Solarkollektoren auf dem Dach des Gebäudes.

Die übrige Warmwasserbereitung und die Restheizung für die Raumwärme erfolgt über einen zentralen Gasbrennwertkessel für alle vier Wohneinheiten gemeinsam. Dieser versorgt den 1 m³ Trinkwarmwasserspeicher, in den auch die Solaranlage einspeist. Der Brennwertkessel übernimmt, seit dem Defekt der Solaranlage, ganzjährig die Warmwasserbereitung und im Winterbetrieb (ca. Anfang Dezember und je nach Wetterbedingungen bis Mitte Februar oder Mitte März) die Raumbeheizung.

2.8 Elektroeffizienz und Stromversorgung

Ziel des Passivhauses war es, insgesamt einen sehr geringen Energieverbrauch zu realisieren. Daher wurde für das Passivhaus Kranichstein ein konsequentes Stromsparkonzept entwickelt [Ebel/Feist 1997]:

- Ausschließlicher Einsatz der energiesparendsten Elektrogeräte, die am Markt erhältlich waren
- Ausschließlicher Einsatz von Energiesparlampen
- Minimierung der Hilfsenergie (Pumpen)
- Geringer zusätzlicher Strombedarf bei der Lüftung durch entsprechende Planung und Umbau der Wärmerückgewinnungsgeräte. Ausstattung mit den damals innovativen EC Ventilatoren.



Außerdem wurden Gasherde eingesetzt und Wasch- sowie Spülmaschinen an die zentrale Warmwasserbereitung angeschlossen. Dabei ging es vor allem um die Primärenergieeinsparung; durch die zwischenzeitliche Veränderungen in der Energieversorgungsstruktur wäre das in dieser Form heute nicht mehr erforderlich (vgl. [Grove-Smith et al. 2016]).

Abbildung 14: Stromsparprojekt Passivhaus Kranichstein: energiesparende Geräte und Leuchtmittel

Im Ergebnis war der elektrische Energiebedarf bei gut einem Drittel des sonst üblichen Verbrauchs. Dies ist besonders zu werten im Hinblick auf den Heizenergiebedarf: Die Abwärme aus den elektrischen Energieanwendungen ist ein wesentlicher Energieeintrag, der zur Beheizung beiträgt (aber auch zur Sommerlast). Bei der Auswertung in einem intensiv dokumentierten Messzeitraum wurde der Beitrag der inneren Quellen mit 1 W/m^2 ermittelt. Das stellt einen sehr niedriger Wert dar [AkkP 5]. Trotzdem blieb der verbleibende Heizenergiebedarf gering. Der vorausberechnete Bedarf für den gesamten Endenergieverbrauch (Heizung + Warmwasser + Strom einschl. Lüftungsanlage) konnte so weit reduziert werden, dass er den sonst üblichen Haushaltstromverbrauch ($32 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$) nicht überstieg [Feist 1988b] und [Feist 1995].

Im Jahr 2015 wurde auf dem westlichen Endhaus eine $4,1 \text{ kW}_P$ Photovoltaikanlage nachgerüstet, die seit Anfang 2016 in Betrieb ist. Auf Basis des Standortklimas kann im Mittel mit einer Stromproduktion von ca. 3.100 kWh/a gerechnet werden.



Abbildung 15: Installation der PV-Anlage 2015

2.9 Energiebilanz mit dem PHPP

Eine präzise Energiebilanzrechnung zur ökonomisch optimierten Auslegung des Wärmeschutzes ist die Grundlage für den Projekterfolg jedes Passivhauses.

Zum Zeitpunkt des Baus des Passivhauses Darmstadt Kranichstein gab es noch kein Passivhaus Projektierungspaket (PHPP). Alle Analysen und Berechnungen wurden mit einem detaillierten dynamischen Simulationsprogramm DYNBIL [Feist 1994b] in zeitintensiver Expertenarbeit durchgeführt. Erst später stellte sich durch Auswertung der Messergebnisse heraus, dass auch für Häuser dieser Qualitätsklasse eine Berechnung mit speziell angepassten, vereinfachten Bilanzprogrammen möglich ist. Die Entwicklung des Passivhaus Projektierungspakets wurde im Rahmen des Europäischen „CEPHEUS“ Projekts 1998 begonnen [CEPHEUS 2001] und im ersten Arbeitskreis der 2. Phase des „Arbeitskreises kostengünstige Passivhäuser“ vorgestellt [AkkP 13].

Solche Planungswerkzeuge, die durch entsprechend weitergebildete Architekten und Ingenieure einfach selbst angewendet werden können, sind eine wesentliche Voraussetzung für die breite Anwendung des Passivhaus-Standards. Das PHPP wurde bereits in 21 Fremdsprachen übersetzt und ist weltweit bei einer wachsenden Nutzerzahl in Gebrauch. Das PHPP liegt nunmehr in Version 9.6 vor. Zudem sind heute dreidimensional basierte, modellorientierte Eingabehilfen verfügbar, die neben den Berechnungen der Energiebilanz auch wichtige Visualisierungsfunktionen erfüllen können [designPH]. Durch detaillierte Abbildung der Topographie und Nachbarbebauung können hier Verschattungsberechnungen besonders exakt und komfortabel angestellt werden.

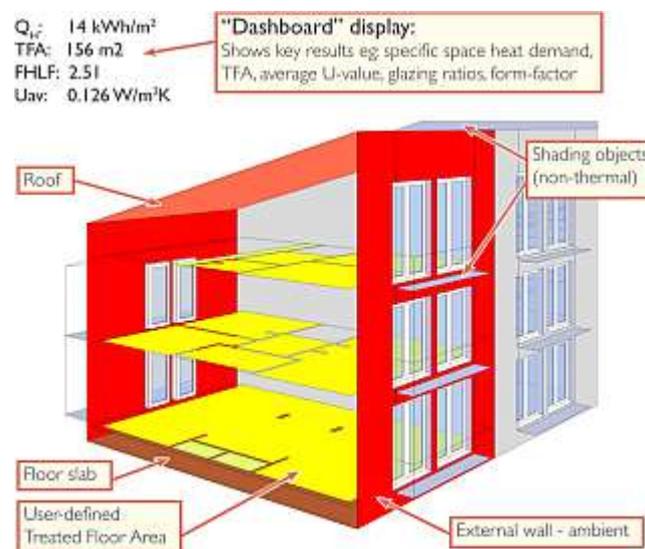


Abbildung 16: Das Passivhaus Darmstadt-Kranichstein im 3-D Modell von designPH

Im Folgenden werden Eingaben und Ergebnisse für das Endhaus dokumentiert (Klima Frankfurt a.M., PHPP 9). Der Heizwärmebedarf des Endhauses von 12 kWh/(m²a) liegt aufgrund der höheren Gebäudeaußenflächen etwas über dem Mittelwert für das ganze Gebäude.

Passivhaus-Nachweis



Objekt: Passivhaus-Endhaus Kranichstein
 Straße: Carsonweg 82
 PLZ/Ort: 64289 Darmstadt
 Provinz/Land: Hessen DE-Deutschland
 Objekt-Typ: Reihenendhaus
 Klimadatensatz: DE0031a-Frankfurt am Main
 Klimazone: 3: Kühl-gemäßigt Standorthöhe: 140 m

Bauherrschaft: Bauherrengemeinschaft Passivhaus
 Straße: Carsonweg 82
 PLZ/Ort: 64289 Darmstadt
 Provinz/Land: Hessen DE-Deutschland

Haustechnik: oeb Dipl.-Ing. Norbert Stärz
 Straße: Bahnhofstr. 49
 PLZ/Ort: 64319 Pfungstadt
 Provinz/Land: Hessen DE-Deutschland

Zertifizierung: Passivhaus Institut Darmstadt
 Straße: Rheinstr. 44/46
 PLZ/Ort: 64283 Darmstadt
 Provinz/Land: Hessen DE-Deutschland

Architektur: Prof. Bott/Ridder/Westermeyer
 Straße: Jahnstr. 8
 PLZ/Ort: 64283 Darmstadt
 Provinz/Land: Hessen DE-Deutschland

Energieberatung: Passivhaus Institut Darmstadt
 Straße: Rheinstr. 44/46
 PLZ/Ort: 64283 Darmstadt
 Provinz/Land: Hessen DE-Deutschland

Baujahr: 1991
 Zahl WE: 1
 Personenzahl: 2,9

Innentemperatur Winter [°C]: 20,0
 Innere Wärmequellen (MWG) Heizfall [W/m²]: 2,4
 spez. Kapazität [Wh/K pro m² EBF]: 204

Innentemp. Sommer [°C]: 25,0
 MWG Kühlfall [W/m²]: 2,4
 Mechanische Kühlung: x

Gebäudekennwerte mit Bezug auf Energiebezugsfläche und Jahr

	Energiebezugsfläche m²	Wert	≤	alternative Kriterien		Erfüllt? ²
				Kriterien	Kriterien	
Heizen	Heizwärmebedarf kWh/(m²a)	12	≤	15	-	ja
	Heizlast W/m²	11	≤	-	10	
Kühlen	Kühl- + Entfeuchtungsbedarf kWh/(m²a)	0,5	≤	15	15	ja
	Kühllast W/m²	9	≤	-	10	
	Häufigkeit überhörter Feuchte (> 12 g/kg) %	0,0	≤	10		
Luftdichtheit	Drucktest-Luftwechsel n ₅₀ 1/h	0,2	≤	0,6		ja
Erneuerbare Primärenergie (PER)	PER-Bedarf kWh/(m²a)	36	≤	45	36	ja
	Erzeugung erneuerb. Energie (Bezug auf überbaute Fläche) kWh/(m²a)	43	≥	60	43	

² leeres Feld: Daten fehlen; -: keine Anforderung

Abbildung 17: PHPP-Berechnung (Nachweis Blatt) des Endhauses Passivhaus Darmstadt Kranichstein (Version PHPP v9.6a)

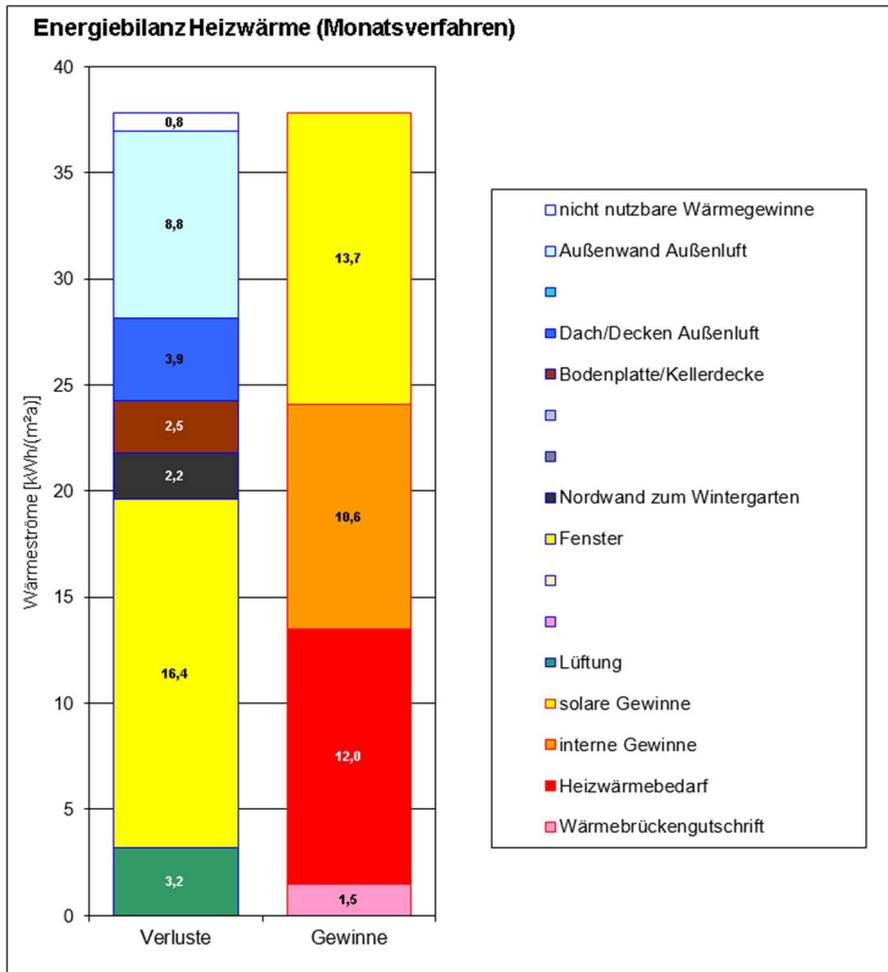


Abbildung 18: Die mit dem PHPP berechnete Heizwärmebilanz des Endhauses Passivhaus Darmstadt Kranichstein (rot: Der Heizwärmebedarf). Bei den Verlusten tragen die Fenster fast die Hälfte bei, die Außenwände etwa ein Viertel. Fast die Hälfte der Verluste wird wieder durch Solargewinne der Fenster passiv gedeckt (rechts, gelb). Innere Wärmequellen (orange) tragen etwa ein Viertel bei, die Heizung muss nur das verbleibende Viertel von etwas mehr als 12 kWh/(m²a) decken.

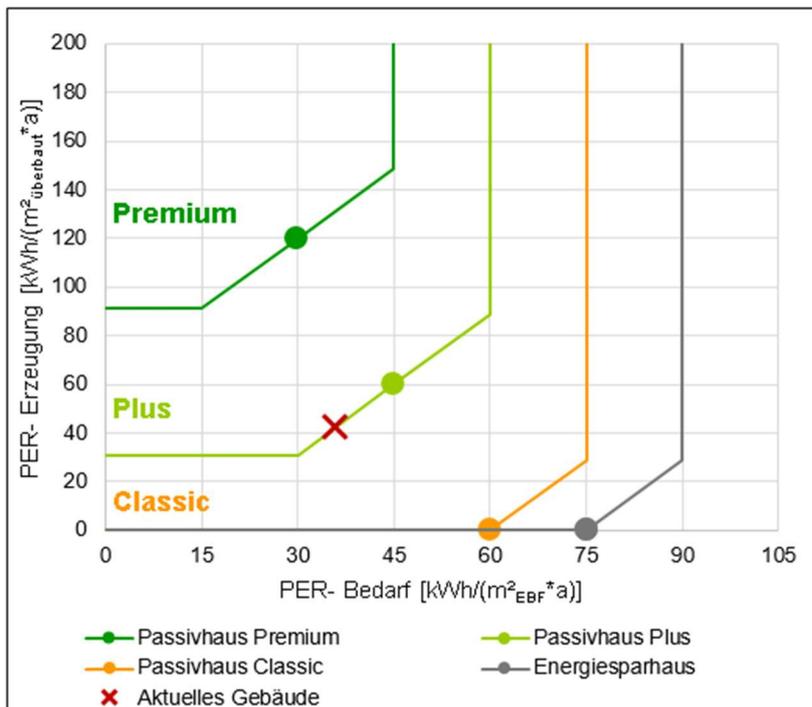


Abbildung 19: Der Bedarf an Primärenergie Erneuerbar / PER des Passivhauses Darmstadt-Kranichstein. Durch die nachträglich installierte PV-Anlage wird die Klasse „plus“ erreicht.

Das Passivhaus Darmstadt-Kranichstein erreicht in seinem aktuellen Zustand mit der neuen Photovoltaikanlage die Klasse **Passivhaus Plus**. Das Gebäude hat in etwa eine „ausgeglichene“ Energiebilanz: In der - freilich irreführenden - „bilanziellen Betrachtung“ über das ganze Jahr ist die Summe der erzeugten Energie ungefähr gleich der Summe der benötigten Energie.

Erzeugung und Bedarf bleiben aber in der PHPP-Betrachtung und Bewertung strikt getrennt: Strom, der beispielsweise durch eine Photovoltaikanlage auf dem Dach des Hauses erzeugt wird, ist Primärstrom mit einem PER-Faktor von 1,0. Er wird in das Stromnetz eingespeist und nicht mit dem Energiebedarf des Gebäudes verrechnet. Die Bedarfsrechnung geschieht über das PER-Modell [Grove-Smith et al. 2016]. Eine direkte Anrechnung von beispielsweise im Sommer erzeugtem Photovoltaikstrom auf die im Winter benötigte Heizenergie wäre nicht korrekt, da die im Sommer erzeugte Energie nur mit zusätzlichen Verlusten über eine Langzeitspeicherung in den Winter transportiert werden kann. Die Planung von Gebäuden führt zu Fehloptimierungen, wenn dies nicht berücksichtigt wird. Das PER-System zur erneuerbaren Primärenergie hingegen liefert die Möglichkeit zur Optimierung eines zukunftsfähigen Gebäudes.

2.10 Kosten und Wirtschaftlichkeit

Das Passivhaus Darmstadt Kranichstein wurde im Jahr des Baubooms nach der Wiedervereinigung (1991) gebaut. Die Zinsen waren damals sehr hoch, die Baukosten stiegen allgemein wegen der Folgen der deutschen Wiedervereinigung sprunghaft an.

Die Mehrkosten für das erste Passivhaus lagen bei insgesamt 21% der Gesamtkosten. Die baulichen Mehrinvestitionen (ohne den Sonnenkollektor) für die Energieeffizienzmaßnahmen betragen 292 €/m² oder 17% der Baukosten; einschließlich der Mehrkosten für Planung und Bauleitung waren es 319 €/m² [Feist 1994a]. Diese Mehrinvestitionen waren vor allem auf die innovativen Baukomponenten, die zu bedeutenden Teilen in Einzelfertigung hergestellt werden mussten, zurückzuführen. Die Kosten für die eingesparte kWh wurden in der o.a. Studie für dieses Pilotprojekt mit 18 €ct/kWh berechnet. Für die Bauherren wurde der Mehraufwand durch die 50%ige Förderung der Mehrinvestitionen überschaubar, allerdings war die Investition vor allem wegen niedriger Energiepreise (2,5 – 3 ct/kWh), hoher Zinsen (4,2 % p.a. real) und vorsichtiger Annahmen bzgl. der Nutzungsdauer (30 Jahre für die Hülle / 15 Jahre für die Lüftungsanlage) noch nicht wirtschaftlich. Aus heutiger Sicht kann die Ökonomie neu beurteilt werden: Aufgrund der durchschnittlich weit höheren Energiepreise als zum Zeitpunkt des Baus und der Sicherheit bzgl. der langen Lebensdauer der Komponenten ergeben sich bereits weit bessere Ergebnisse. Entscheidender ist aber, dass in den vergangenen 25 Jahren durch Weiterentwicklung der Methoden und Produkte,

größere Stückzahlen und Vereinfachungen bei Reihenhäusern die Mehrinvestitionen auf nun weniger als 6% der durchschnittlichen Baukosten nicht verbesserter Gebäude reduziert wurden.

2.11 Messdatenerfassung

Im Passivhaus Darmstadt Kranichstein wurde eine umfassende kontinuierliche Messdatenerfassung durchgeführt (siehe [AkkP 6]). Bei dem vom Hessischen Wirtschafts- bzw. Umweltministerium und der Wüstenrot Stiftung finanzierten Messprogramm wurden über 200 Messgrößen über mehrere Jahre erfasst, u.a.:

- Klima (Außenlufttemperatur und -feuchte, Windgeschwindigkeit und -richtung, Solarstrahlung)
- Raumlufftemperaturen (in allen Häusern, allen Räumen)
- Raumlufffeuchten (Haus IV, alle Räume)
- Heizkörpertemperaturen (Haus IV, alle Räume)
- Wandtemperaturquerschnitt, Wärmeflussmessung Wand
- Dachtemperaturquerschnitt, Wärmeflussmessung Dach
- Oberflächentemperaturen der Fenster
- Status der Dämmschiebeläden
- Luftvolumenströme der Lüftungsanlage (sowie Temperatur und Feuchte)
- Volumenströme Kaltwasser, Regenwasser und Warmwasser und Temperaturen
- Wärmemengenzähler für Heizung, Warmwasser, Zirkulation und Sonnenkollektor

In zeitlich begrenzten Messaktionen wurden darüber hinaus ermittelt:

- Mit Thermographie: evtl. Inhomogenitäten der Wärmedämmung
- Mit Drucktests: Dichtheit der Gebäudehülle
- Mit Tracergasmessungen: Luftwechselzahl, Effizienz der Lüftung

2.12 Messergebnisse

Für die langjährigen Messungen wurden Wärmemengenzähler für Heizung und Warmwasser sowie der Gaszähler für das Gasbrennwertgerät ausgewertet. Der Heizenergie-Verbrauchswert für das Gebäude ist (abgesehen von wetterbedingten Schwankungen) langfristig sehr stabil, einzig im ersten Jahr lag ein höherer Verbrauch vor – dieser war bedingt durch den Einzug im Oktober (über lange Zeiträume offen stehende Türen), die noch nicht fertiggestellte Dämmung der Kellerdecke und die noch nicht wärmegeprägten Fensterrahmen; die Arbeiten an der Hülle wurden dann im Frühjahr 1992 fertiggestellt. Eine gewisse Austrocknung des Massivbaus kann ebenfalls zu am Anfang leicht erhöhten Heizwärmeverbrauchswerten beigetragen haben. Der Nutzungsgrad des Gasbrennwertgerätes liegt in den meisten Jahren nur wenig unter 100% (Wärmeabgabe bezogen auf H_u Erdgas).

Bereits im ersten Jahr waren die Verbräuche sensationell gering - sowohl Heizung als auch Warmwasser und Haushaltsstrom (einschließlich des zusätzlichen Stroms für die Lüftung) [Feist/Werner 1993]. Dabei war das Haus in der ersten Heizperiode noch gar nicht ganz fertig, vor allem fehlte die Wärmedämmung der Fensterrahmen. Diese wurde erst im folgenden Frühjahr ausgeführt – dies ist heute kein Thema mehr, denn Passivhaus zertifizierte Fenster gibt es inzwischen in großer Vielzahl und allen Bauarten. Danach sank der Heizenergieverbrauch noch einmal um fast die Hälfte - auf weniger als ein Zwanzigstel des damals üblichen Durchschnittsverbrauchs.

Tabelle 2: Messergebnisse der ersten beiden Messjahre (aus [Feist/ Werner 1994]).

Energiekennwert (Endenergie) kWh/(m ² a) (Wohnfläche)	Energie- träger	Passivhaus Messung 91/92	Passivhaus Messung 92/93	Passivhaus Projektierung
Haushaltsstrom	STROM	6,27	6,17	4,80
Lüftung (Strom)		2,65	2,93	3,80
Gemeinschaftsstrom		2,85	2,10	1,11
Kochgas	ERDGAS	2,43	2,60	2,89
Warmwasser		8,28	6,12	7,10
Heizung		20,81	11,91	11,35
Gesamt		43,29	31,83	31,05

In der Summe betrug der gemessene Gesamtenergiekennwert (Haushaltsstrom, Gemeinschaftsstrom, Kochgas, Lüftung, Warmwasser und Heizung) im Passivhaus im Messzyklus ab dem zweiten Jahr weniger als 32 kWh/(m²a). Wie in der Zielsetzung angestrebt, ist der gesamte Energieverbrauch im Passivhaus damit **niedriger** als allein nur der Haushaltsstromverbrauch in durchschnittlichen deutschen Gebäuden. Damit

ist der Gesamtenergiekennwert des Passivhauses Kranichstein um ca. 85 % geringer als in vergleichbaren bestehenden Einfamilienhäusern.

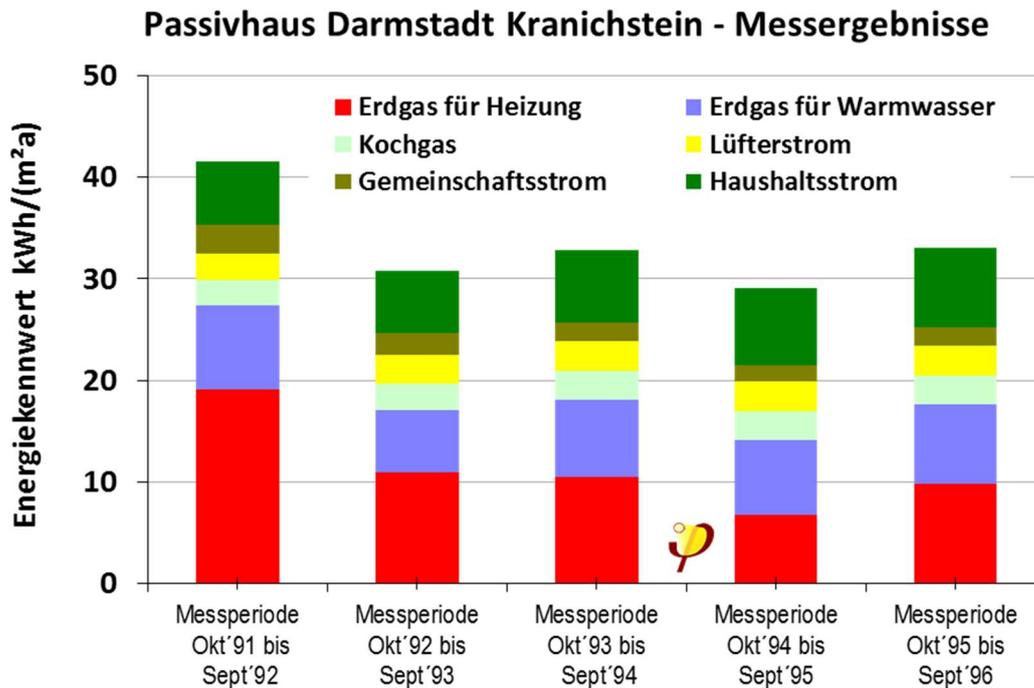


Abbildung 20: Gesamtenergieverbrauch im Passivhaus Kranichstein während der ersten 5 Jahre. Insbesondere aufgrund der im ersten Jahr noch nicht gedämmten Fensterrahmen ist der Verbrauch zunächst etwas erhöht (nach [PHT 1996]).

Für die Frage der zu installierenden Haustechnik ist die Heizlast eine wesentliche Kenngröße. Das Passivhaus hat eine lange Zeitkonstante, daher reicht es aus, die täglichen Heizlasten zu ermitteln. Die folgende Abbildung 21 zeigt die gemessenen tagesdurchschnittlichen Heizlasten der vier Wohnungen bezogen auf die Wohnfläche. Ab dem zweiten Jahr reduzierte sich der Wärmebedarf durch die Rahmendämmung weiter; auch im dritten bis fünften Messjahr lag die gemessene maximale Heizlast immer unter $7,2 \text{ Watt/m}^2$. Dies sind extrem geringe Heizleistungen: Zum Beispiel ergibt sich damit für das Wohnzimmer mit 22 m^2 Wohnfläche eine Spitzenleistung von etwa 150 Watt. Das Zimmer wäre daher bequem mit zwei gewöhnlichen Glühlampen "beheizbar".

Ein wesentliches Ziel des umfangreichen Messprogramms war der Vergleich mit der dynamischen Simulation. Hierzu wurden Sensoren an den Oberflächen sowie an verschiedenen Stellen der Bauteilaufbauten platziert und die Temperaturverläufe gemessen. Parallel dazu wurden unter den gleichen Randbedingungen die Temperaturverläufe simuliert. Ein Beispiel dieser Vergleichsmessungen ist in Abbildung 22

dargestellt. Auf diese Weise konnten die Modellansätze überprüft und verfeinert [Feist 1994b], [AkkP 5], sowie die methodischen Werkzeuge für die Passivhausplanung (PHPP) entwickelt werden.

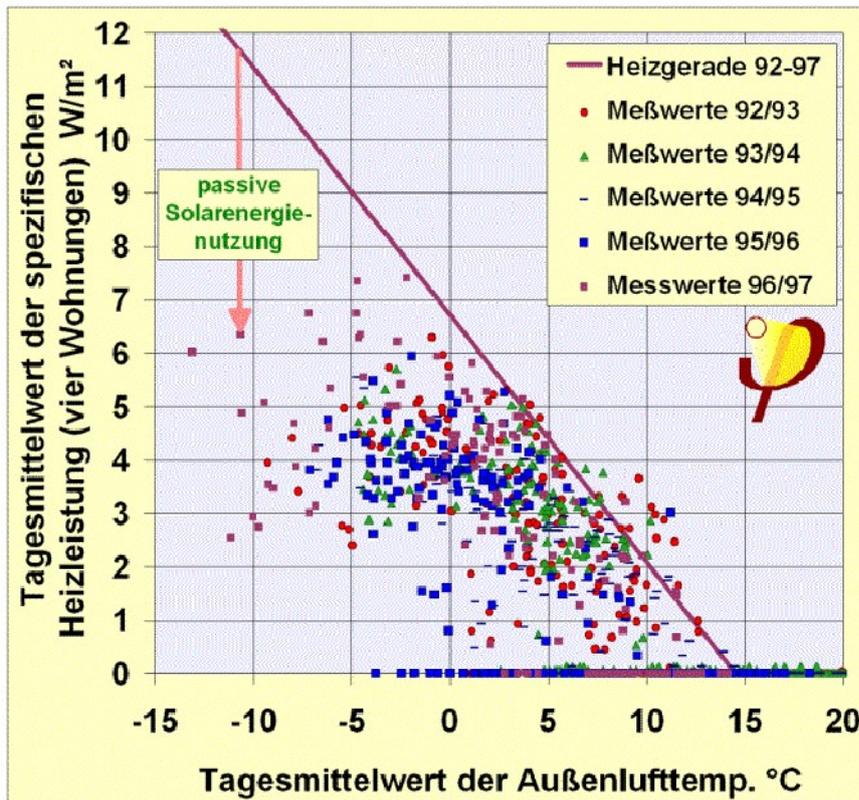


Abbildung 21: Tägliche spezifische Heizleistung, gemessen über 5 Heizperioden im Passivhaus (Mittelwert über alle 4 Wohnungen, jede hat 156 m² Wohnfläche) (aus [Feist 2005]).

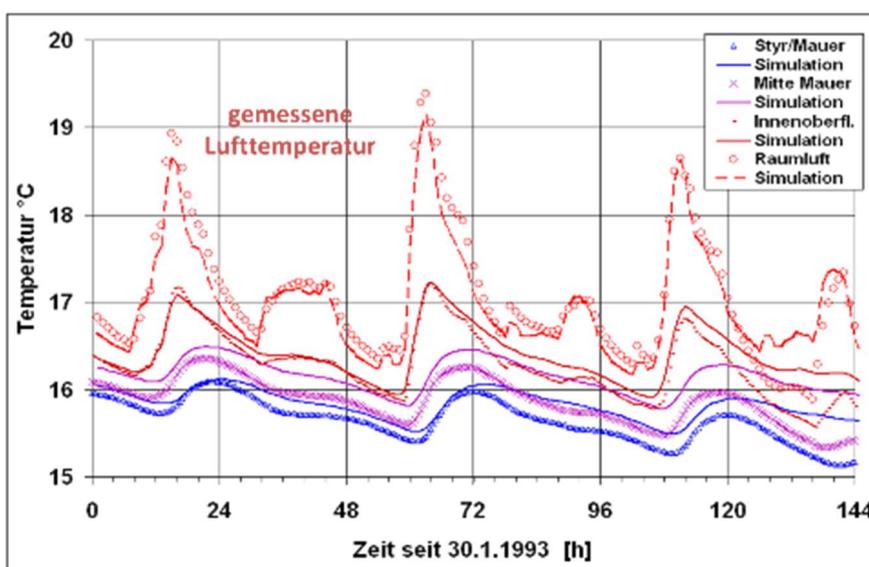


Abbildung 22: Beispielhafter Vergleich der Temperaturverläufe (Wandaufbau, Oberfläche, Raumluft) von Messung und Simulation (aus [AKKP 10])

An den niedrigen Verbräuchen hat sich auch nach 25 Jahren nichts geändert. Im Durchschnitt liegt der Heizenergieverbrauch bei $8,4 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ (bezogen auf die beheizte Wohnfläche). Die gemessenen Verbrauchswerte schwanken vor allem entsprechend der unterschiedlichen Wetterbedingungen von Jahr zu Jahr. Die Standardabweichung beträgt $1,8 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ oder 21% des Durchschnittsverbrauchs von $8,4 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$.

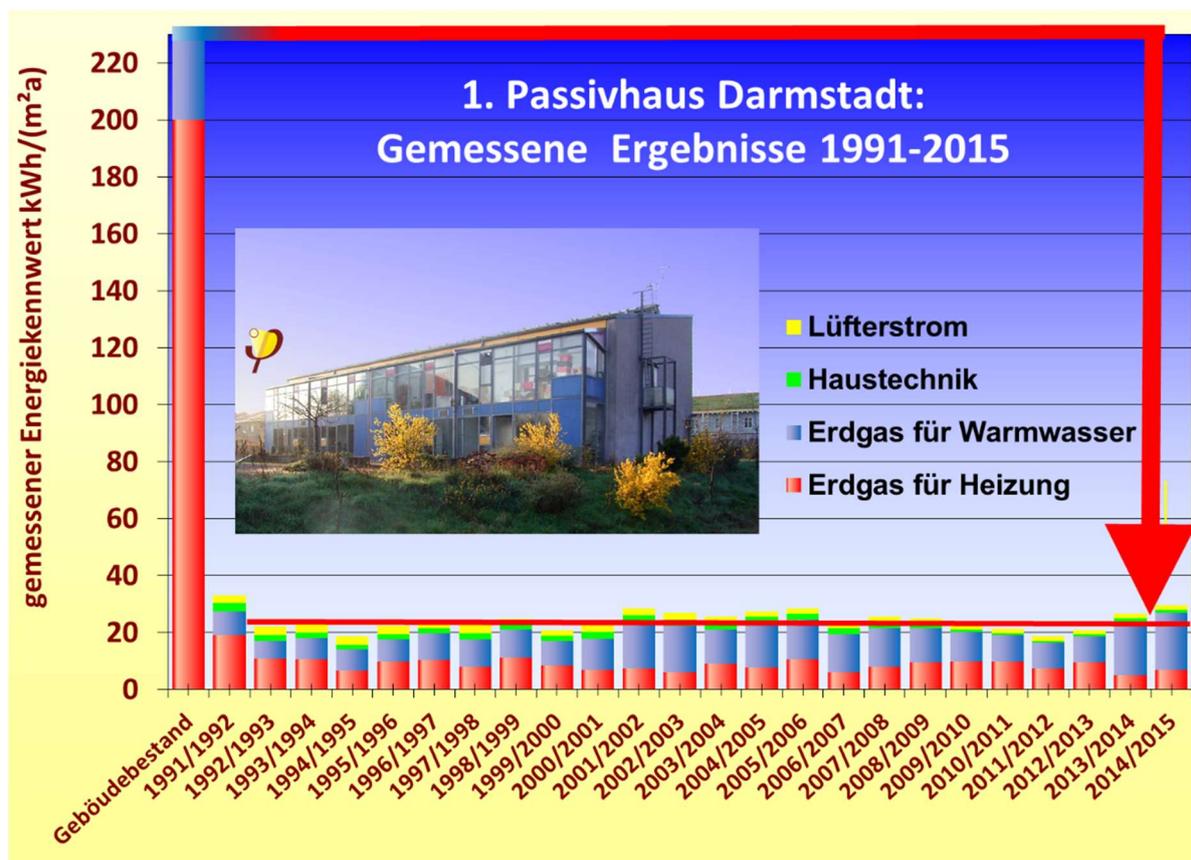


Abbildung 23: Passivhaus Darmstadt: langjährige Verbrauchswerte für Heizung, Warmwasser und Haustechnik als Ganzjahreswerte (Oktober bis September des Folgejahres). Die Heizenergie-Einsparung gegenüber dem damaligen Bestand betrug 96%.

Der Heizwärmeverbrauch (hier wurde bereits der Endenergieverbrauch als Heizwert (H_u) des Erdgases ausgewiesen) ist die entscheidende Kenngröße für die thermische Qualität des Gebäudes. Der langjährige Mittelwert für den Heizenergieverbrauch liegt mit $8,4 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ geringfügig unter dem mit dem PHPP berechneten Heizwärmebedarf von $9,2 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$. Die Abweichung ist gering und liegt innerhalb der messtechnisch zu erwartenden Fehlertoleranzen [Schnieders 2012]. Der Heizenergieverbrauch entspricht der Planung, wie sie mit dem PHPP durchgeführt worden wäre,

zuverlässig und ohne „performance gap“. Die ursprünglich eingebaute Brennwerttherme, damals die kleinste am Markt verfügbare, bedient seither mit max. 12 kW den kompletten Wärmebedarf (Heizung und Warmwasser) der 4 Häuser mit insgesamt 624 m² Wohnfläche.

Der Stromverbrauch für die **Lüftungsanlage** lag in den ersten Jahren bei 2,9 kWh/(m²a). Sie verfügte über eine Regelung, die automatisch die Luftmengen nach CO₂ und Feuchte steuert. Dieses Regelungssystem war aber nicht geeignet, zusätzlich zur Wärmerückgewinnung wesentlich Wärme einzusparen. Nachdem die automatische Regelung außer Betrieb genommen wurde, sank der Stromverbrauch für die Lüftung auf etwa die Hälfte.

Der Wärmebedarf für das **Warmwasser** wurde ursprünglich zu einem nennenswerten Teil (> 60%) durch den thermischen Sonnenkollektor gedeckt – je nach Jahr lag der auf das Warmwasser entfallende Erdgasverbrauch zwischen 6 und 10 kWh/(m²a) im Durchschnitt über alle vier Häuser. Der Vakuum-Flachkollektor, ein aktivsolarer System im Passivhaus musste wegen eines Schadens durch (vermutlich) Eisschlag nach 10 Jahren außer Betrieb genommen werden. Der Endenergieverbrauch für das Warmwasser beträgt seither zwischen 12 und 20 kWh/(m²a), je nach Intensität der Nutzung sowie der Temperatur in Speicher und Zirkulationsleitung. Die Verteilverluste dieses zentralen Systems sind - trotz optimierter Leitungsführung und nennenswertem Zusatzaufwand für die Dämmung von Leitungen und Speicher – noch relevant.



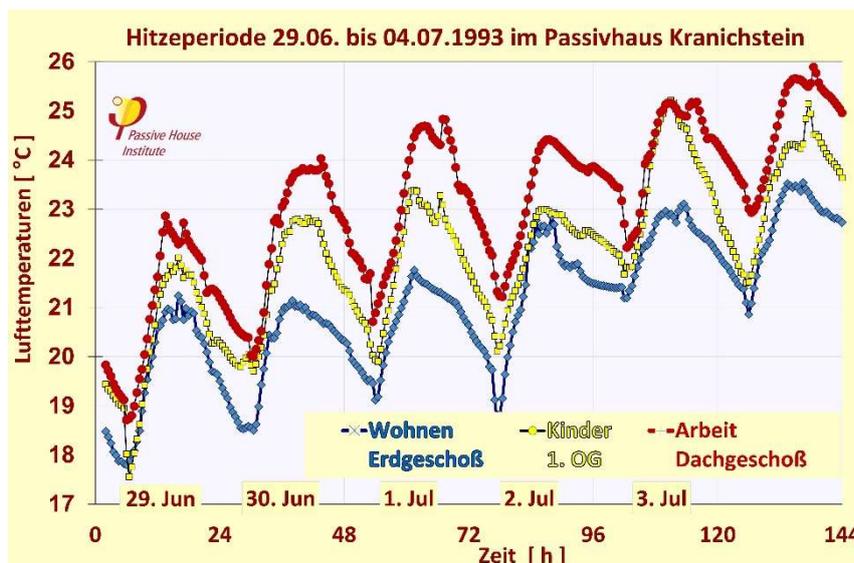
In einer Wohneinheit (Endhaus) wurden 1994 wärmegeprägten und luftdichten Schiebeläden angebracht – durch das Schließen nachts im Kernwinter sank der Heizenergieverbrauch trotz extrem geringer innerer Wärmequellen danach auf Null, die Heizung konnte abgestellt werden.

Abbildung 24: Installation der wärmegeprägten Schiebeläden im westlichen Endhaus der Zeile. Die Schiebeläden wurden von K.-H. Fingerling konzipiert (vgl. [Feist 1995b]).

Mit diesem Experiment wurde gezeigt, dass es mit rein passiven Maßnahmen möglich ist, die Heizung komplett außer Betrieb zu nehmen – und das bei sehr geringem sonstigen Energieverbrauch entsprechend sehr niedrigen inneren Quellen. Wissenschaftlich interessant waren - im damit ersten Nullheizenergiehaus - auch die Behaglichkeitsuntersuchungen gemäß [Fanger 1970]. Die Auswertung [Kirtschig 1998] zeigte, dass ein hoher thermischer Komfort auch ohne jegliche aktive Energiezufuhr, und ohne ein besonderes Nutzerverhalten möglich ist. Der Betrieb der Läden erwies sich allerdings in späteren Jahren als zu wartungsaufwändig, da ein dichtes Schließen, Voraussetzung für einen wirklich guten zusätzlichen Wärmedämm-Effekt – nur bei sorgfältiger Justierung und permanenter Reinigung der Dichtbänder zu gewährleisten ist. Durch die Sonneneinstrahlung verzogen sich die mit Aluminiumblech beschichteten Dämmplatten; auf der Südseite wurden die Läden 2015 im Zuge der Installation einer PV-Anlage durch Jalousien ersetzt. Als ökonomisch tragfähige Alternative hat sich stattdessen die weitere Verbesserung der Fenster etabliert [AkkP 14]. Dies wird unterstützt durch die Einführung der Passivhaus-Effizienzklassen, Passivhauskomponentenwettbewerbe [Component Award 2014] und die Verfügbarkeit zuverlässiger Informationen zu den Kennwerten [Komponenten 2016].

Spannend wurde es in den extrem kalten Wintern 1995/1996 und 1996/1997: Während andernorts Heizungen einfroren, hatten es die Bewohner des Passivhauses mollig warm und verbrauchten trotzdem fast nichts [Feist 1997b].

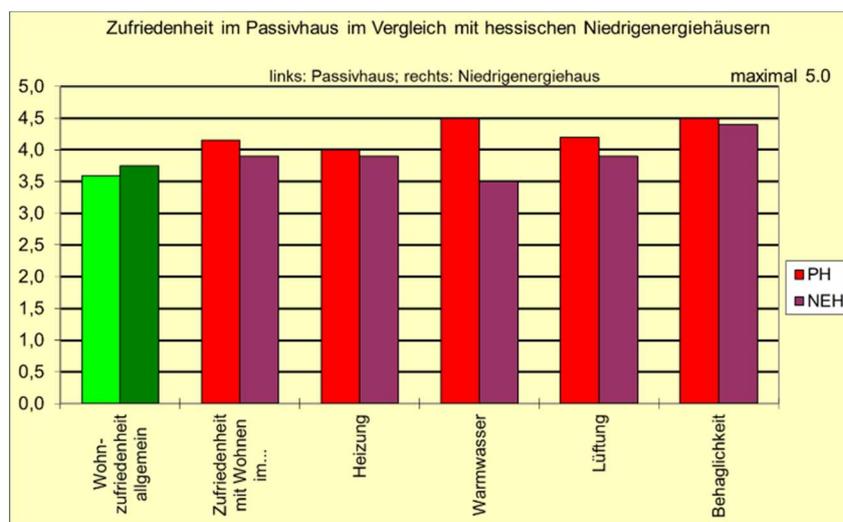
Der Komfort interessiert nicht nur im Winter, sondern auch im Sommer: Gute Dämmung, Sonnenschutz und niedrige innere Wärmequellen (Elektroeffizienz) machen das Passivhaus auch im Sommer sehr angenehm im Vergleich zu anderen Gebäuden. Die massive Bauweise erleichtert dies zusätzlich. Der Einfluss der Lüftungsstrategie auf den Sommerkomfort wurde systematisch am Passivhaus Kranichstein untersucht und ausgewertet [AkkP 22].



Der Einfluss der Lüftungsstrategie auf den Sommerkomfort wurde systematisch am Passivhaus Kranichstein untersucht und ausgewertet [AkkP 22].

Abbildung 25: Passivhaus Kranichstein im Sommer [AkkP 5]

Teil des Messprogramms war darüber hinaus eine mehrjährige sozialwissenschaftliche Studie. In dieser wurde untersucht, ob die Bewohner mit dem Gebäude, insbesondere mit dem Komfort zufrieden sind, wie sich die Bedienung bewährt, gleichzeitig konnten Informationen über die energieverbrauchsrelevanten nutzerseitigen Randbedingungen erhoben werden. Im Ergebnis lässt sich feststellen, dass die Bewohner zufrieden waren und eine gewisse, zunächst durchaus feststellbare Skepsis



bzgl. der Eigenschaften – das Konzept war schließlich für alle neu und ohne Vorbild – sich nach kurzer Zeit legte.

Abbildung 26: Zufriedenheit im Passivhaus im Vergleich zu Niedrigenergiehäusern (Quelle: [AkkP 9] auf der Basis von [Rohrmann 1994])

Tatsächlich verhielt sich das Gebäude weit „gutmütiger“ als zuvor erwartet worden war. Zum Funktionieren des Konzepts muss der Nutzer keine Erwartungen erfüllen, im Gegenteil, alles wurde einfacher: Bewohner müssen sich nicht mehr um die Lüftung kümmern, auch nicht um die Heizungsregelung, und schließlich können natürlich auch die Fenster geöffnet werden – in der ohnehin kurzen Heizperiode besteht der Wunsch eher selten. Einiges davon musste erst „gelernt“ werden. Die Annahmen über die Nutzer (z.B. Temperaturen, Anwesenheitszeiten, Nutzung von Elektrogeräten) unterschieden sich summa summarum nicht sehr von den bereits bei der Projektierung getroffenen Annahmen; die weiteren Erfahrungen flossen in die Entwicklung vereinfachter Energiebilanzprogramme [PHPP] ein.

Zusammenfassend verhielten sich die Bewohner des ersten Passivhauses so, dass die Zielsetzungen in vollem Umfang erreicht wurden [AkkP 9].

Die Gebäude stießen auf großes Interesse - zahllose Besucher machten sich selbst ein Bild von dem Gebäude und befragten die Bewohner. Nachdem eine Reihe von Architekten und anderen Akteuren ebenfalls Passivhäuser bauen wollte, wurde 1996 der Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser gegründet.

3 Hochwertige Wärmedämmung

3.1 Außenwand- und Kellerkonstruktion

3.1.1 Außenwände (inkl. Dämmung)

Die Außenwand wurde als 175 mm (Süd-/Nordfassade) bzw. 240 mm (sonstige) Kalksandsteinwand errichtet; sie ist innenseitig verputzt (Gips) und außen mit einer zweilagigen Dämmung (150 mm + 125 mm EPS) als Wärmedämmverbundsystem geschützt (vgl. Abbildung 28); der Außenputz ist ein seit 25 Jahren nicht neu gestrichener mineralischer Putz. Der U-Wert dieser Außenwand beträgt im Neuzustand 0,137 W/(m²K). Die Dämmung ist nur deswegen zweilagig ausgeführt, weil zum Bauzeitpunkt keine Dämmplatten mit mehr als 175 mm Dicke am Markt verfügbar waren. Heute kann eine Dämmung im ökonomisch optimalen Bereich von 170 bis 300 mm problemlos in einer Lage ausgeführt werden, wodurch sich der Arbeitsaufwand und die Kosten reduzieren.

Außenwand	Mineralischer Außenputz; 275 mm Polystyrol-Hartschaum WLG040; 175 mm Kalksandsteinmauerwerk; 15 mm durchgehender Innen-Gipsputz; Raufasertapete, Dispersionsfarbenanstrich.					U-Wert 0,14 W/(m²K)
Bauteil Nr.	Bauteil-Bezeichnung					Innendämmung?
01ud	Außenwand					
Wärmeübergangswiderstand [m²K/W]						
Ausrichtung des Bauteils	2-Wand	innen R _{si}	0,13			
Angrenzend an	1-Außenluft	außen R _{sa}	0,04			
Teilfläche 1	λ [W/(mK)]	Teilfläche 2 (optional)	λ [W/(mK)]	Teilfläche 3 (optional)	λ [W/(mK)]	Dicke [mm]
Innenputz	0,350					15
KS-Mauerwerk	1,000					175
Styropor	0,040					275
Außenputz	0,800					20
Flächenanteil Teilfläche 1		Flächenanteil Teilfläche 2		Flächenanteil Teilfläche 3		Summe
100%						48,5 cm
U-Wert:						0,137 W/(m²K)

Abbildung 27: Bestimmung des U-Wertes des Regelaufbaus der Außenwand aus dem PHPP

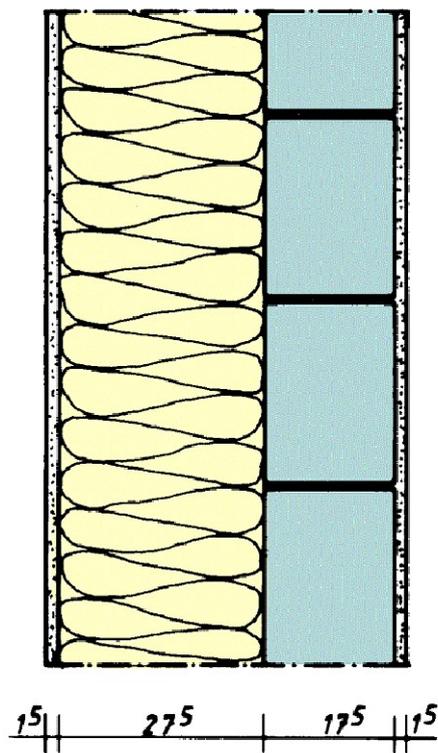


Abbildung 28: Der Aufbau der Außenwand. Eine gemauerte Kalksandsteinwand (in der Regel 17,5 cm dick, einige Wände auch 24,0 cm) wurde innen mit Gipsputz versehen. Dieser Gipsputz bildet auch die luftdichte Ebene, er geht jeweils von Oberkante Rohfußboden bis unterkante Rohdecke. Außen wurde ein zweilagiges Wärmedämmverbundsystem mit einer Dämmdicke (Wärmeleitfähigkeit 0,04 W/(mK)) von insgesamt 27,5 cm aufgebracht, das außen einen mineralischen Verputz aufweist. Der U-Wert dieses Aufbaus beträgt 0,137 W/(m²K).

Rechts oben: Die Anbringung der ersten Dämmlage mit 15,0 cm dicken Dämmplatten aus expandiertem Polystyrol (EPS). Die Platten werden mit einem zementgebundenem Kleber direkt auf das Mauerwerk geklebt; jede Platte wird mit einem am Rand umlaufenden Klebewulst versehen, um die Hinterströmung zusammenhängender Lufträume zwischen Platten und Wand zu verhindern.

Unten rechts: Die Anbringung der 2. Dämmlage mit weiteren 12,5 cm Dämmplatten auf die erste Lage. 1991 gab es noch keinen WdVS-Anbieter, der eine Dämmung in der vollen Stärke liefern konnte. Heute würde einlagig gedämmt werden.

3.1.2 Prüfung der Außenwandkonstruktion nach 25 Jahren

Die Sichtkontrolle der Fassade zeigt eine überall intakte, vergraute, teilweise unregelmäßig verschmutzte Außenoberfläche. Nach Experteneinschätzung bedarf der Außenputz auch gegenwärtig, nach 25 Jahren noch keiner Erneuerung; ein Neuanstrich ist ggfls. mit einer diffusionsoffenen wasserabweisenden Silikatfarbe aus ästhetischen Gründen möglich. Da er derzeit nicht notwendig ist, wurde ein Neuanstrich nach eingehender Überlegung auch nicht durchgeführt.

In der Fachwelt ist zweifelsfrei anerkannt, dass die gemauerte Massivwand aus KS und der Innenputz, sofern keine unsachgemäße Nutzung erfolgt, über Jahrhunderte unverändert Bestand haben – diese Teilkomponenten müssen daher nicht untersucht werden. Dagegen werden teilweise immer noch sehr geringe Zeiträume für die Dauerhaftigkeit von Wärmedämmverbundsystemen angegeben, obwohl auch hier die Literatur aus Langzeituntersuchungen eine sehr lange Lebensdauer belegt. Zur detaillierten Klärung wurde im Passivhaus Darmstadt Kranichstein am 24.02.2016 eine Probe aus dem WdVS der am stärksten bewitterten Westwand herausgeschnitten (Abbildung 29 und Abbildung 30). Dazu wurde der mineralische Putz mit einem Winkelschleifer quadratisch eingeschnitten und sodann mit einem Thermoschneidegerät eine ca. 320 mm mal 320 mm WdVS-Probe bis zur Klebeschicht der äußersten Dämmlage entnommen (Abbildung 29).



Abbildung 29: Entnahme einer Probe aus dem WdVS. Mit einem Thermoschneidegerät (links) wird die Probe freigeschnitten. Entnommen wurde die äußere Lage der zweilagigen Dämmschicht inkl. der gesamten Außenputzschicht. Das verbliebene Loch in der Fassade (rechts) zeigt die Gitterstruktur (Nuten) der nachfolgenden inneren Dämmschicht. Nach der Entnahme wurde die Fehlstelle temporär mit Dämmwolle gefüllt und verklebt.

Die Probe wurde im Labor des Instituts für Konstruktion und Materialwissenschaften (Prof. Dr. Saxer) der Universität Innsbruck eingehend untersucht. Es wurden folgende Parameter bestimmt:

- Die Rohdichte des Dämmstoffes (Ergebnis 14,92 (17) kg/m³ ✓ < wie Neuwert>)
- die Druckfestigkeit des EPS ($\sigma_{10}=59$ kPa bei 10% Stauchung ✓ < wie Neuwert>)
- die Wärmeleitfähigkeit des EPS (Ergebnis 0,0412 (12) W/(mK) ✓ < wie Neuwert>)
- Der Feuchtegehalt in zwei Lagen des EPS (Ergebnis: überall weniger als 0,5 Masse-Prozent ✓ <außerordentlich trocken>)

Damit steht fest, dass der gesamte Aufbau vollständig trocken, ohne Masseverlust und mit unveränderter Wärmeleitfähigkeit wirksam ist. Die Zug- und Druckfestigkeit weist überall den Neuwert auf – das Material und die Konstruktion können daher ihre Funktionsfähigkeit mindestens noch einmal über einen gleich langen wie bisher geprüften Zeitraum erfüllen.



Abbildung 30: Entnommene Probe mit Putz und Dämmstoff aus der Außendämmung der Westwand des Passivhauses Darmstadt Kranichstein; der Putz ist durch und durch fest wie eine Betonplatte; der Dämmstoff erweckt visuell und haptisch den Eindruck, als ob er gerade eben verbaut worden wäre. Alle Kennwerte der Materialien entsprechen den Neuwerten. Diese Konstruktion wird problemlos weitere 25 Jahre halten.

Von besonderem Interesse ist die Beurteilung der ebenfalls herausgeschnittenen Probe des mineralischen Außenputzes. Die Ergebnisse dazu sind im hier wiedergegebenen Originalbericht von Prof. Dr. Saxer enthalten – sie spiegeln die hohe Qualität dieser Putzschicht und die voraussehbar lange Dauerhaftigkeit wider.

**Originalbericht von Prof. Dr. Andreas Saxer
AB Materialwissenschaften der Universität Innsbruck**

**Untersuchung der EPS-Dämmung und
des Putzes Passivhaus Kranichstein**

EPS-Dämmung

Bestimmung der Druckspannung bei 10 % Stauchung (EN 826)

Putz

Bestimmung der Zusammensetzung (Röntgendiffraktometrie, Bindemitteltest)

Bestimmung der Rohdichte und Druckfestigkeit

Ergebnisse

EPS-Dämmung

Folgende Abmessungen weist das geprüfte Stück einer EPS Platte auf:

Länge	Breite	Höhe	Masse	Dichte
mm	mm	mm	g	kg/m ³
70,9	70,9	70,9	4,801	13

Im Diagramm 1 ist die Stauchung in Abhängigkeit der Druckspannung dargestellt.

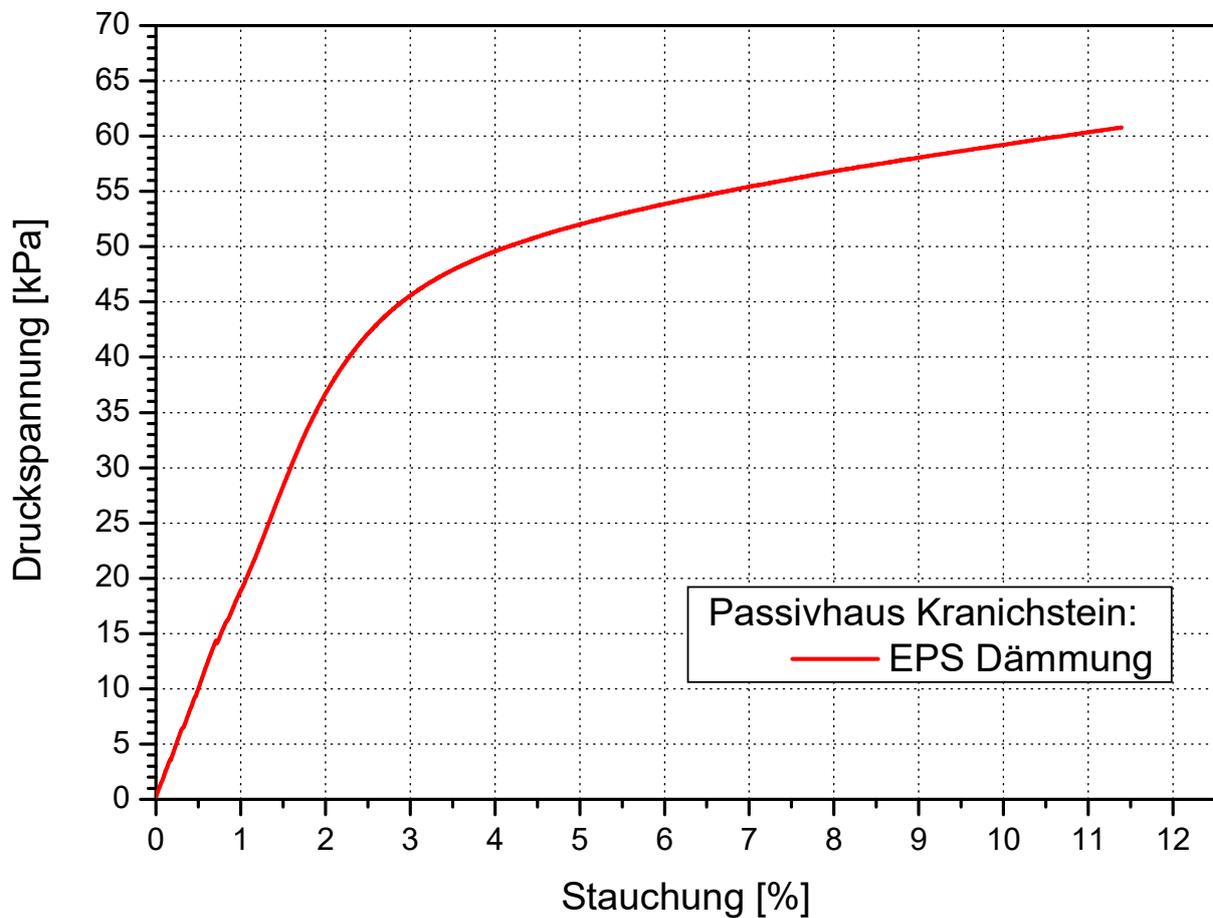


Diagramm 1: Druckspannungs-Stauchung Diagramm der EPS-Dämmung

Die Druckspannung bei 10 % Stauchung (σ_{10}) ergibt sich wie folgt: $\sigma_{10} = 59 \text{ kPa}$.

Dieser Wert entspricht in etwa einem σ_{10} von EPS-W 15, Allgemeine Wärmedämmung ohne besondere Belastung mit $\sigma_{10} \geq 60$.

Putz

Die Putzschicht weist in der Mitte ein Armierungsgewebe aus Kunststoff sowie eine weiße Deckschicht mit eingestreuten mineralischen Körnern auf. Insgesamt liegt eine kompakte und feste Putzschicht vor.

Der Putz ist auf einer EPS Dämmplatte aufgebracht und weist eine ausgezeichnete Haftung auf. Weiters fällt auf, dass die EPS Dämmplatte an der putzseitigen Oberfläche Nuten mit Schwalbenschwanz-Querschnitt hat. In Foto 1 ist ersichtlich, dass diese Nuten mit Putzmaterial gefüllt sind.

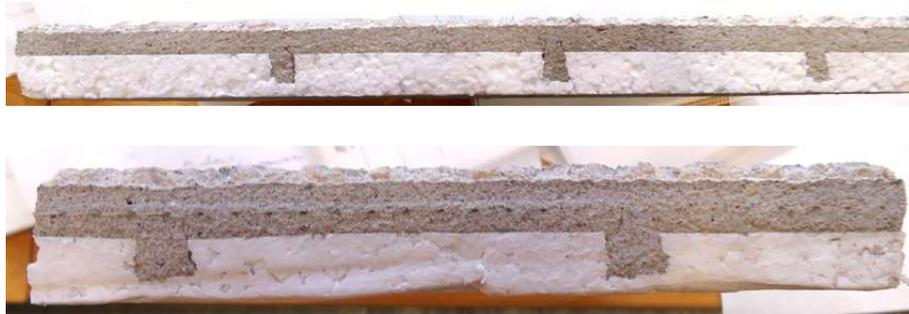
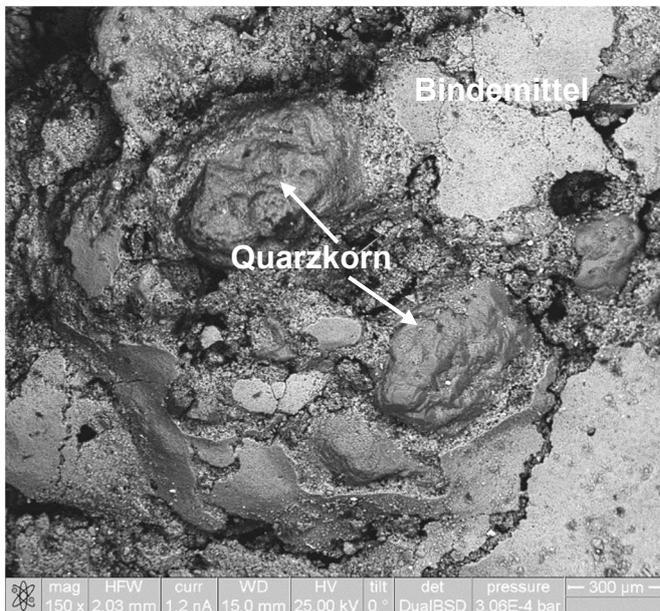


Foto 1: Putz auf EPS Platte mit Schwalbenschwanz-Nuten

In Foto 2 ist die Oberfläche des Putzes mit 2 aus der Bindemittelschicht herausragenden Gesteinskörner bei Betrachtung im Rasterelektronenmikroskop (REM) ersichtlich. Aus der Elementanalyse mittels energiedispersiver Röntgenfluoreszenz ist abzuleiten, dass es sich um Quarzkörner handelt. Im Bindemittelbereich dürfte es sich um Weisszement handeln, was aufgrund des niedrigen Eisengehalts angenommen werden kann.



**Foto 2: Putz Oberfläche im REM
(150x)**

Zur Bestimmung der Zusammensetzung des Putzes wurde eine Röntgendiffraktometer-Analyse (RDA) durchgeführt. Im erhaltenen Spektrum (siehe Anhang) dominiert Quarz, welcher als Zuschlag im Putz vorliegt. Mit deutlich geringerer Intensität findet sich Calcit (Calciumcarbonat), Feldspat (Mikroclin, Albit) und sehr gering Glimmer (Muscovit).

An aufbereitetem Putz-Material wurde auch ein Bindemitteltest durch Übergießen mit verdünnter Salzsäure durchgeführt. Bei Kontakt mit der Salzsäure wurde starkes Aufbrausen (von Calcit), Gelb-Verfärbung und die Bildung von Schwefelwasserstoff (H₂S) beobachtet. Weiters wurde Sulfat durch Fällung mit Bariumchlorid festgestellt. Aus diesen Reaktionen mit verdünnter Salzsäure kann abgeleitet werden, dass als Bindemittel Zement mit Hüttensand sowie Kalk verwendet wurde (Kalk-Zement Putz).

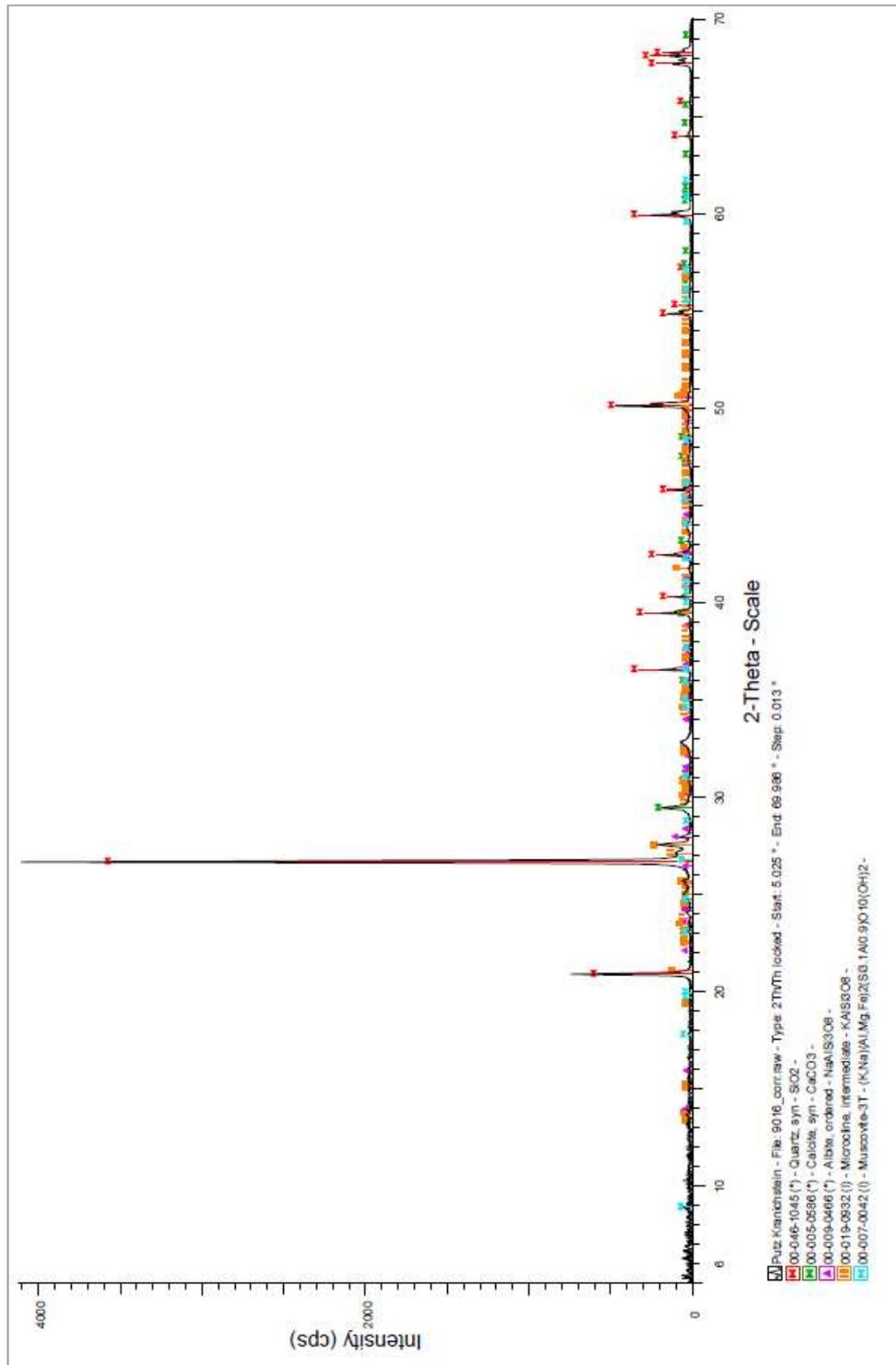
Aus der Putzschicht mit Dicke von 10-12 mm wurden Würfel geschnitten und diese auf Festigkeit geprüft. In der folgenden Tabelle sind die Ergebnisse zusammengefasst:

Nr.	Länge	Breite	Höhe	Masse	Dichte	Bruchlast	Druckfestigkeit
	mm	mm	mm	g	kg/dm ³	N	N/mm ²
1	11,8	12,6	11,2	2,287	1,37	480	3,2
2	11,6	12,0	11,3	2,272	1,44	630	4,5
3	11,5	11,6	11,6	2,411	1,56	715	5,4
4	11,8	12,0	11,7	2,489	1,50	785	5,5
5	11,3	11,6	11,7	2,422	1,58	720	5,5
6	11,6	11,9	11,5	2,497	1,57	940	6,8
7	11,8	11,1	11,6	2,421	1,59	640	4,9
8	11,6	12,0	11,7	2,565	1,57	1110	8,0
9	11,2	10,7	11,5	2,182	1,58	610	5,1
10	11,8	10,3	11,6	2,127	1,51	550	4,5
11	11,7	11,1	11,6	2,298	1,53	840	6,5
12	11,8	12,2	11,7	2,549	1,51	580	4,0
Mittelwert					1,53		5,3
s1)					0,07		1,3

1) Standardabweichung

Der Putz weist eine mittlere Rohdichte von 1,53 kg/dm³ und eine mittlere Druckfestigkeit von 5,3 MPa auf (Anmerkung: gemäß ÖNorm EN 998-1 wäre diese Druckfestigkeit der Kategorie CS II zuzuordnen).

RDA-Spektrum Putz



Dr. Andreas Saxer
AB Materialwissenschaften der Universität Innsbruck

Haftzugfestigkeit des Außenputzes

Um den mechanischen Zustand des Wärmedämmverbundsystems zusätzlich auf einer größeren Fläche zu erfassen wurden an insgesamt sieben Punkten der Westwand Haftzugversuche am Putz durchgeführt. Die folgende Abbildung zeigt die Verteilung der Proben.

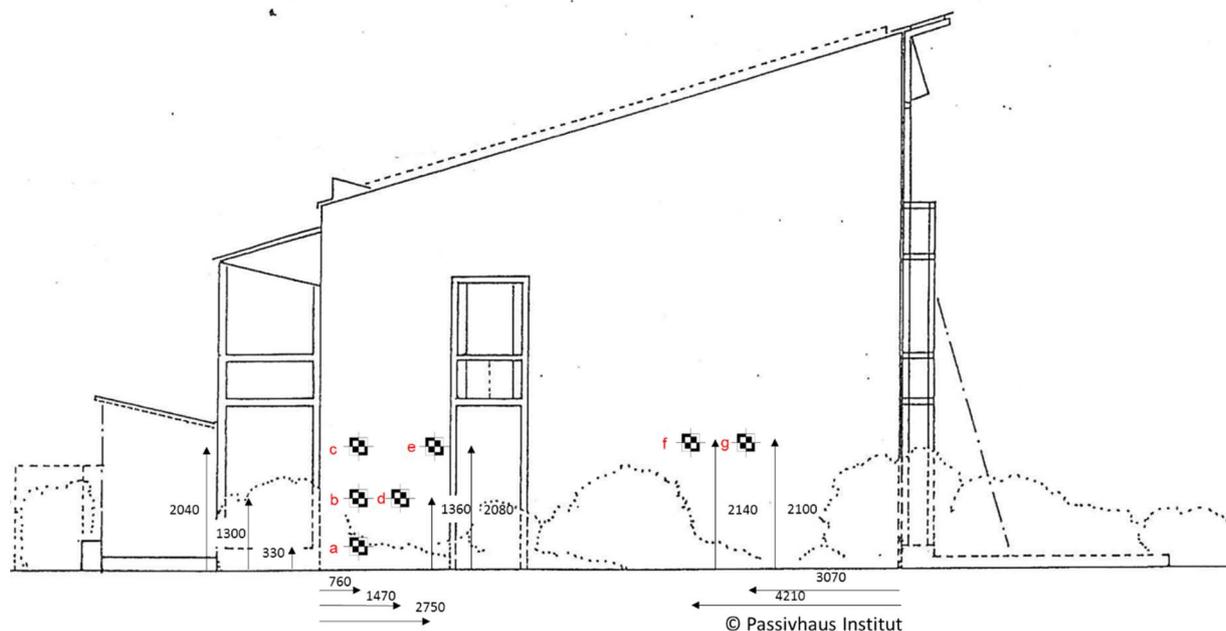


Abbildung 31: Messstellen der Haftzugprüfung des Außenputzes an der Westwand des Passivhauses Darmstadt-Kranichstein

Die Überprüfung der Haftzugfestigkeit wurde durch das Robert Murjahn Institut am 24.05.2016 in Anlehnung an [ETAG 2013] Kap. 5.1.4.1.1 durchgeführt. Das Wetter zum Zeitpunkt der Untersuchung war bedeckt und regnerisch, die Lufttemperatur betrug ca. 14°C. Details sind in dem Prüfbericht [RMI 2016] dokumentiert, hier werden die wesentlichen Ergebnisse aufgeführt (der vollständige Prüfbericht ist im Anhang dieses Berichtes enthalten).

Die Proben wurden in einer Größe von 60 x 60 mm² vorbereitet. Dazu wurden quadratische Stahlplatten aufgeklebt und der Putz rundum durchtrennt. Die Prüfungsgeschwindigkeit betrug 0,05 ± 0,01 N/(mm²s).

Tabelle 3: Messergebnisse und Beschreibungen der Bruchbilder der Haftzugprüfungen (aus [RMI 2016])

Messstelle	Haftzugfestigkeit [MPa]	Bruchbild
a	0.034	25% Kohäsionsbruch EPS 75% Adhäsionsbruch EPS/Putzschicht
b	0.059	60% Kohäsionsbruch EPS 5% Adhäsionsbruch EPS/Putzschicht 30% Kohäsionsbruch Putzschicht 5% Kohäsionsbruch Mineralwolle
c	0.071	10% Kohäsionsbruch EPS 85% Adhäsionsbruch EPS/Putzschicht 5% Kohäsionsbruch Putzschicht
d	0.075	75% Kohäsionsbruch EPS 25% Kohäsionsbruch Putzschicht
e	0.079	5% Kohäsionsbruch EPS 85% Adhäsionsbruch EPS/Putzschicht 10% Kohäsionsbruch Putzschicht
f	0.074	10% Kohäsionsbruch EPS 70% Adhäsionsbruch EPS/Putzschicht 20% Kohäsionsbruch Putzschicht
g	0.079	5% Kohäsionsbruch EPS 90% Adhäsionsbruch EPS/Putzschicht 5% Kohäsionsbruch Putzschicht
Mittelwert	0.0673	
Stabw.	0.0150	
Stabw. Mittelwert	0.0057	

Im Mittel wurde für das 25 Jahre alte Wärmedämmverbundsystem eine Haftzugfestigkeit von knapp 0,07 MPa festgestellt.

Gemäß [ETAG 2013] wird für neu hergestellte Systeme eine Mindestfestigkeit 0,08 MPa verlangt. Die Mehrzahl der Proben am Passivhauses Darmstadt-Kranichstein erreicht diesen Wert nach 25 Jahren im Rahmen der Messgenauigkeit annähernd, wie die nachfolgende Grafik anschaulich zeigt.

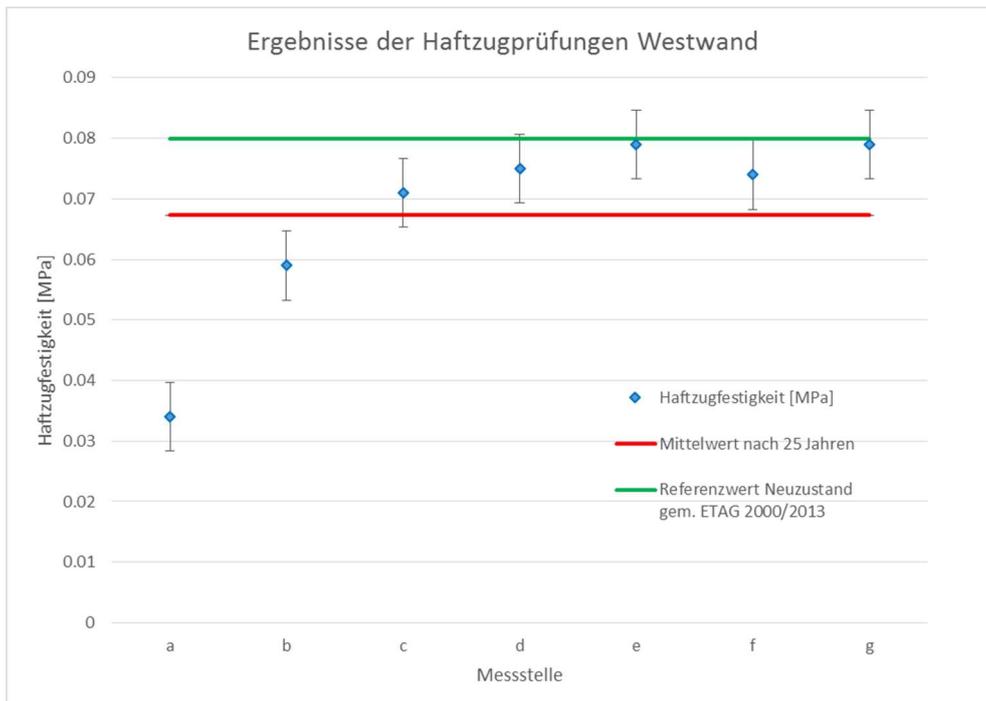


Abbildung 32: Messergebnisse der Haftzugprüfungen



Abbildung 33: Messergebnisse der Haftzugprüfungen im Verhältnis zu den aus Windbeanspruchung resultierenden Soglasten. Links die Werte für die Windzonen 1 bis 4, rechts für einen Orkan; die Abzugsfestigkeit weist selbst für letzteren Fall ausreichende Reserven auf.

Werden die gemessenen Werte mit den nach DIN 1055 für die verschiedenen Windzonen zu erwartenden Soglasten auf der Fassade verglichen, so wird deutlich, dass das Wärmedämmverbundsystem des Passivhauses Darmstadt-Kranichstein auch nach 25 Jahren noch jedem Sturm gewachsen ist.

Fazit zur Dauerhaftigkeit der Außenwandkonstruktion:

Hochgedämmte Wandkonstruktionen sind im Massivbau mit jedem denkbaren Wandbildner ausführbar; besonders kostengünstig mit einem Wärmedämmverbundsystem (WdVS). Solche Systeme bleiben dauerhaft wirksam, trocken und witterungsbeständig, wenn sie einen mit Glasseidengewebe verstärkten mineralischen Außenputz aufweisen.

Die prognostizierte Nutzungszeit eines solchen Putzes ist **auch in stark bewitterten Lagen länger als 50 Jahre**; die Dämmlagen sind noch länger beständig, es ist nach Ablauf der Putzstandzeit nur evtl. die Putzschicht (das möglicherweise ohne Entfernung des Altputzes auf neuem Putzträger) zu erneuern.

Als Dämmstoffe können heute EPS-, XPS-, PUR/PIR- und Mineralwolle- und Kork-Dämmplatten eingesetzt werden. Die Auswahl des Dämmstoffes kann sich nach Praktikabilitäts- und Kostengesichtspunkten richten. Ein wichtiger Gesichtspunkt dabei ist der Brandschutz. Alle Materialien werden durch die außen aufgebraachte Putzlage vor Witterungseinflüssen geschützt.

3.1.3 Konstruktion inkl. Dämmung der Bodenplatte bzw. Kellerdecke mit Anschlusspunkten zu Außen- und Innenwänden

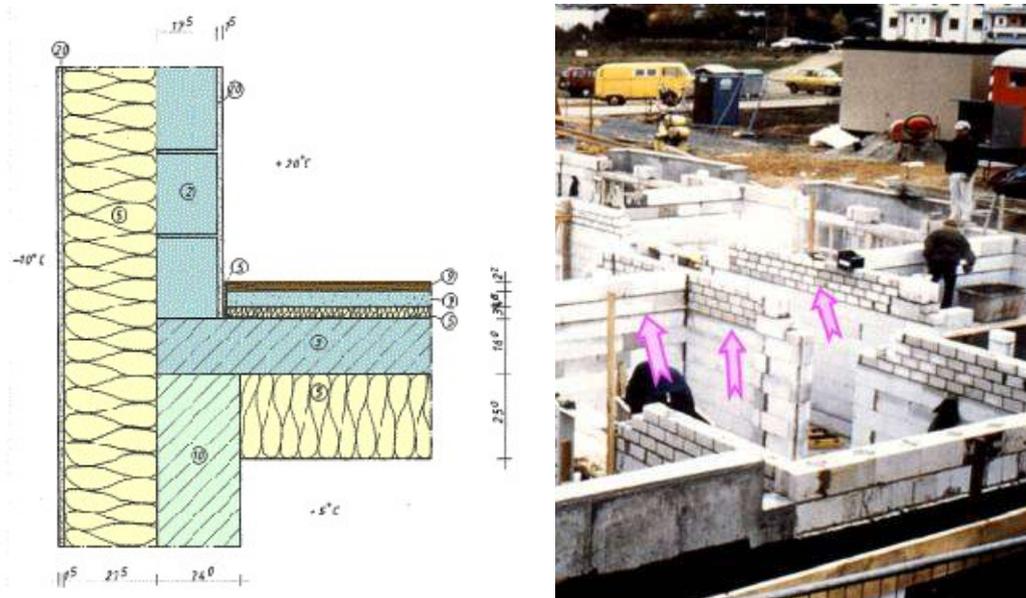


Abbildung 34: links: Konstruktionszeichnung für den Anschluss Kellerwand/Kellerdecke („AWB“)

rechts: Vermeidung von Wärmebrücken und Kellerdeckenaufbau am Fußpunkt des aufsteigenden Mauerwerks. Um die konstruktiv bedingte Wärmebrücke gering zu halten, wurde das Kellerwand-Mauerwerk mit einem Stein mit geringer Wärmeleitfähigkeit (Porenbetonstein, Nr. ⑩) abgeschlossen. Die Dämmsteinlage ist so platziert worden, dass ein lückenloser Anschluss der Kellerdeckendämmung an die Dämmung der Außenwände resultiert. Auch die Kellerinnenwände weisen eine solche Porenbeton-Steinlage auf. Das Foto zeigt die beiden obersten Steinreihen (Pfeile) während der Ausführung.

Kellerdecke	Spachtelung auf Glasfasergewebe; 250 mm Polystyrol-Hartschaumplatten ⑤; 160 mm Normalbeton ③; 40 mm Polystyrol-Trittschalldämmung; 50 mm Zement-Estrich ⑦; 8-15 mm Stäbchenparkett, geklebt ⑨; Versiegelung lösemittelfrei.					U-Wert 0,13 W/(m²K)
Bauteil Nr.	03ud Kellerdecke					Innendämmung?
Wärmeübergangswiderstand [m²K/W]						
Ausrichtung des Bauteils	3-Boden	innen R _{si}		0,17		
Angrenzend an	3-belüftet	außen R _{sa}		0,17		
Teilfläche 1	λ [W/(mK)]	Teilfläche 2 (optional)	λ [W/(mK)]	Teilfläche 3 (optional)	λ [W/(mK)]	Dicke [mm]
Parkett	0,130					22
Estrich	1,050					48
Trittschalldämmung	0,040					30
Betondecke	2,100					160
Styropor	0,040					250
Spachtelung	0,800					10
Flächenanteil Teilfläche 1		Flächenanteil Teilfläche 2		Flächenanteil Teilfläche 3		Summe
100%						52,0 cm
U-Wert: 0,131 W/(m²K)						

Abbildung 35: Aufbau der Kellerdecke (Nummern aus Abbildung 34) und Bestimmung des Regel-U-Wertes der Kellerdecke (PHPP)

Im Rahmen der Untersuchungen nach 25 Jahren erfolgt keine Beprobung der Kellerdecke; Dämmschicht und Spachtelung sind nach äußerer optischer und haptischer Kontrolle überall intakt. Es gibt keinerlei Hinweise auf erhöhte Feuchtigkeiten in diesem Bereich. An der Dauerhaftigkeit dieser Konstruktion besteht daher kein Zweifel. Wohl aber wurde der Bereich bei den thermographischen Untersuchungen einbezogen, wodurch die Wirksamkeit der Dämmung und der trockene Zustand von Dämmung und Spachtelung bestätigt werden konnten. (Vgl. Abschnitt 3.3.3).

3.2 Dachkonstruktion

3.2.1 Konstruktion (inklusive der Dämmung) des Daches

Die Verwendung von Gründächern war im Baugebiet bindend vorgeschrieben. Der Grasdachaufbau (Abbildung 36 **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**) liegt auf einer von Stegrägern abgetragenen Spanplatte. Der Achsabstand der Stegräger konnte mit 1,08 m recht groß gewählt werden. Zum Raum hin wurde eine 45 mm Konterlattung angebracht, die durchgehende Luftdichtheitsebene bildet eine Polyethylenfolie, die zugleich als Dampfbremse fungiert, der raumseitige Abschluss ist durch eine tapezierte und gestrichene Gipskartonplatte gegeben. Alle Hohlräume wurden mit Mineralfaser-Einblasdämmung ausgeflockt. Bei 445 mm

Dämmstoffdicke ergibt sich insgesamt ein Dach-U-Wert von weniger als $0,1 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ (Abbildung 40).

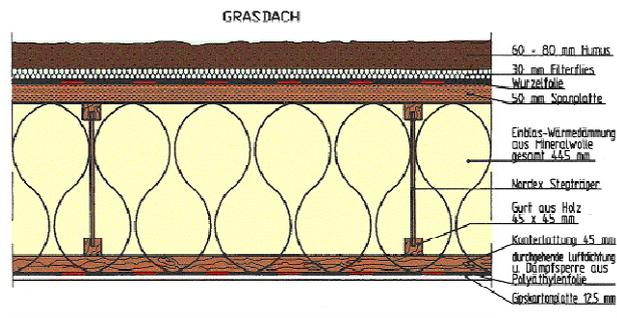


Abbildung 36: Der Dachaufbau im Passivhaus Darmstadt Kranichstein. Der Grasdachaufbau liegt auf einer von Stegträgern abgetragenen Spanplatte. Der Achsabstand der Stegträger konnte mit 1,08 m relativ hoch gewählt werden. Zum Raum hin folgt eine Konterlattung (45 mm), die durchgehende Luft- und Dampfdichtung (Polyethylenfolie) und eine Gipskartonplatte. Bei 445 mm Dämmstoffdicke ergibt sich ein Dach-U-Wert mit $< 0,1 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$.

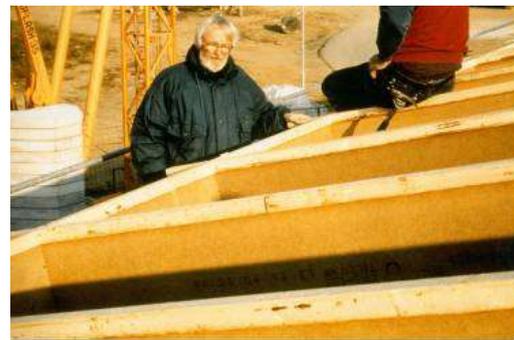


Abbildung 37: Dach während der Zimmermanns-Konstruktion. Im Bild auch Architekt Westermeyer. Gut erkennbar die Doppel-T-Träger aus Holz.



Abbildung 38: Ausblasen des Gefachs mit Mineralwolle

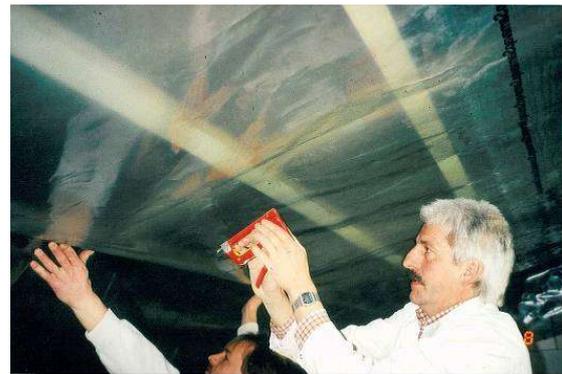


Abbildung 39: Anbringung der Luftdichtheitsbahn

Dach	Grasdach, Filtervlies, Wurzelfolie, formaldehydfreie Spanplatte, Doppel-T-Träger aus Holz (Steg aus Hartfaserplatte), Konterlattung, fugenlos verklebte Luftdichtung aus Polyäthylenfolie , Gipskartonplatte, Raufasertapete, Dispersionsfarbenanstrich, gesamter Hohlraum (445 mm) mit Mineralwolle ausgefüllt.					0,1 W/(m²K)
Bauteil Nr.	02ud Dach					Innendämmung?
Ausrichtung des Bauteils		Wärmeübergangswiderstand [m²K/W]				
Angrenzend an		innen R _{si}	0,10			
		außen R _{sa}	0,04			
Teilfläche 1	λ[W/(mK)]	Teilfläche 2 (optional)	λ[W/(mK)]	Teilfläche 3 (optional)	λ[W/(mK)]	Dicke [mm]
Holzwerkstoffpl.	0,130					50
Einblas-Mineralwolle	0,040	Stegträger	0,374			400
Einblas-Mineralwolle	0,040			Konterlattung	0,130	45
GK-Platte	0,700					12,5
Flächenanteil Teilfläche 1		Flächenanteil Teilfläche 2		Flächenanteil Teilfläche 3		Summe
85%		2,8%		12,5%		50,8 cm
U-Wert:						0,099 W/(m²K)

Abbildung 40: Aufbau und Berechnung des Regel-U-Wertes der Dachkonstruktion (PHPP)

Die Wärmebrückenwirkung der Stegträger als Sparren ist vergleichsweise gering (das PHPP weist hier eine Erhöhung des U-Wertes ΔU_{Dach} von 0,012 W/(m²K) auf den ungestörten U-Wert aus, dies ist in der oben dokumentierten Berechnung bereits enthalten).

Warmdachaufbauten sind in den letzten Jahren stark in die Kritik gekommen, weil sie im Schadensfall kein hohes Wiederaustrocknungspotential haben. Wird ein solcher Aufbau verwendet, so muss konstruktiv sichergestellt sein, dass es gar nicht erst zu einer starken Aufwechung innerhalb der Tragkonstruktion kommen kann. Das Gründach ist dabei eine besondere Herausforderung, da das Substrat funktionsgemäß eine hohe Feuchtigkeit über möglichst lange Zeiträume aufrechterhalten soll – die relative Feuchte oberhalb der Dichtungsbahn liegt daher über lange Zeiträume im Jahr bei 100%. Im Gründach in Kranichstein erfolgte eine Abdichtung durch sorgfältig verlegte, innen liegende Luftdichtheits- und Dampfbremse (hier verwendet: eine qualifizierte PE-Folie) und eine durchgehende Gründachbahn unter dem Grasdachaufbau. Besonders kommt es dabei innenseitig auf die luftdichten Anschlüsse zu den Außenwänden an; deren Wirksamkeit wird im Abschnitt zur Luftdichtheit beschrieben und belegt. Trotz der sehr hohen Wasserdampfdiffusionswiderstände auf beiden Seiten dieses Aufbaus stellt sich im Inneren im Verlauf der Jahrzehnte ganz allmählich

ein Gleichgewichtsfeuchtigkeitsprofil ein. Dieses wurde für den hier vorliegenden Aufbau:

- Messtechnisch durch eine Dauermessung der a_w -Werte bestimmt
- mit hygrothermischen Simulationsrechnungen (mit dem Programmpaket *Delphin* des Instituts für Bauklimatik Dresden) für den Aufbau verglichen und
- durch Auswiegen und Ausheizen zur gravimetrischen Feuchtebestimmung mit einer aus dem Aufbau gezogenen Dämmstoffprobe bestätigt.

Für die Dauermessung wurde ein durch einen Mikroprozessor gesteuertes Messdatenerfassungssystem entwickelt. Damit wird in verschiedenen Tiefen der Dämmschicht der zeitliche Verlauf der relativen Feuchte und der Temperatur erfasst (Abbildung 41). Die Temperaturmessungen haben eine Messtoleranz von etwa 0,3 K, die Feuchtemessungen von < 1,5 % rel. Feuchte (Sensirion Sensor SHT 75).

Parallel dazu wird mit den gemessenen gleichen Randbedingungen ein hygrothermisches Simulationsmodell berechnet. Erste Auswertungen lassen eine gute Übereinstimmung von Messwerten und Simulationsdaten erkennen (Abbildung 42). Beide zeigen nach 25 Jahren, dass es bisher *nicht zu kritischen Auffeuchtungen* gekommen ist. Allerdings lässt sich wegen der Kürze des Messzeitraumes anhand der bisher erfolgten Messungen noch nicht entscheiden, ob der quasistationäre Gleichgewichtszustand bereits erreicht wurde. Die Messungen werden daher auch in den folgenden Jahren fortgesetzt.

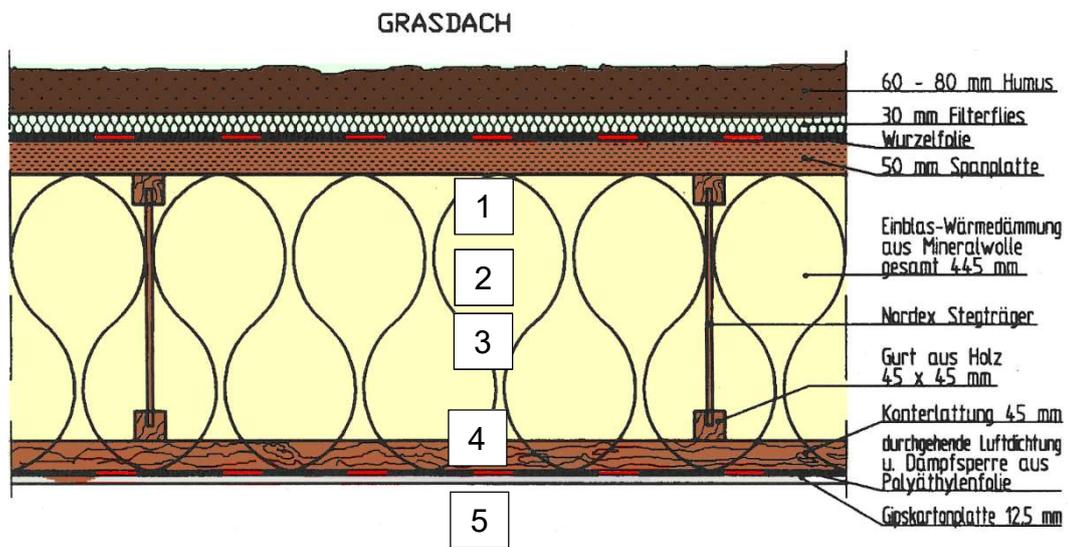


Abbildung 41: Dachaufbau und Messpunkte für Temperatur und relative Feuchte

- (1) Innenoberfläche der Spanplatte
- (2) ca. 75% der Dämmung (von innen)
- (3) ca. 50% der Dämmung
- (4) Bauteilseite der Dampfbremse
- (5) Raumlufte 5 cm unterhalb der Dachkonstruktion

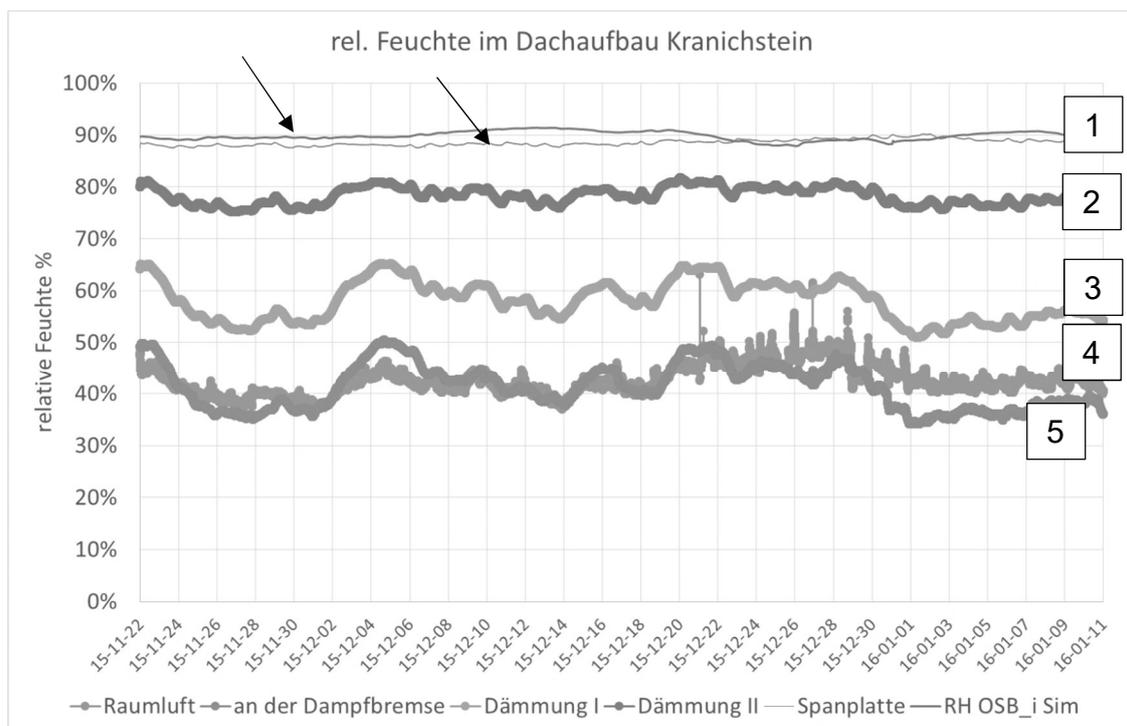


Abbildung 42: Feuchteentwicklungen an verschiedenen Punkten im Dachaufbau (Messwerte und Simulationsergebnisse). Die maximalen Feuchten treten an der außen liegenden Holzwerkstoffplatte (Pfeile) auf.

Zusammenfassung der Ergebnisse:

- Der Warmdachaufbau verhält sich im Rahmen der Messgenauigkeit so, wie nach der hygrothermischen Simulation mit realitätsnah gewählten Randbedingungen zu erwarten.
- Die Feuchtegleichgewichte stellen sich bei einem solchen Aufbau erst nach einigen Jahrzehnten ein.
- An jeder Stelle des überall unbeschädigten Aufbaus, auch an der kritischsten Stelle (das ist unmittelbar unter der Spanplatte) ergeben sich sowohl aus der Messung als auch nach der Simulation zu keinem Zeitpunkt bedenkliche Werte für die Materialfeuchtigkeit, der Januar-Wert liegt um 12,7 Massenprozent Materialfeuchte (✓ bis zu 15% wären an dieser Stelle unbedenklich).

Trotz ungünstiger Orientierung (Norddach!) und längeren Perioden mit nahezu 100 % a_w -Wert im Außenbereich (Substrat des Gründaches) ist der hier vorliegende Aufbau seit 25 Jahren schadensfrei und von allen Feuchtwerten her unkritisch. Eine höhere Austrocknungsreserve im Schadensfall ließe sich durch Verwendung heute verfügbarer feuchteadaptiver Dampfbremsen auf der Innenseite oder/und durch Verwendung eines kapillaraktiven Einblasdämmstoffes (z.B. Zellulose-Dämmstoff) erzielen. Auch bei diesen Lösungen ist eine sorgfältige Luftdichtheit jedoch der entscheidende Schlüssel zur Schadensfreiheit der Konstruktion. Gleichfalls entscheidend ist es, auf das Einhalten eines Mindestgefälles zu achten – stehende Wasserpfützen sind auf Dauer für einen solchen Aufbau (wie für jeden anderen Aufbau) nicht zuträglich. Eine noch höhere Sicherheit würde hier nur durch einen hinterlüfteten Dachaufbau erreicht, der aber erheblich höhere Investitionskosten erfordert. Diese Aussage gilt unabhängig von der verwendeten Dämmdicke.

Fazit Dachdämmung:

Hochgedämmte Dachkonstruktionen sind auch als leichtes Holzdach, sogar mit Gründachauflage dauerhaft schadensfrei realisierbar, wenn auf die Luftdichtheit auf der Innenseite und einen wasserableitenden Aufbau auf der Außenseite geachtet wird; dafür gibt es mehrere Alternativen, von denen die Autoren einer hinterlüfteten Deckung mit Unterdach (z.B. Unterspannbahn, aber auch Holzwerkstoffplatte oder Holzschalung, winddicht) den Vorzug geben. Im vorliegenden Fall hat auch der Warmdachaufbau einwandfrei funktioniert; die Simulation zeigt, dass in diesem Fall die Verwendung feuchteadaptiver Dampfbremsen eine noch höhere Sicherheit liefert. Die Dauerhaftigkeit des hier untersuchten Aufbaus sowie der hinterlüfteten Varianten ist (ohne Gewalteinwirkung) praktisch unbegrenzt.

3.3 Dauerhafte Vermeidung von Wärmebrücken – Überprüfung durch Infrarot-Thermographie

Die Vermeidung von Wärmebrücken betrifft vor allem die Überprüfung der Anschlüsse von Bauteilen der Hüllfläche aneinander – deren fachgerechter Aufbau ist primär durch eine adäquate Planung zu gewährleisten. Diese ist im Fall des Passivhauses in Kranichstein erfolgt und wurde bereits dokumentiert [Feist 1997c]: Die gesamte realisierte Hülle ist wärmebrückenfrei (Definition vgl. [AkkP 16]). Für die Nachuntersuchung interessant sind solche Anschlussbereiche, in denen sich Dämmstoffe evtl. verschieben oder setzen könnten (vgl. dazu auch Abbildung 77). Veränderungen in den Materialeigenschaften sind relativ unwahrscheinlich, würden allerdings beim Vergleich von Thermographien aus unterschiedlichen Jahren ebenfalls entdeckt. Durchaus vorkommen könnten z.B. Aufweichungen in Bauteilen, wodurch sich in der Folge die Wärmeleitfähigkeiten erhöhen und so die Wärmeverluste steigen würden. Wenn es solche Effekte gibt, würden sie ebenfalls in den Thermographieaufnahmen in Erscheinung treten.

3.3.1 Übersicht: einmal rund um das Gebäude

Nach den Planungsrichtlinien für energieeffiziente Bauweise soll die wärmedämmende Gebäudehülle das gesamte beheizte Volumen in einer ununterbrochenen Ebene (*Dämmebene*) umgeben. Unter solchen Bedingungen entsprechen die außen an den Oberflächen herrschenden Bedingungen weitgehend denen an einer frei stehenden Umgebungsoberfläche (z.B. Gartenstuhl). Auch die inneren Oberflächen von Außenbauteilen sollten dann Temperaturen aufweisen, die sich nur wenig von denen auf vollständig im Inneren stehender Objekte (z.B. Mobiliar) unterscheiden. Letzteres ist die Ursache für das angenehm gleichmäßige Strahlungsklima in einem Passivhaus. Diese Erwartung wird durch die thermographischen Innenaufnahmen bestätigt (vgl. Abbildung 75 bis Abbildung 92).

Abbildung 43 und folgende dokumentieren zwei Rundgänge um das Passivhaus Darmstadt Kranichstein, welche alle von außen sichtbaren Oberflächen in der Übersicht darstellen. Einer der Rundgänge fand am 01.01.2001 (also nach 10 Jahren Nutzung), der andere am 01.01.2016 (nach 25 Jahren) statt. Beide Thermographiekampagnen fanden in den frühen Morgenstunden vor Sonnenaufgang statt. Durch diese Zeitwahl werden schwer interpretierbare Sondereinflüsse auf die Fassadentemperatur ausgeschlossen: Bei Sonnenschein gibt es beispielsweise ein Spiel von Licht und Schatten auf der Fassade, welches sich durch hohe unmittelbar erzeugte Temperaturunterschiede ausdrückt (die gleiche Situation gibt es dann auch an freistehenden Flächen, wie z.B. Straßenschildern). Solche Effekte verdecken die hier

interessierenden Einflüsse der baulichen Qualität und sie lassen sich auch nur mit sehr großem Aufwand herausrechnen.

Tabelle 4: Wetterbedingungen an den Aufnahmezeitpunkten der beiden thermographischen Untersuchungen

Datum	Außenluft-temp. [°C]	Außenluftfeuchte	Bedeckung	Strahlungswetter
01.01.2001 4:00 Uhr	6,4	65%	0%; klarer Nachthimmel	Nur geringe atmosphärische Gegenstrahlung
01.01.2016 4:00 Uhr	4,9	98%	100%	Hohe atmosphärische Gegenstrahlung (aus geringen Höhen)

Eingesetzt wurde jeweils die aktiv gekühlte Thermographiekamera Varioscan von Jenoptik / Infratec [Varioscan]. Diese Kamera verwendet für alle Strahlungsmessungen den gleichen Punktsensor, welcher im Fokus der Germaniumlinse steht; durch einen horizontal und vertikal angesteuerten Spiegel wird das virtuelle Bild abgetastet. Durch diese Technik ist eine sehr hohe Temperaturauflösung möglich, da es keine sensorbedingten Abweichungen zwischen den Pixeln gibt.

Tatsächlich zeigen die Aufnahmen eine sehr gleichmäßige Temperatur der Oberflächen – mit einigen recht auffälligen Merkmalen, die im Folgenden kurz diskutiert und erklärt werden.

Aufnahmen der Westfassade

Im Vergleich der Aufnahmen vom 01.01.2001 und vom 01.01.2016 ist der Einfluss des Strahlungswetters auffällig erkennbar. Bei klarem Wetter (Januar 2001) blickt man im IR-Spektrum bei 5 bis 15 μm bis weit in die Atmosphäre, die in hohen Lagen sehr kalt ist. Die Gegenstrahlung aus der Atmosphäre ist deshalb an einem solchen Tag sehr gering. Dadurch gibt es zwar eine hohe thermische Abstrahlung der Oberflächen – jene, die direkte Sicht zum Himmel haben, bekommen jedoch nur wenig Energie zurückgestrahlt. Dies wirkt sich in Abbildung 43 auffällig an zwei Details aus:

- 1) Dort, wo die Fassade durch vorgelagerte Bauteile gegenüber dem Nachthimmel verschattet ist, kühlen die Oberflächen weniger stark aus und erscheinen daher wärmer. Das ist sehr gut unmittelbar unter dem Balkon (gelbe Flächen, Tempe-

ratur bis auf 8°C ansteigend) und links neben der Leiter (grünes Band) erkennbar. Es handelt sich hier *nicht* um Wärmebrücken. Die gegebene Erklärung bestätigt sich augenscheinlich, wenn im Vergleich dazu Abbildung 45 vom 01.01.2016 betrachtet wird – hier ist der Himmel nicht entscheidend kälter als die Umgebung und die Verschattungseffekte der IR-Strahlung entfallen vollständig.

- 2) Die Aluminium-Oberfläche des Schiebeladens erscheint extrem kalt (Abbildung 43) – das ist aber allein darauf zurückzuführen, dass diese Oberfläche den kalten Nachthimmel reflektiert: In Wahrheit sieht die Kamera hier den Himmel. Im Bild vom Januar 2016 ist der Schiebeladen demontiert.

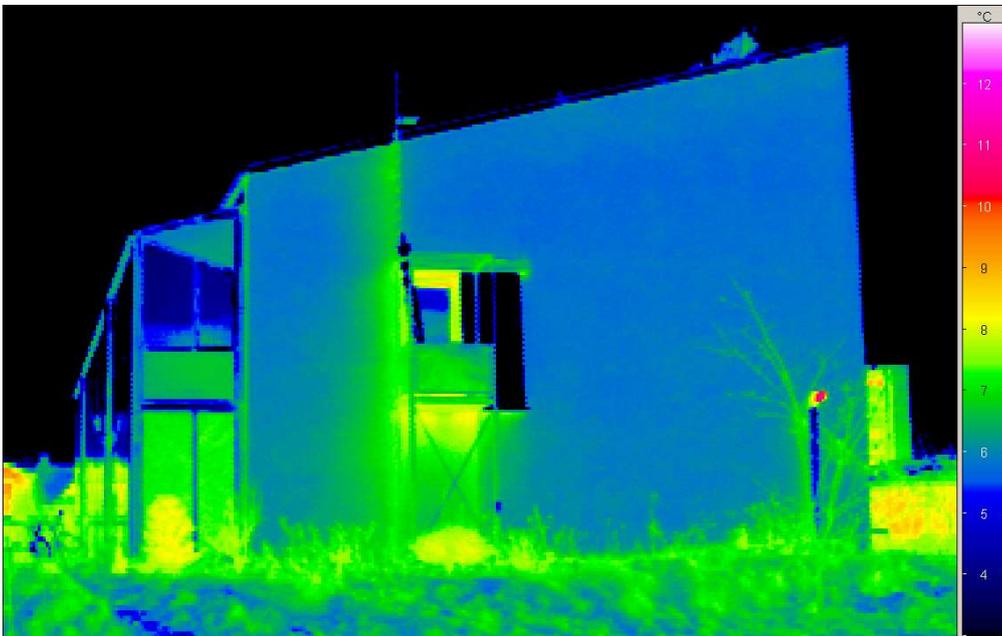


Abbildung 43: Thermographiebild der Westfassade (2001); die Temperaturen auf der wärme-gedämmten Außenwand sind sehr gleichmäßig. Auffällig ist der IR-Schatten-wurf von Balkon, Leiter und Fortluftrohr; da es sich um eine klare Nacht han-delte, sind die Abstrahlungseffekt in den kalten Nachthimmel hier besonders auffällig. Ebenfalls gut erkennbar ist die Nachthimmel-Reflexion auf der Alu-minium-Oberfläche des Dämmschiebladens (1. OG neben der Fenstertür).



Abbildung 44: Visuelle Aufnahme zur Thermographie der Westwand 1.1.2016



Abbildung 45: Thermographie der Westfassade vom 01.01.2016. Durch den bedeckten (und damit weniger kalten) Himmel entfallen hier die auffälligen Reflexionseffekte gegenüber der Aufnahme von 2001. Weiter erkennbar sind der Fortluftauslass (roter Fleck) und das Nachbargebäude im Hintergrund. Entfallen ist der Schiebeladen. Oben rechts an der Fassade blickt man hinter die neu installierte Photovoltaikanlage. Vor der Fassade ist ein Baum hochgewachsen. Für die gedämmte Fassade, die Anschlüsse zum Dach, die Integration des Fensters zeigt das Bild in der gesamten Fläche eine vollständig homogene Temperatur: Es gibt keinerlei Hinweise auf Wärmebrücken (keine Setzungen, Abrisse o.ä.) oder veränderte Materialeigenschaften.

Aufnahmen der Südfassade

Die folgenden Abbildungen vergleichen die Aufnahmen jeweils der gesamten Südfassaden des Passivhauses Darmstadt Kranichstein am 01.01.2001 und am 01.01.2016. Die augenfälligen Unterschiede sind leicht zu erkennen und zu erklären:

1. In Haus IV (Westende) wurden 2015 die Schiebeläden demontiert. Dadurch sind die Reflexionen an den Alu-Beschichtungen, die in den Aufnahmen vom 01.01.2001 vor allem den kalten Himmel zeigen, verschwunden. In Abbildung 48 vom 01.01.2016 wird die Homogenität der Temperatur der Außenwandoberfläche deutlich. In beiden Bildern können bei aufmerksamer Betrachtung die Balkonbrüstungen aus Plexiglas gesehen werden. Auch diese setzen sich am 01.01.2001 wegen ihrer geringen Wärmekapazität und stärkerer Strahlungsauskuhlung aufgrund des größeren Sichtfeldes zum Himmel deutlicher ab – zumindest bei den oberen Balkonen. Das inhomogenere Temperaturfeld an unteren Balkonen erklärt sich leicht, wenn man den Effekt als Reflexion der Grenze des Nachbarhausdaches zum Nachthimmel versteht. Der „rote Fleck“ in der Mitte des Fenstersturzes im 2. OG von Haus IV ist die erwärmte Elektronik des Schiebeladens; auch dieses Detail fehlt (demontiert) in der Aufnahme vom 01.01.2016.
2. Das unterschiedliche Strahlungsklima an den beiden Tagen lassen die verschiedenen Oberflächen-Emissivitäten erkennen: Am 01.01.2001 entstand ein kontrastreiches Bild durch die unterschiedliche Auskuhlung infolge der Abstrahlung an den kalten Nachthimmel: Insbesondere reflektieren in Abbildung 46 die Scheibenoberflächen von Ober- und Dachgeschoss den kalten klaren Himmel; diese Reflexion verdeckt alle Unterschiede in den Verglasungseigenschaften - (zu beachten ist, dass in Haus II und III die Außenjalousien geschlossen sind). Wegen des geringeren Strahlungsklimakontrastes am 01.01.2016 sind hier in Haus IV die Unterschiede im Bereich der Fenster besser erkennbar: deutlich zeichnen sich die Unterschiede der Dämmwerte von Außenwand (sehr gut), Fensterrahmen (gut), Fensterglas (von Scheibe zu Scheibe etwas unterschiedlich) und Randverbund (erhöhte Verluste, Temperatur steigt bis über 7 °C an) ab.

Beide thermographischen Aufnahmen zeigen die höhere Temperatur der Fortluft aus den Auslässen.

Auch in den Thermographien der Südfassade gibt es keinerlei Hinweise auf erhöhte Wärmbrücken-Verluste oder Materialermüdung. Die Außenwand-Außenoberfläche

zeigt ein vollständig homogenes Temperaturfeld, das auch an den Kanten, den Übergängen zu Dach und Grund und an den Fensteranschlüssen nicht gestört ist. Der Vergleich mit frei stehenden Flächen (z.B. die Balkonbrüstungen, Pflanzen vor dem Haus und die Oberflächen der PV-Paneele) zeigt außerdem, dass die Wärmeverluste extrem gering sind – die Oberflächentemperatur ist kaum höher als die der frei stehenden Objekte. Die Ergebnisse für die Fenster werden im gesonderten Kapitel noch gesondert analysiert – allerdings kann auch hier schon zusammenfassend gesagt werden, dass trotz des verbauten Alu-Randverbundes die Verluste extrem gering sind – und sich dies auch 25 Jahre nach Bauerstellung immer noch ausgezeichnet abbildet.

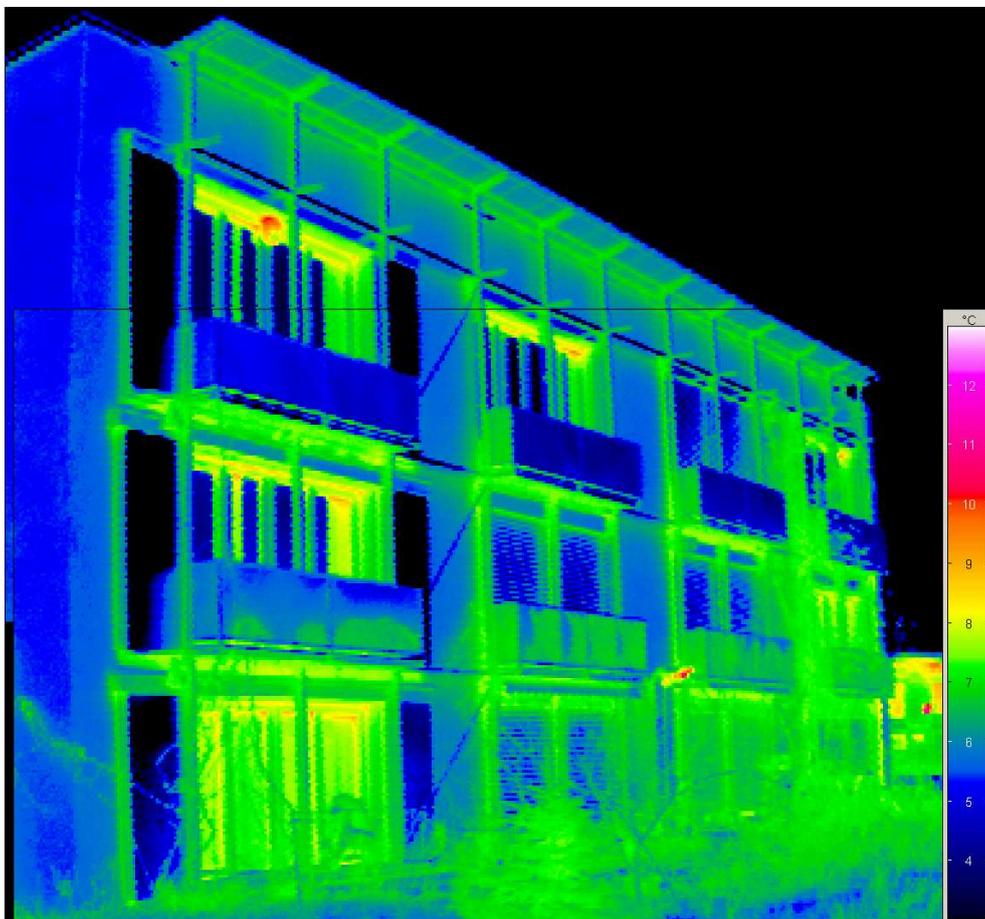


Abbildung 46: Gesamtansicht der Südseite in der Thermographie vom Januar 2001. Warme Flecken bilden die Auslassöffnungen der Fortluft der Lüftungsanlagen und die Elektronik der Schiebeläden. Die Metalloberflächen der Dämmschiebläden reflektieren den kalten Nachthimmel. Die IR-Verschattung durch die Balkonüberstände ist klar erkennbar.



Abbildung 47: Visuelle Aufnahme der Südfassade zur Thermographie im Januar 2001



Abbildung 48: Die gleiche Fassade bei der Thermographieaufnahme vom 01.01.2016. Zum Zeitpunkt der Aufnahmen war es bewölkt mit sehr niedriger Wolkenuntergrenze. Die Gegenstrahlung liegt in diesem Fall nahe an der Außenlufttemperatur; daher gibt es nun keine stark ausgeprägten IR-Verschattungseffekte. Der Dämmschiebeladen wurde durch eine Jalousie ersetzt – die Temperaturen auf der Oberfläche sind nach wie vor sehr homogen. Einzig auffällig ist die Temperatur der Fortluftauslässe links an der Westwand Fassade und im EG der Südfassade zwischen Haus II und Haus III.



Abbildung 49: Visuelles Bild zur Südwestecke passend zur Thermographie vom 01. Januar 2016

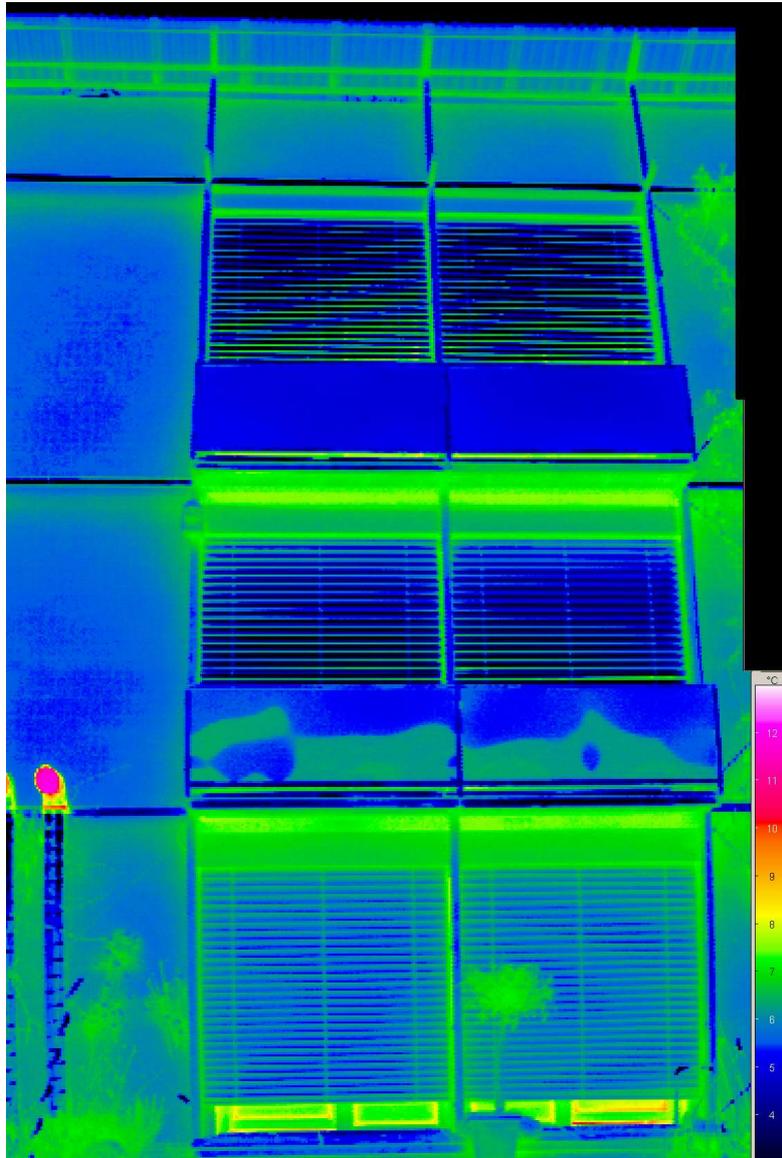


Abbildung 50: Die Thermographie vom 01.01.2001 zeigt die Südseite von Haus II (zusammengesetztes Bild). Klar erkennbar ist der Fortluftauslass; die Fortluft hat eine Temperatur von ca. 12 °C – dass diese so hoch ist, ist dem Erdreich-Wärmeübertrager zu verdanken, welcher die Außenluft zu diesem Zeitpunkt bis auf über 13 °C erwärmt, bevor sie in den Gegenstromwärmeübertrager der Wärmerückgewinnung eintritt. Dies hebt im Wärmetauscher dann auch die Fortlufttemperatur an. Oberhalb des Fortluftauslasses ist stellenweise die Struktur des Putzes aufgelöst. Auch hier ist die IR-Verschattung der Balkone gut erkennbar. Unter den Jalousien im EG sind Teile der Fenster sichtbar.

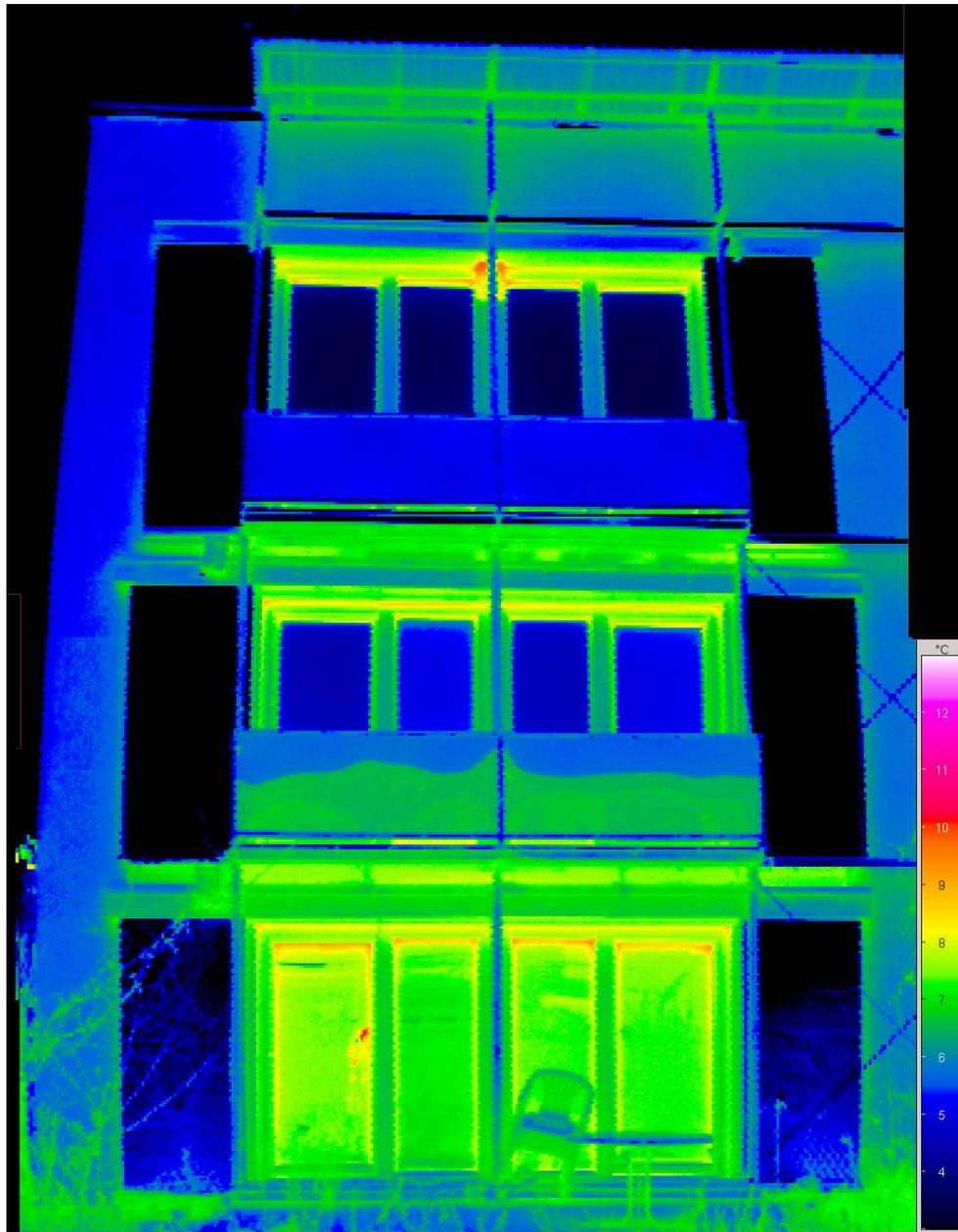


Abbildung 51: Die Thermographie vom 01.01.2001 zeigt die Südseite von Haus IV EG bis DG (zusammengesetztes Bild). Gut erkennbar sind die kräftig kalt reflektierenden Schiebeläden. In der linken unteren Fensterscheibe ist ein thermisches Spiegelbild des Thermographen sichtbar.

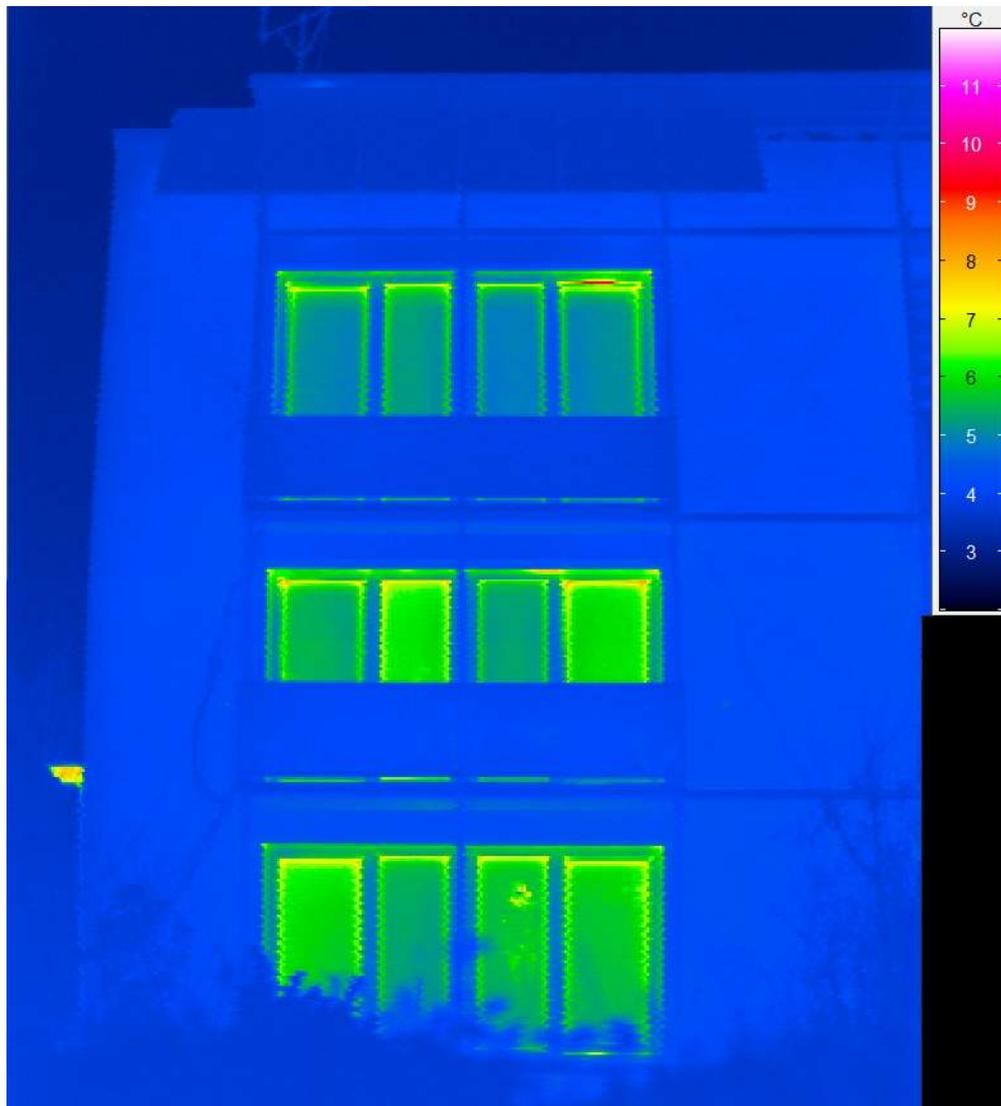


Abbildung 52: Thermographie der Südfassade von Haus IV am 01.01.2016: Durch die tiefe Bewölkung sind IR-Abstrahlungseffekte hier nur wenig ausgeprägt – eben so wenig zeigen sich Reflexionen durch die nun nicht mehr vorhandenen Schiebeläden – dafür sind die PV-Paneele am Dachfirst erkennbar; die Fassade zeigt keine Auffälligkeiten, die Verglasungen haben allerdings etwas unterschiedliche Oberflächentemperaturen – der Thermograph ist im Spiegelbild hier in der zweiten Scheibe von rechts im EG sichtbar. Im Dachgeschoss gibt es am oberen Anschlag des östlichen Fensters offenbar eine messbare Warmluft-Exfiltration (vgl. den Berichtteil zur Luftdichtheitsprüfung – die Dichtlippen in den Fenstern wurden am 12.02.2016 erneuert). Der orange Fleck links der westlichen Gebäudekante ist die Oberfläche der Ausblasöffnung des Fortluftrohres der Lüftung von Haus IV.

Aufnahmen der Ostfassade

Die Ostfassade ist im Wesentlichen eine durchgehend verputzte Außenwand mit Wärmedämmverbundsystem, einzig unterbrochen durch das eingebettete kleine Ostfenster; in Abbildung 54 und Abbildung 55 zeichnen sich jeweils zwei „Hotspots“ ab: Die vor dem Haus stehende Straßenlampe und der Fortluftauslass von Haus I. Wärmebrückeneffekte sind in keiner der Aufnahmen zu erkennen, die gesamte Putzoberfläche ist jeweils homogen im Abstrahlverhalten: Erkennbar sind nur das Fenster und die vor der Fassade stehenden Strukturen (u.a. ein Baum links unten im Bild vom 01.01.2001).



Abbildung 53: Visuelle Aufnahme der Ostseite des Passivhauses Darmstadt Kranichstein (01.01.2016)

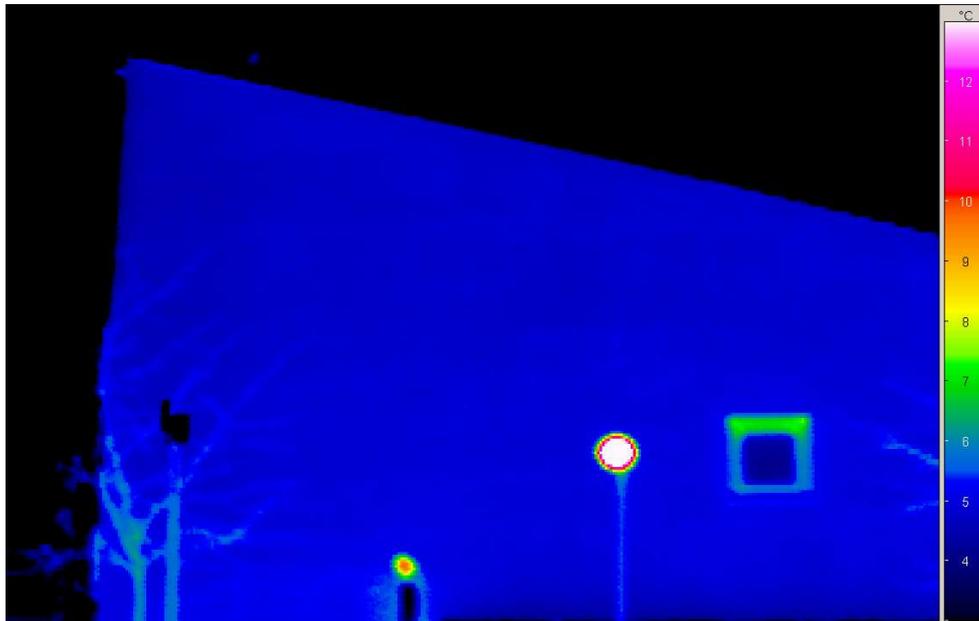


Abbildung 54: Auf der Ostseite zeichnen sich 2001 die Bäume wegen des ausgeprägten Strahlungsklimas schärfer ab. Jeweils gut erkennbar sind das Ostfenster, die warme Straßenlaterne und der Fortluftauslass. Darüber hinaus zeigt die Fassade in dieser Auflösung keine Auffälligkeiten.

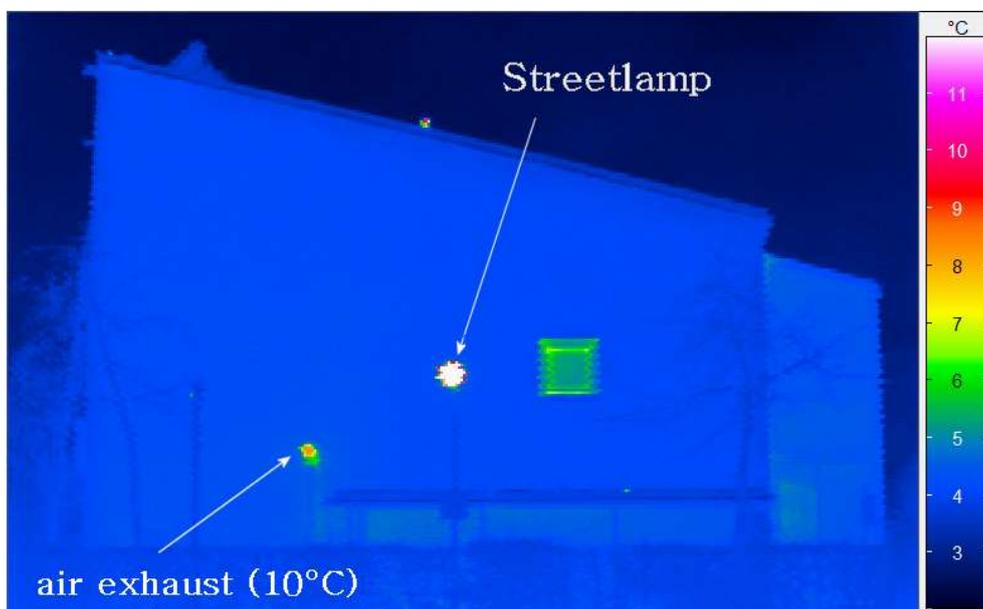


Abbildung 55: Ostseite am 1.1.2016 – durch den bedeckten Himmel weniger Kontraste bei den im freien stehenden Objekten; die Fassadendämmung erscheint gleichmäßig wärmebrückenfrei. Der durch das Dach des Kellerabgangs verschattete Bereich der Fassade rechts unterhalb des Fortluftauslasses ist um wenige Zehntel Kelvin wärmer (geringere Abstrahlung). Auf den Glasoberflächen des Glasvorbaus (rechts im Bild) sieht man Reflexe von Nachbarhäusern.

Aufnahmen der Nordfassade

Die Nordfassade des Passivhauses Darmstadt Kranichstein wird beherrscht von einem vorgebauten zweigeschossigen Glasanbau. Dieser dient der Überdachung des Kellerzugangs, als Windfang, trockener Zugang und als Material- und Stauraum. Der Glasvorbau ist unbeheizt und einfachverglast. Im Allgemeinen liegen die Temperaturen in diesem Raum um etwa 1 bis 2 K über den Außentemperaturen. Das thermische Verhalten eines solchen Wintergartens hat mit der Funktionalität des Passivhauses nichts zu tun – auch lassen sich aus dort gemessenen Oberflächentemperaturen keine Rückschlüsse auf die Qualitäten der Passivhaushülle ziehen. Die Thermographien dieser Nordseite werden hier der Vollständigkeit halber dennoch dokumentiert – sie enthalten auch Ansichten des Grasdaches und damit einer weiteren Hüllfläche.

In Abbildung 56 sind vielfältige Spiegelungen von Nachbargebäuden, Bäumen und Pflanzungen in den Glasscheiben des Vorbaus erkennbar (Aufnahme vom 01.01.2001); dies ist wieder bedingt durch das kontrastreiche Strahlungsklima in dieser klaren Nacht. Dagegen wirkt Abbildung 58 vom 01.01.2016 geradezu „langweilig“, weil hier auch alle reflektierten Oberflächen nahezu einheitliche Temperaturen haben.

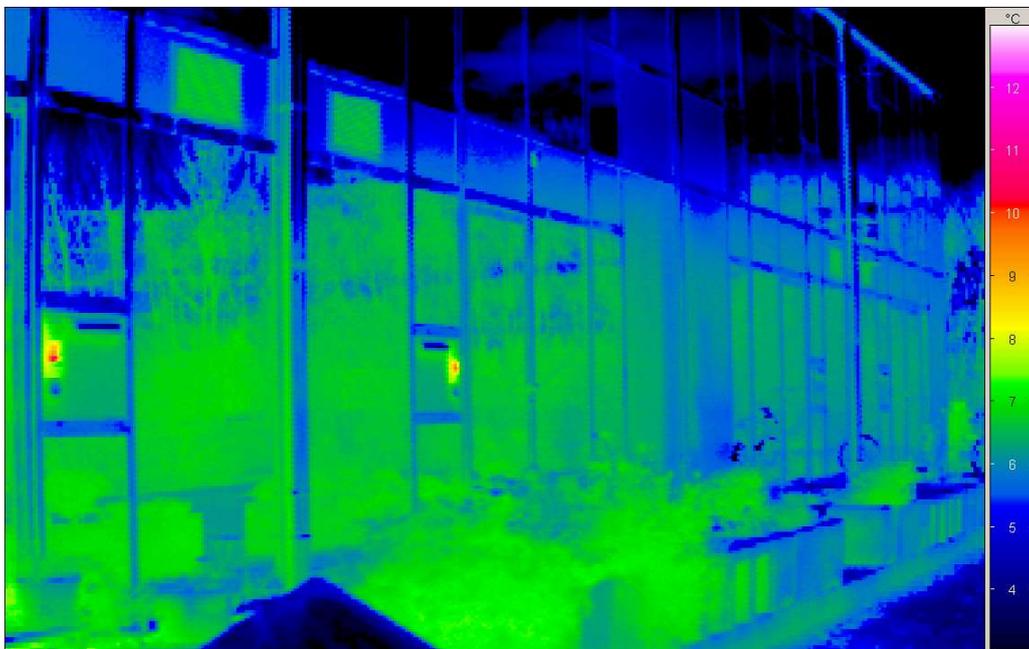


Abbildung 56: Thermographie vom Januar 2001: Nordseite mit dem Glasvorbau; erkennbar ist vor allem reflektierte IR-Strahlung. Warme Punkte sind die (beleuchteten) Haustürklingelknöpfe. Die vier rechteckigen grünen Flächen im Obergeschoss sind die Ansaugöffnungen für die Frischluft der Lüftungsanlage. Deren Temperatur ist höher – sie entspricht der Außenlufttemperatur.



Abbildung 57: Visuelle Aufnahme: Glasvorbau auf der Nordseite; auch hier gut zu erkennen: Die Gitter der Frischluftansaugung im Obergeschoss.



Abbildung 58: Thermographie vom Januar 2016: Glasvorbau auf der Nordseite. Wegen des trüben Wetters sind hier keine ausgeprägten Reflexionen erkennbar. Die Oberflächentemperatur liegt sehr nahe an der Außenlufttemperatur; daher setzt sich hier die Frischluftansaugöffnung (Gitter) kaum ab.

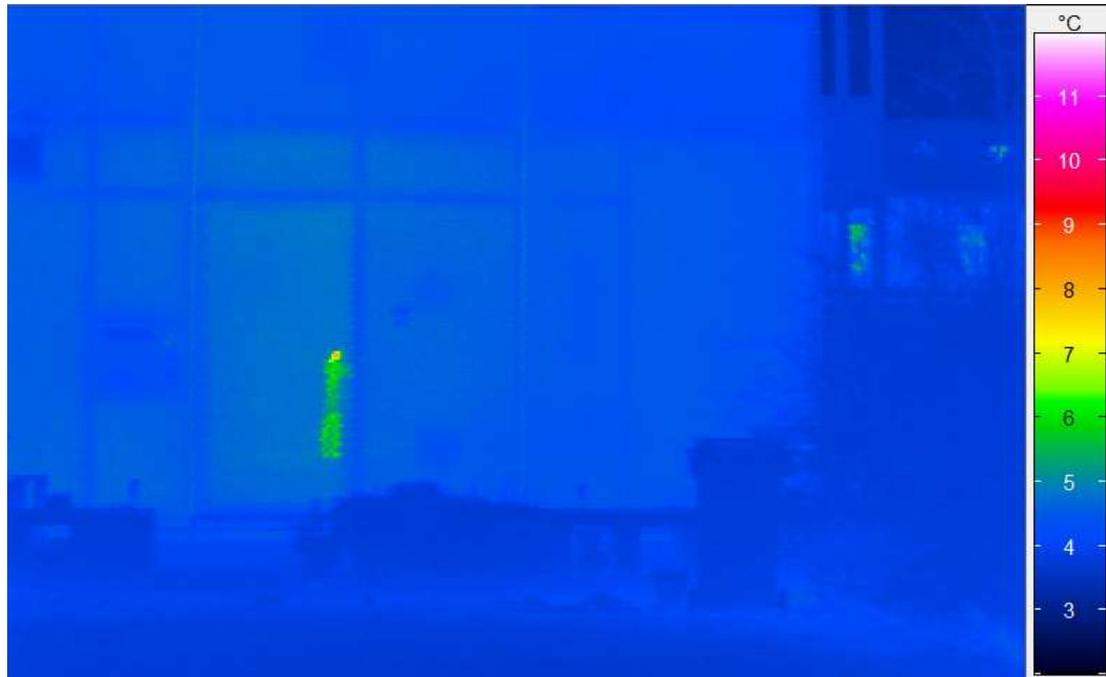


Abbildung 59: Die Aufnahme zeigt das Erdgeschoss und den unteren Teil des Obergeschosses des nördlichen Glasvorbaus, Nordwestseite (01.01.2016). Auf der rechten Seite im Hintergrund sind Nachbargebäude, im Vordergrund Blumenkrüge und eine Mülltonne (Oberflächentemperatur 3,8 °C) zu erkennen. Die Glas-Außenoberfläche erscheint geringfügig wärmer (4,4 °C), dies ist eine Folge von drei etwa gleichermaßen beitragenden Effekten: 1) Die Emissivität (Abstrahlvermögen) von Glas ist etwas geringer als das der meisten anderen Oberflächen 2) Diese Oberfläche reflektiert vor allem Wärmestrahlung von Nachbargebäuden, die leicht höhere Oberflächentemperaturen haben 3) aufgrund von thermischer Trägheit ist es im Glasvorbau in der Frühe (immer noch vom Vortag) etwas wärmer als in der Außenumgebung. Auffällig ist hier allein das thermische Reflexionsbild des Thermographen. (links leicht unterhalb der Bildmitte).

Abbildung 60 zeigt zumindest eine flache Aufsicht auf das Gründach. Auch dessen Oberflächentemperatur ist sehr homogen. Es gibt keinerlei Hinweise für verminderte Wirksamkeit der Dach-Wärmedämmung, auch nicht an den Anschlusspunkten zur Außenwand.



Abbildung 60: Obergeschoss des Glasvorbaus, Nordwestseite am 01.01.2016. Hier ist auch die Dachoberfläche mit einer sehr gleichmäßigen Temperatur von 3,6°C erkennbar. Die Gegenstrahlungstemperatur des Nachthimmels lässt sich zu 3,2°C bestimmen. Die Strahlung stammt aus relativ niedrig liegenden Luftschichten: Es herrschte zum Zeitpunkt der Aufnahme zwar kein Bodennebel, aber die Wolkenuntergrenze lag sehr niedrig.

3.3.2 Außenwand und zugehörige Anschlüsse

Der Außenwandwärmeschutz mit der durchgehenden Dämmschicht erscheint in allen Übersichtsthermographien perfekt isotherm. Die Wirksamkeit der Dämmung in der Fläche ist durch unabhängige Messverfahren wiederholt geprüft und bestätigt worden.

Abbildung 61 zeigt ein Detail der Oberfläche, aufgenommen am 01.01.2001 an der Westfassade, hier jedoch mit einer extrem hohen Temporauflösung, wie sie nur mit der Scanner-Kamera möglich ist. In dieser Auflösung sind die ca. 1 cm größeren Putzdicken an den Schwalbenschwanz-Nuten der Polystyrolplatten erkennbar. Die Oberfläche ist dort geringfügig (0,2 K) wärmer. Für den mittleren U-Wert und die Jahresnettowärmeverluste spielt dies keine Rolle.

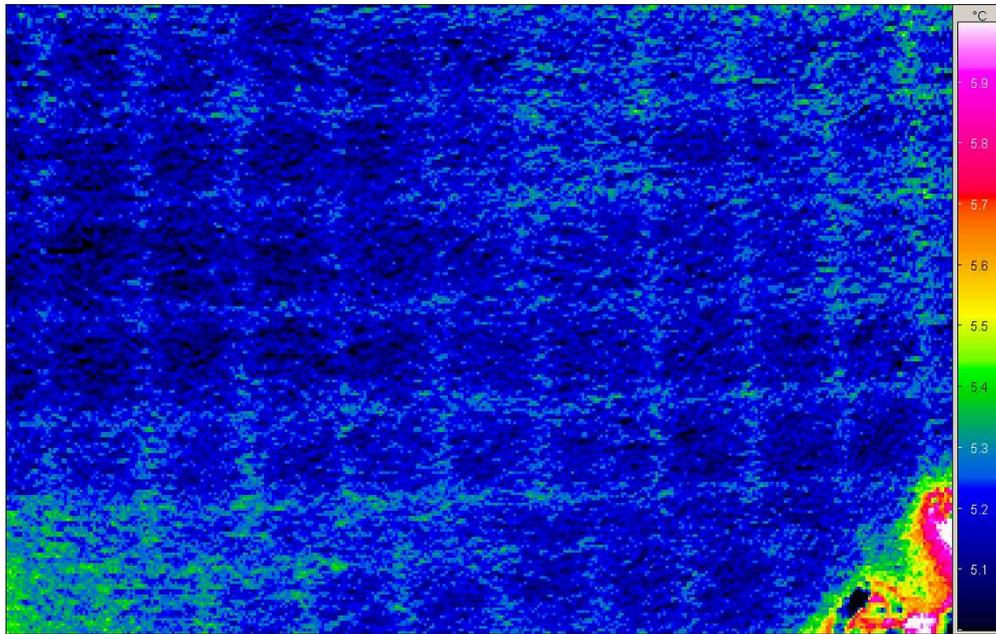


Abbildung 61: Bei extrem hoher Temporauflösung sind im Detail der Außenwand die Schwalbenschwanz-Rillen in den EPS-Dämmplatten (die der Verkrallung des Putzes dienen) sichtbar. Dort sind durch die dickere Putzschicht der U-Wert etwas verringert und die Wärmekapazität etwas erhöht; der maximale Temperaturunterschied beträgt 0,2 Kelvin

Der **Anschluss Außenwand/Dach** ist umlaufend wärmedämmend und wärmebrückenfrei geplant und ausgeführt. In Abbildung 62 ist die Thermographie im Bereich des oberen Abschlusses der Südfassade dokumentiert. Es gibt auch hier keinerlei Hinweis auf erhöhte Wärmeverluste – der wärmebrückenfreie Anschluss funktioniert auch nach 25 Jahren wie geplant (berechneter linearer Wärmbrückenverlustkoeffizient $-0,061$ W/(mK)). Erkennbar sind hingegen die metallischen Strukturen (Verblechung des Dachrandes, verzinkte Stahlträger der Balkontragkonstruktion) durch ihre höhere IR-Reflexion und die dadurch sichtbare Spiegelung kälterer Umgebungsbereiche. Die Anschlusslösung ist einfach und kostengünstig ausführbar, offensichtlich dauerhaft beständig und von bestmöglicher thermischer Qualität. Sie kann daher für den Bereich AW/Dach im Massivbau generell empfohlen werden.

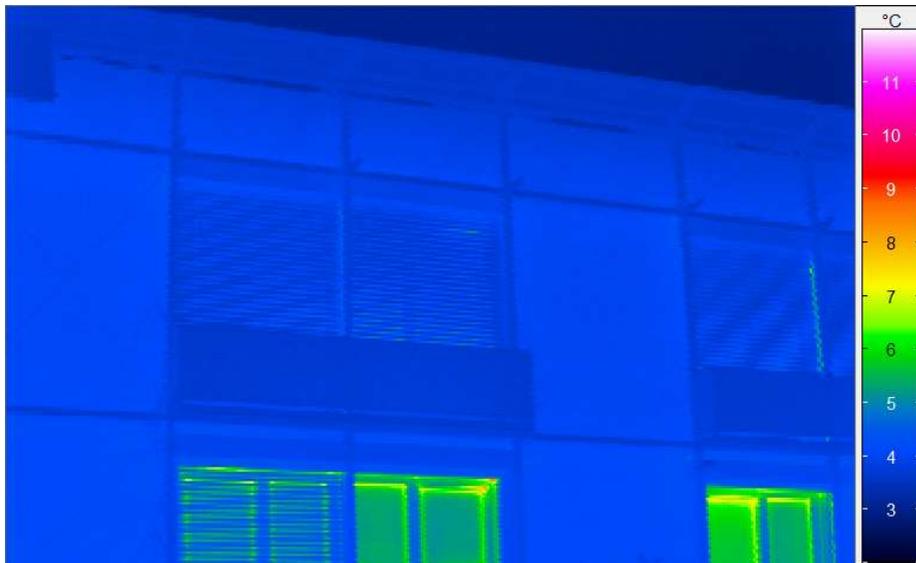


Abbildung 62:
Anschluss Außenwand/Dach am First (vom 01.01.2016): Erwartungsgemäß fallen die äußeren Oberflächentemperaturen an der Kante leicht ab (Geometrie-effekt). Der deutlich dunklere Streifen ist allerdings ein Reflex des Himmels an der metallischen Dachrandeinfassung



Abbildung 63:
Anschluss Außenwand/Dach zugehöriges visuelles Bild. Zu beachten sind auch die unterschiedlichen Jalousie-Stellungen, die im thermischen Bild kontrastreich hervortreten. Der Wärmestrom wird bei geschlossener Jalousie zu einem bedeutend höheren Umfang durch Konvektion abgeführt.

Der Anschluss zwischen zwei Außenwanddämmebenen wurde (und wird), wie bei WdVS allgemein eingeführt, unterbrechungsfrei und damit wärmebrückenfrei ausgeführt, Abbildung 64 zeigt die Thermographieaufnahme nach 25 Jahren. Beachtenswert ist, dass an dieser Wetterseite der Fassade keinerlei Hinweise auf Materialveränderungen, erhöhte Feuchtigkeit oder Ähnliches vorliegen. Das Detail ist in einem

einwandfreien Zustand, die Ausführung in dieser Form kann generell empfohlen werden, sie ist kostengünstig und dauerhaft.

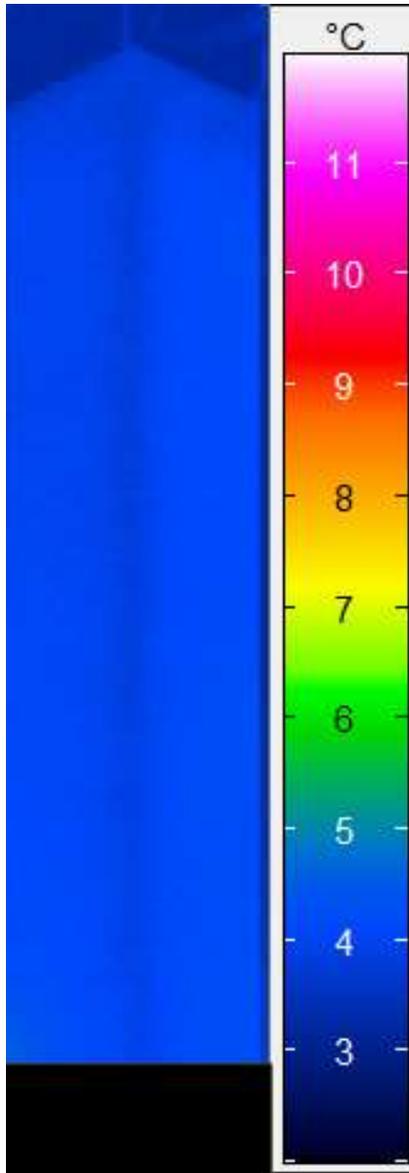


Abbildung 64: Außenwandkante (Südwest-Kante)

Die Aufnahme zeigt die Südwest-Kante AW/AW. Hier gibt es eine durchgehende, nicht durchstoßene Wärmedämmung. Entsprechend der geometrischen Effekte nimmt die Oberflächentemperatur wie erwartet zur Kante hin ab. Die Temperaturdifferenzen sind allerdings wie erwartet gering, so dass kleine Unterschiede in der Putzdicke und im Feuchtegehalt des Putzes (dies ist **die** Wetterkante des Gebäudes) sich überlagern. Der Wärmebrückenverlustkoeffizient an dieser Stelle ist ebenfalls negativ, $-0,062 \text{ W/(mK)}$; d.h., die Wärmeverluste sind geringer als mit dem U-Wert über das Außenmaß berechnet. Die Anschlüsse zum Giebel und zum First sind hier nochmals erkennbar. Die Aufnahme liefert keinerlei Hinweise auf Wärmebrücken oder durch Materialveränderung erhöhte Wärmeverluste. Das verwendete Detail entspricht auch den heute bei Passivhaus geeigneten WdVS üblichen Ausführungen – diese sind kostengünstig, haben sich bewährt und können so weiter empfohlen werden.

Zur optimalen Ausführung des Fußpunktes der Außenwand gibt es immer wieder heftige Diskussionen. Heute nimmt man dort in der Regel einen Materialwechsel zu XPS vor, um evtl. erhöhten Feuchtebelastungen besser gewachsen zu sein. Im hier verwendeten Detail ist nur eine doppelte mineralische Putzschicht verwendet worden – wie Abbildung 65 zeigt, befindet sich der

Anschluss in einem einwandfreien und schadensfreien Zustand. Die hier verwendete Lösung (vgl. auch Abbildung 34) mit einem lastabtragenden KS-Yali-Stein wird auch im Folgenden noch einmal genauer beleuchtet – sie führt zu einer sehr kostengünstigen wärmebrückenfreien Lösung ($\Psi = -0,039 \text{ W/(mK)}$), die auch nach 25 Jahren in einem unverändert einwandfreien Zustand ist.

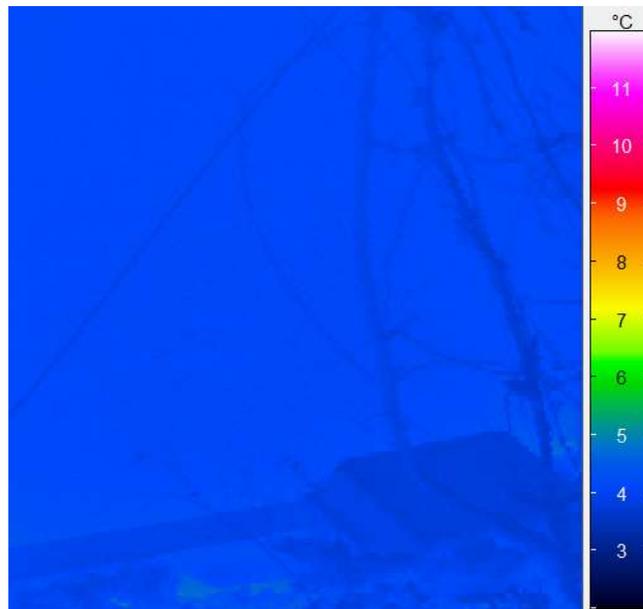


Abbildung 65: Anschluss Außenwand/Boden. Die Aufnahme zeigt den Übergang der AW-Dämmung in die Perimeterdämmung; nach vorn ist der Boden erkennbar: hier liegt ein mit Kies verfüllter Drainagestreifen vor. In diesem Bereich wurde beim Bauprojekt das Dämmmaterial nicht gewechselt, nur eine doppelte mineralische Putzschicht ausgeführt. Die Thermographie zeigt keinerlei Auffälligkeit.

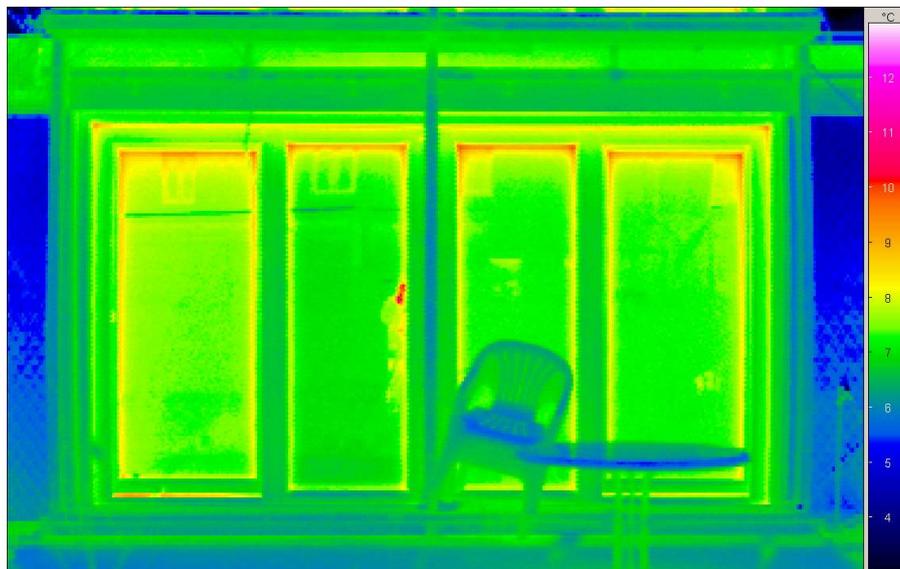


Abbildung 66: Januar 2001: Die Fenster im EG von Haus IV. Stuhl und Tisch im Vordergrund können für Referenzzwecke (Oberflächentemperatur im freien stehender Flächen) verwendet werden. Deutlich ist die Temperaturerhöhung am Scheibenrand (Aluminium-Randverbund) erkennbar. Auch die Oberflächen-Prägestruktur auf den Schiebeläden zeichnet sich ab (rechter und linker Bildrand).

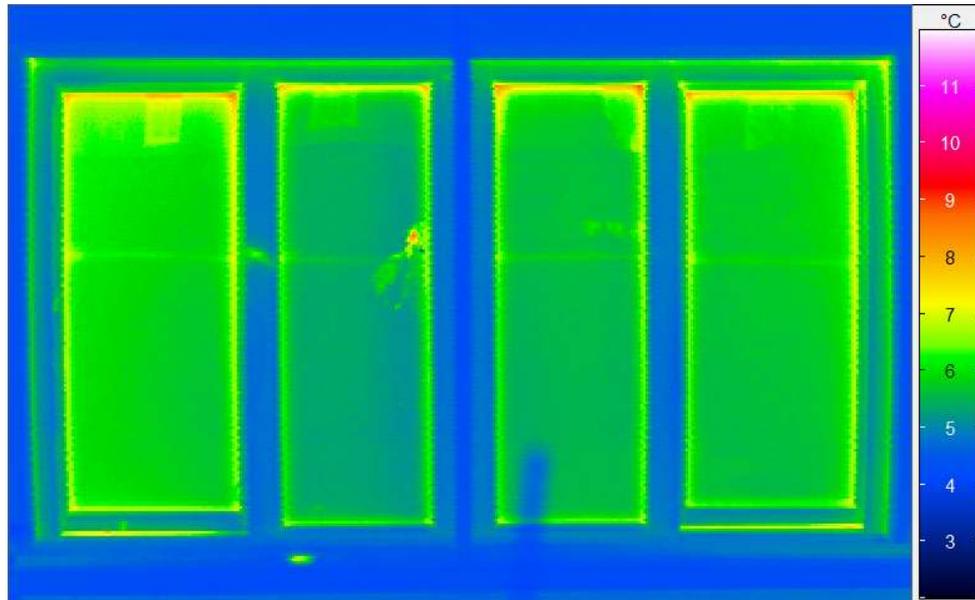


Abbildung 67: Im Thermographiebild vom 01.01.2016 steht der Thermograph nahezu an der gleichen Stelle (Spiegelbild), bei genauer Betrachtung sind auch die Spiegelbilder der Fassade des südlichen Nachbarhauses im oberen Bereich erkennbar. Gegenüber dem Bild von 2001 gibt es keine spürbare Veränderung – außer den fehlenden Schiebläden. Der grüne Fleck unter dem 2. Fenster von links ist der zur Kalibrierung verwendete Temperaturlogger. Der horizontale Streifen auf dem Fenster rührt vom Kreppband her, das zu Kalibrierzwecken aufgeklebt wurde.

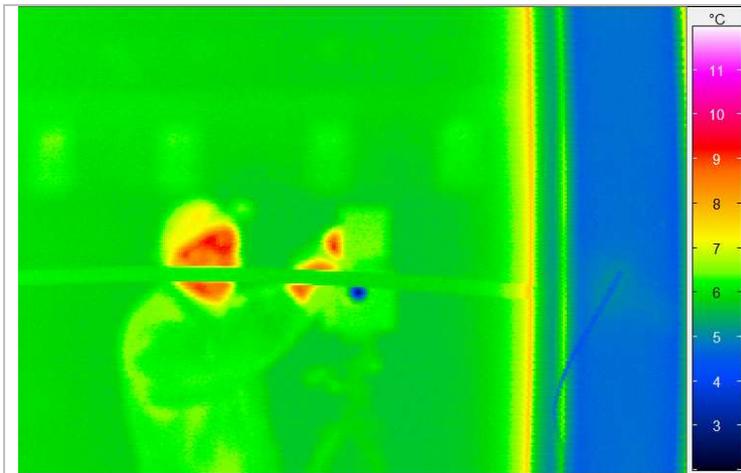


Abbildung 68: Das erste Südfenster von Westen im EG im Detail. Zu beachten ist die IR-Spiegelungen auf der Scheibe. Diese werden durch den Kreppband-Streifen unterbrochen, der ein höheres Emissionsvermögen und nur diffuse Reflexion aufweist. Deutlich erkennbar ist die Temperaturerhöhung am Glasrand durch den Aluminium-Randverbund, der trotz des hohen Glaseinstandes durchschlägt. Die blaue Linie am Rahmen rechts gehört zu einem Pt100-Temperatursensor, der zur Kalibrierung eingesetzt wurde und der zum Zeitpunkt der Thermographie 5,88°C anzeigte. Die von der Thermographiekamera ausgewiesenen Werte liegen durchweg um etwa 1 Kelvin niedriger (das liegt im Rahmen der ausgewiesenen Messgenauigkeit der Kamera; die relative Genauigkeit zwischen Bildpunkten ist deutlich höher).



Abbildung 69: Visuelle Aufnahme zur nebenstehenden Thermographie.

3.3.3 Wärmeverluste zum Keller – Thermographie von den Kellerräumen aus

Das Passivhaus Darmstadt Kranichstein hat unbeheizte Kellerräume: Sie dienen auf der Nordseite individuell als Lagerräume sowie auf der Südseite als Gemeinschaftsräume: Heizraum, Waschküche, Wäschetrockenraum und Fahrradkeller. Der Keller ist thermisch durch eine Dämmung an der Unterseite der Kellerdecke vom warmen Wohnbereich getrennt. Durch diese Kellerdeckendämmung dringen die tragenden Kellerwände hindurch: Allerdings wurden als oberste Steinreihen belastbare KS-Yali-Steine mit verringerter Wärmeleitfähigkeit gewählt, so dass die Zusatz-Wärmeverluste begrenzt sind. Diese Konstruktionsweise hat sich bewährt und ist besonders kostengünstig (der Leichtbaustein für die thermische Trennung kostet nur wenig mehr als die KS-Standard-Konstruktion und wird aber nur in einem ca. 50 cm Streifen unmittelbar unter der betonierten Kellerdecke benötigt. Heute werden hier vor allem Porenbetonsteine eingesetzt, die es mit unterschiedlichen Tragfähigkeiten gibt).

Im Keller stellen sich im Januar durch die nachströmende Wärme über die Kellerdecke und aus dem vom Vorjahr noch warmen Erdreich Temperaturen zwischen 11 und 13 °C ein. Abbildung 70 und Abbildung 71 zeigen, dass die Kellerdeckendämmung in der Fläche einen nur geringen Wärmeverlust zum Keller hin aufweist. Die an der Oberfläche gemessenen Temperaturen liegen nur wenig über den Temperaturen des jeweiligen Kellerraumes. Wärmequellen im Keller, wie z.B. die Kellerbeleuchtung, haben sich kontrastreich durch ihre hohen Oberflächentemperaturen ab. Die Kellerbeleuchtung bestand zum Zeitpunkt der Aufnahme aus vier Kompakt-Fluoreszenz-Lampen.

„Bunte Bilder“ ergeben sich dort, wo schlecht gedämmte Außenbauteile (die Gemeinschafts-Kellerzugangstür, Abbildung 72 – hier lohnt sich im unbeheizten Keller eine besser gedämmte Tür nicht) und kontinuierliche Standby-Verluste (Zählerschränke des Haus-Stromanschlusses) nebeneinander liegen.

Von der Kellerseite aus lässt sich die Wirkung der thermischen Trennung durch die KS-Yali-Steine besser dokumentieren als von außen. Abbildung 73 zeigt die zugehörige Thermographie. Die (nur wenig gedämmte) Kelleraußenwand weist innen eine Oberflächentemperatur von um 12,2°C auf; an der Kellerdecke herrschen, im Wesentlichen durch den Wärmestrom von oben, ca. 13,25°C. dort, wo der KS-Yali-Stein die Kellerdeckendämmung durchdringt, liegen infolge der Wärmebrückenwirkung die höchsten Temperaturen von bis zu fast 14°C vor.

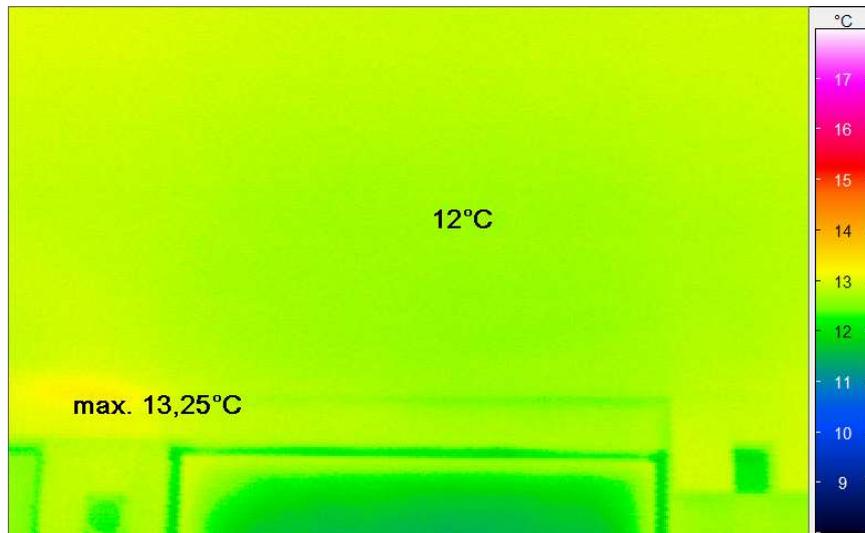


Abbildung 70: Die Thermographie der Unterseite der Kellerdecke (hier im nordwestlichen Kellerraum) zeigt ebenfalls sehr homogene Temperaturen, hier um 12°C. Die Deckenuntersicht ist durch eine armierte Spachtelung auf der Dämmplatte der Kellerdeckendämmung (von unten) gegeben. Diese Spachtelung weist nach Sichtkontrolle im gesamten Keller keine Veränderung gegenüber dem Neuzustand auf. Die leichte Temperaturerhöhung an der linken Bildseite rührt von dem dort durch die Dämmung durchtretenden Zuluftrohr (Wickelfalzrohr aus Stahlblech) her; die Zuluft hat eine Temperatur von um 19°C. Der Wärmeverlust durch die Kellerdecke beträgt im Mittel etwa 1,1 W/m² zum Zeitpunkt der Messung.



Abbildung 71: Im Mittelgang des Kellers liegen die Raumtemperaturen etwas höher. Die Kellerdecke weist hier an der Unterseite etwa 13,5°C auf. Die etwas wärmeren „Streifen“ sind geometrische Effekte (vertikale Kanten bekommen mehr Zustrahlung von der Decke selbst und weniger vom kälteren Boden). Klar erkennbar sind die Kellerlampen (links) und die von ihnen aufsteigenden Warmluftströme.

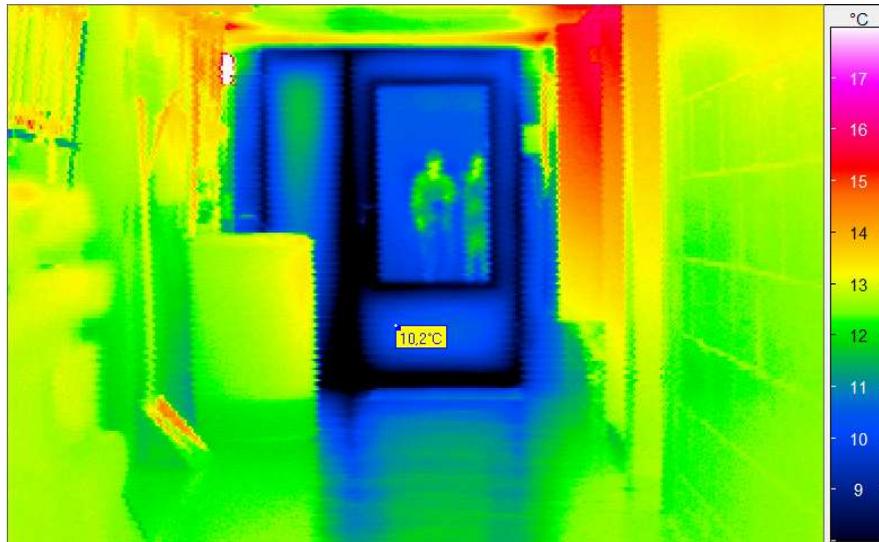


Abbildung 72: Besonders auffällig ist die niedrige Oberflächentemperatur der Kellereingangstür. Da der Keller unbeheizt ist, handelt es sich um eine konventionelle Metalltür – diese hat einen hohen U-Wert und ist nicht besonders dicht, so dass die Temperaturen hier auf bis unter 8°C absinken. Im Türglasausschnitt das thermische Reflexbild des Thermographieteams; links oben neben der Tür eine der Kellerlampen (weiß), rechts neben der Tür das Gehäuse des Hausstromverteilers; in diesem gibt es diverse Stromverbraucher (z.B. Netzteil für die Haustürklingeln), wodurch seine Oberfläche erwärmt ist (ca. 15°C). Der Kellerboden zeigt thermische Reflexe der Eingangstür, er weist ansonsten eine Temperatur von ca. 11°C auf.

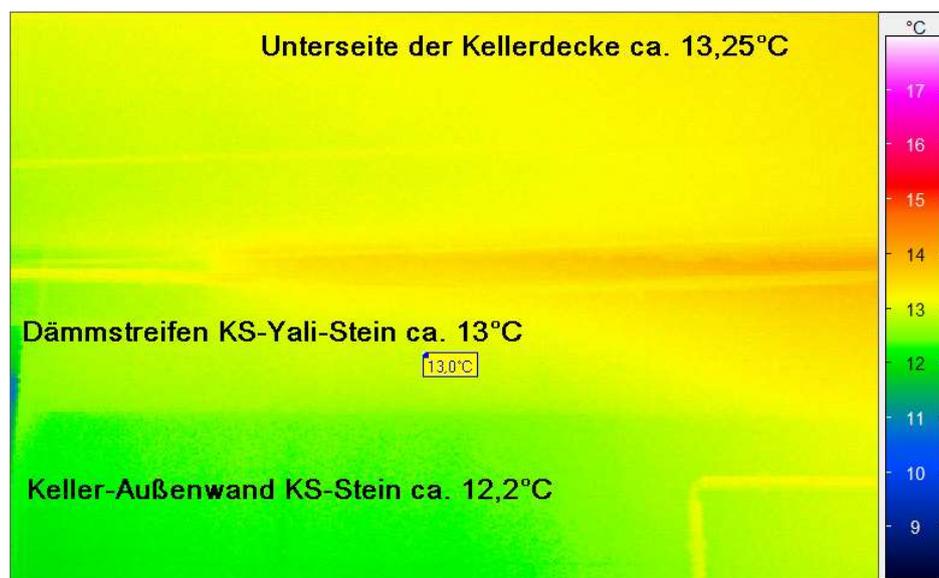


Abbildung 73: Die Thermographie zeigt die Durchtrittsstelle der Außenwand durch die Dämmung der Kellerdecke; die Wirkung des thermischen Trennsteins (KS-Yali) mit erhöhter und abnehmender Oberflächentemperatur in der Kante ist erkennbar; weil die Kellertemperatur zum Zeitpunkt dieser Aufnahme noch sehr hoch war, ist der Effekt aber nicht auffällig.

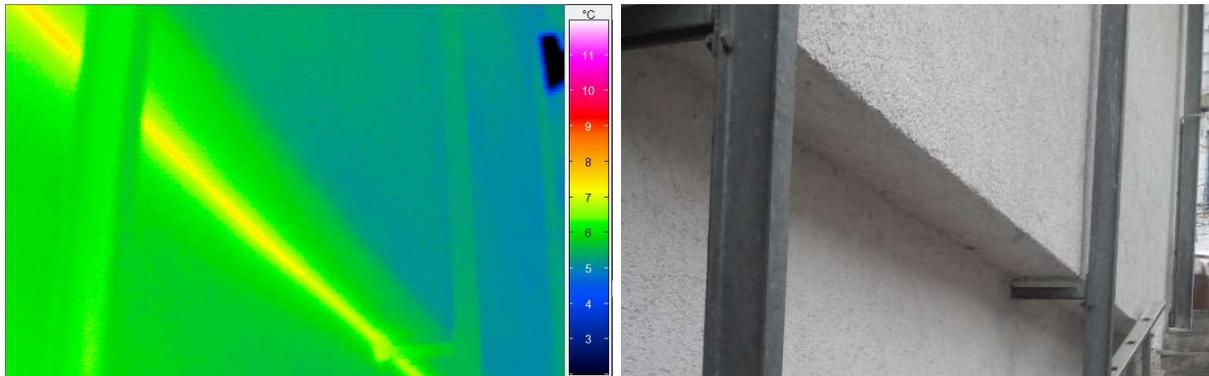


Abbildung 74: Die Aufnahme zeigt den unteren Abschluss der Außenwanddämmung im Bereich der gemeinsamen Erschließungstreppe (Ostwand), die ins Kellergeschoss führt. Unterhalb der 27,5 cm Dämmung der Außenwand zum beheizten Bereich schließt eine nur 5 cm dicke Dämmlage der Keller-Außenwand an. In der Hohlkante des Anschlusses ist die Temperatur um ca. 1 K erhöht (gelb); der zugehörige Wärmestrom kommt vor allem aus dem Keller, der zu diesem Zeitpunkt um 12°C aufwies. Die Oberflächentemperatur der gedämmten Außenwand beträgt etwa 5,5°C.

Zusammenfassende Bewertung der Thermographie von der Kellerseite: Die Kellerdeckendämmung erfüllt ihre Funktion auch nach 25 Jahren genau wie projiziert. Es gibt keine Hinweise auf erhöhte Wärmeverluste oder Wärmebrücken, die über die rechnerisch vorausbestimmten Werte für die Außenwände und die tragenden Wohnungstrennwände hinausgehen ($\Psi_{\text{TRB}} = 0,061 \text{ W}/(\text{mK})$). Alle Bestandteile der Konstruktion sind trocken und erfüllen ihre Funktion wie unmittelbar nach Fertigstellung. Die hier verwendeten Ausführungsdetails (vgl. Abbildung 34) können uneingeschränkt empfohlen werden – sie sind zudem kostengünstig und einfach ausführbar.

3.3.4 Innenthermographie

Thermographische Aufnahmen der inneren Oberflächen von Hüllflächenbauteilen können in einer Reihe von Fällen ungleichmäßige und ungeplante Wärmeverluste leichter detektieren als IR-Aufnahmen von außen. Eine Ursache dafür ist, dass der innere Wärmeübergangswiderstand i.a. deutlich größer ist als der äußere (ein Faktor 3 bis 4 ist hier typisch), so dass sich innenseitig höhere Temperaturdifferenzen ergeben, die dadurch leichter auflösbar sind.

Thermographische Innenaufnahmen sind auch nicht an Zeiträume wie die späten Nachtstunden gebunden – allerdings sind Zeiten mit starker Sonneneinstrahlung oder erhöhter Aktivität in den Innenräumen für Aufnahmen, die Aussagen über die bauliche Qualität machen sollen, ebenfalls ungeeignet.

Die im Folgenden dokumentierten Aufnahmen (alle Haus IV) wurden überwiegend in den Morgenstunden (07:50 bis 11:15 Uhr) des 01.01.2016 im unmittelbaren Anschluss an die Außenthermographie gemacht. Es handelte sich um einen trüben und durchgehend bedeckten Tag. Die operativen Innenraumtemperaturen betragen während der Aufnahmen:

Im Erdgeschoss	21,2 °C
Im Obergeschoss, Südräume	21,3 °C
Im Obergeschoss, Bad	23,4 °C
Im Obergeschoss, Nordräume	21,5 °C
Im Dachgeschoss, Südräume	21,5 °C

Die inneren Oberflächentemperaturen aller opaken Außenbauteile (Dach, Wand, Boden) liegen im gesamten Haus unter diesen Randbedingungen auch an den geometrisch ungünstigsten Punkten über 19,2 °C. Das bedeutet, dass an keiner Stelle der Außenhülle im Innenraum Wasseraktivitäten von mehr als 60% herrschen – unter diesen Umständen gibt es keinerlei Gefahr für Schimmelwachstum – ein entscheidender Vorteil der gut gedämmten Passivhaus-Hülle.

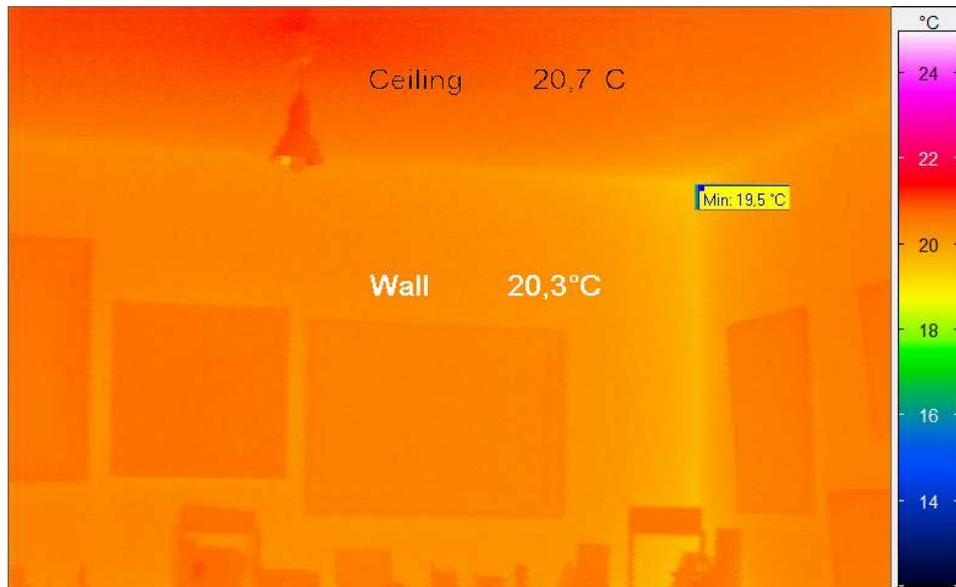


Abbildung 75: Die Innenthermographie der Nordwest-Außenwanddecke im EG zeigt erwartungsgemäß die geometrische Wärmebrückenwirkung. Wegen des sehr geringen Wand-U-Wertes von $0,137 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ sinkt die Temperatur allerdings auch in der Kante nicht unter $19,5 \text{ °C}$ ab. Die Temperatur an der Decke liegt nur wenig über der der Außenwand ($20,3 \text{ °C}$), die Raumtemperaturschichtung ist somit gering. Alle Ergebnisse der Thermographie der Außenwände zeigen keine Auffälligkeiten und geben die nach der mehrdimensionalen Berechnung der Temperaturfelder bestimmten Projektierungswerte wieder (beachte: Die Deckenlampe ist nicht in Betrieb und nimmt daher Werte im Bereich der Raumtemperatur an).

Bei so hohen Oberflächentemperaturen ist außerdem das Strahlungsklima überall ausgeglichen, es gibt somit ideale Bedingungen für bestmöglichen thermischen Komfort. Ebenfalls zeigen die Aufnahmen keinerlei Hinweis auf erhöhte Infiltration; die Putzschichten und die Anschlussdetails zwischen Wand und Dach sowie Wand und Boden sind offenbar auch nach 25 Jahren einwandfrei luftdicht (vgl. dazu auch das Kapitel zur Luftdichtheit).

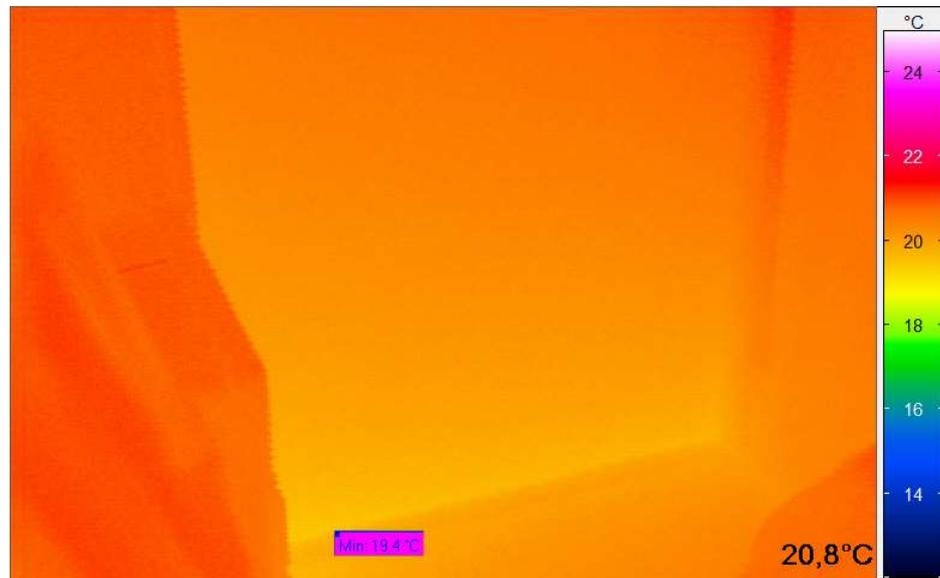


Abbildung 76: Die Thermographie zeigt den Fußpunkt der Außenwand (Anschluss an die Kellerdecke); auch hier sinkt die Temperatur nicht unter $19,4^{\circ}\text{C}$ (entlang der Kante) ab; die Fußbodentemperatur liegt bei etwa $20,3^{\circ}\text{C}$; links und vorne rechts im Bild ist Mobiliar, das in etwa die mittlere Strahlungstemperatur im Raum aufweist (um 21°C). Soweit zugänglich, wurde dieser gesamte Anschlussbereich thermographisch untersucht; alle Ausschnitte zeigen ein ähnliches Bild, es gibt keine Auffälligkeiten.

Längerfristige Veränderungen könnten z.B. beim Anschluss des Einblasdämmstoffes im Dach an die Außenwand im First auftreten (Setzungen bzw. Feuchtigkeitsänderungen). Abbildung 77 zeigt beispielhaft diese Anschlussstelle im Dachgeschoss im Gästezimmer des Endhauses: die geometrische Wirkung des zweidimensionalen Wärmestroms von Außenwand und Dach ist durch eine geringfügig niedrigere Temperatur ($0,7\text{ K}$) erkennbar (Außentemperatur um 4°C , operative Innentemperatur $21,7^{\circ}\text{C}$). Das entspricht der numerischen Wärmebrückenberechnung – es gibt keinen Hinweis auf eine Zunahme der Wärmeverluste nach 25 Jahren Nutzung.

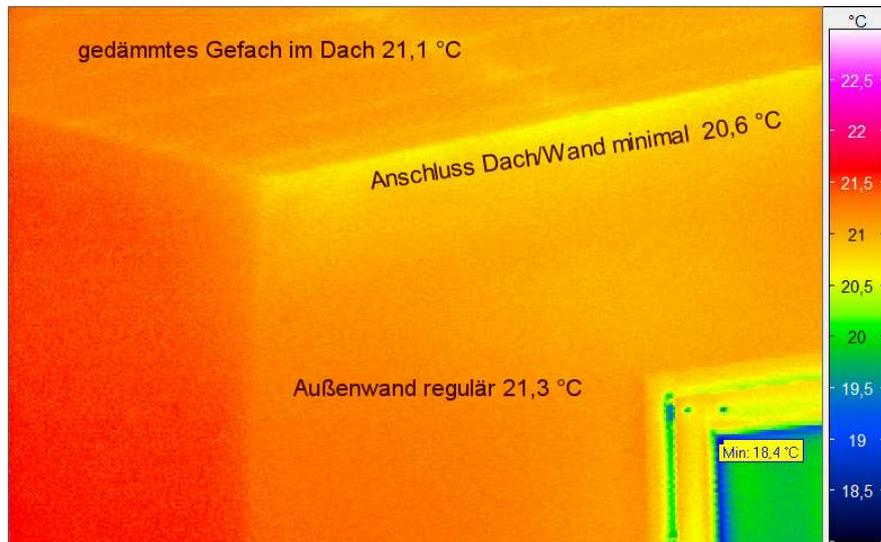


Abbildung 77: Innen-IR-Thermographie des Anschlusses Außenwand/Dach (01.01.2016): Die Temperaturen der regulären Oberflächen (um 21 °C) unterscheiden sich kaum von der mittleren operativen Temperatur im Raum. Gut ist die geometrische Wärmebrücke am Anschluss Dach/Wand (First) erkennbar; die Temperaturen fallen nicht unter 20,6 °C, überall liegen hygienisch einwandfreie Verhältnisse vor. Bei genauer Betrachtung kann die Konterlattung als geringfügige Schwächung im Dach erkannt werden (geht in Berechnung U-Dach mit ein).



Abbildung 78: Thermogramm aus dem Arbeitszimmer, dem Raum in der Dachgeschoss Nord-west-Ecke. Die operative Raumtemperatur liegt hier um 21,5 °C; in der Kante fallen die Temperaturen bis auf minimal völlig unkritische 20,8 °C ab. Das Kabel im Bild ist die Zuleitung zum Oberflächentempersensor, der unterhalb des Wärmestromsensors angebracht ist. Überhaupt nur im hoch temperaturlösten Bild sind die Temperaturverläufe an der Außenwandkante (geometrische Wärmebrücke Außenwand Süd an Außenwand West) erkennbar.

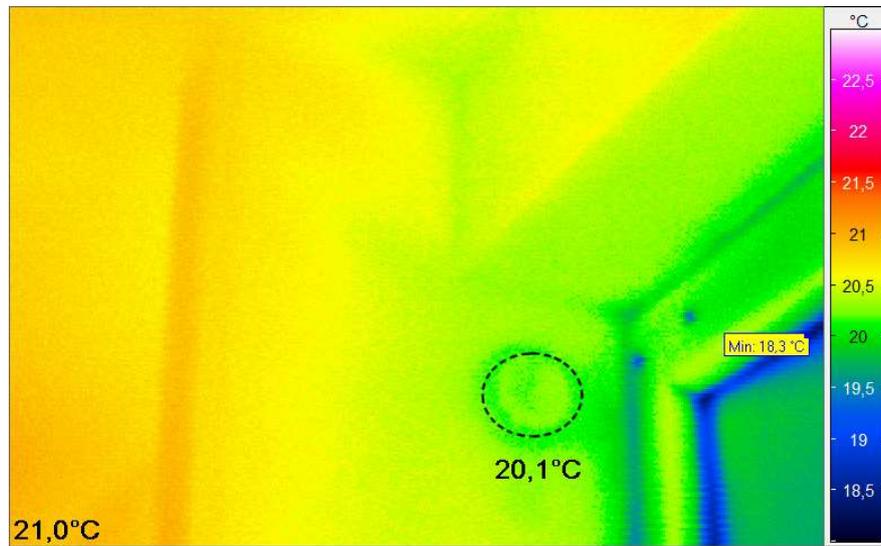


Abbildung 79: Die Untersuchung zur Lüftungsanlage (vgl. Abschnitt 6.1) zeigt, dass die Wärmerückgewinnung von mehr als 80% zusammen mit der Erdschichtvorwärmung zu Zulufttemperaturen führt, die sehr nahe an der Raumlufttemperatur liegen. In der dokumentierten Thermographie beträgt die operative Raumtemperatur etwa 21 °C; die ausströmende Zuluft (etwa 30 m³/h oder 8 Liter/s) kühlt den Ring des Zuluftventils auf etwa 20,1 °C ab. Diese Temperaturänderung fällt neben den Wärmebrückeneffekten des Randverbundes der Verglasung nicht auf.

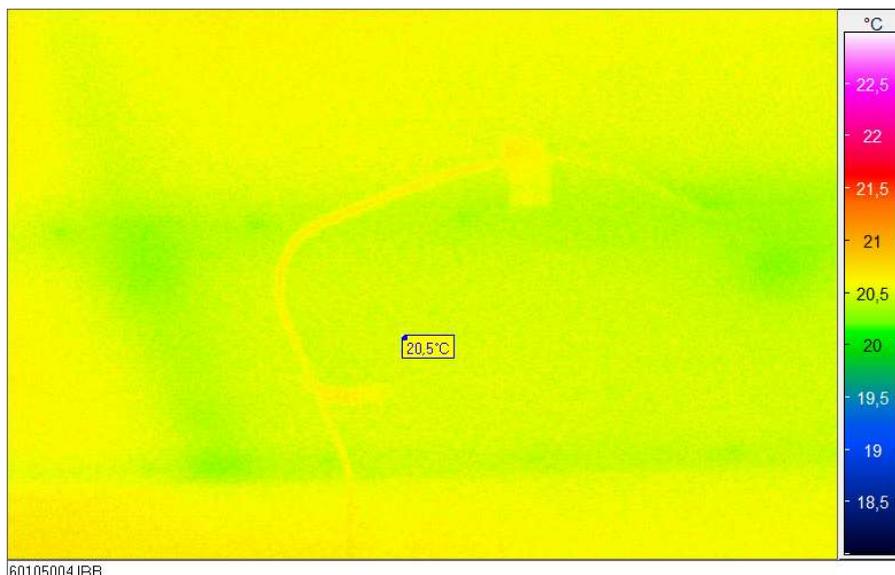


Abbildung 80: Am 05.01.2016 wurde diese hoch temperaturlaufgelöste Thermographie im Bereich der Temperatur- und Feuchtemessstelle im Dach erstellt. Neben dem Kabel der Messfühler sind die geringfügigen Temperaturabsenkungen durch die Sparren (geneigte grüne Fläche) und die Konterlattung (horizontale grüne Streifen) zu erkennen. Die Fühlerkette liegt sehr nahe an einer Konterlatte.



Abbildung 81: Visuelles Bild mit der Datenaufnahme zu Temperatur und Feuchtigkeit im Dach

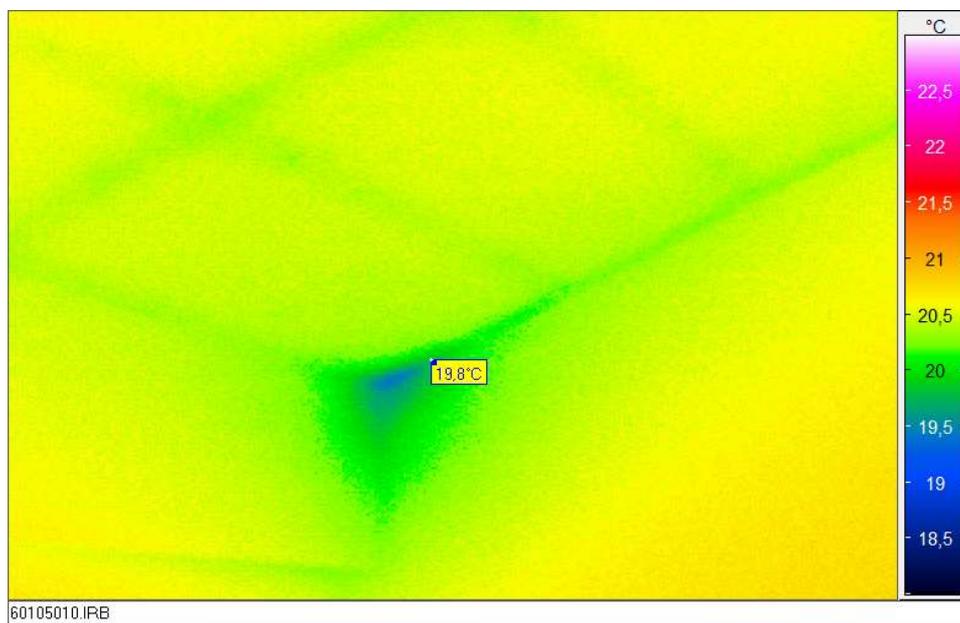


Abbildung 82: Thermographie von weiteren Bereichen des Anschlusses Dach/Trennwand. An der gekennzeichneten Stelle war bereits nach Baufertigstellung eine Schwachstelle (zu wenig Dämmstoff eingeblasen) festgestellt worden. Der Bereich ist nachgebessert worden, es ist aber gut zu erkennen, dass hier nach wie vor eine geringe Wärmebrücke vorliegt.



Abbildung 83: Zugehörige visuelle Aufnahme vom Bereichen des Anschlusses Dach/ Trennwand.

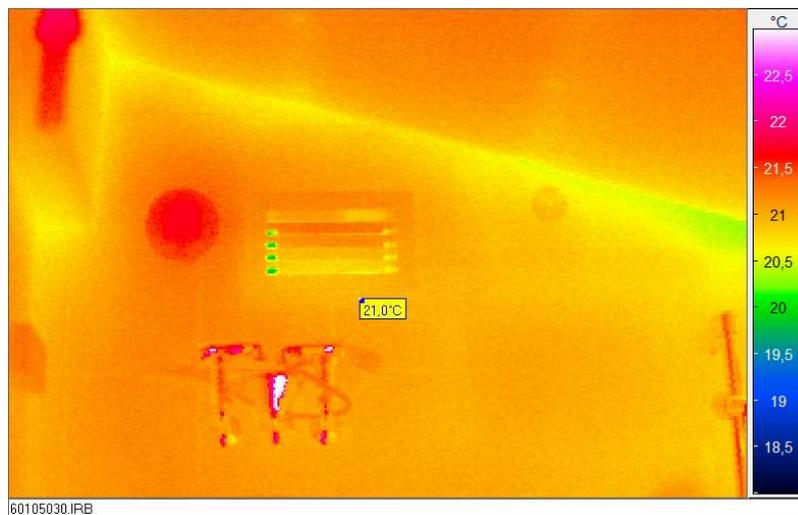


Abbildung 84: Duschbad im DG; die Temperatur im Raum beträgt etwa 21,6 °C; die Außenwand (nach Westen gerichtet) ist mit 21°C an der Oberfläche nur unwesentlich kühler. Dagegen ist die Raumlufttemperatur – ablesbar am Abluftventil, das stark umströmt wird – mit um 22°C etwas wärmer. In den verchromten Armaturen erkennt man teilweise verzerrte Reflexe des Thermographen. Die geometrische Wärmebrücke am Anschluss Wand/Dach ist deutlich ablesbar, jedoch sinken auch dort die Temperaturen nicht unter 20,6°C. Beachte: Das Licht (Energiesparlampe) war bewusst nicht eingeschaltet; die Lampe würde sonst deutlich mit einer sehr viel höheren Temperatur hervortreten (oben links). Im visuellen Bild ist daher der Reflex des Blitzes der visuellen Kamera erkennbar. Unter den hier gegebenen Randbedingungen ist im Duschbad auch bei lang anhaltenden hohen Raumluftfeuchten kein Kondensat und daher auch keine Schimmelbildung zu erwarten.



Abbildung 85: Die visuelle Inspektion zeigt auch keinen Schimmel – an keiner Oberfläche.



Abbildung 86: Dachanschluss im Flur DG; die Innenwandoberfläche zum Duschbad ist ein wenig wärmer als der Rest der Oberflächen im Flur; die Überströmöffnung für die Abluft hat dagegen erwartungsgemäß Raumlufttemperatur, welche der Temperatur der (leichten) Gipskartonverkleidung des Daches entspricht (20,9 °C). In der vorliegenden hohen Temporauflösung sind wieder die Bereiche der Konterlattung mit geringfügig höheren Wärmeverlusten erkennbar.



Abbildung 87: Aufnahme im visuellen Spektralbereich: Flur im DG mit Überströmöffnung



Abbildung 88: Treppenhaus mit Trennwand zum Nachbarhaus; das Temperaturfeld ist hier sehr homogen, bis auf Reflexe liegen alle Temperaturen in diesem Innenbereich zwischen 20,1 und 20,3 °C. Das ist u.a. eine Folge der Randbedingung, dass die Temperaturen im Nachbarhaus in etwa gleich hoch sind (um 20°C) wie in dieser Wohneinheit. Es gibt also keinen nennenswerten Wärmestrom zwischen den Häusern.



Abbildung 89: Visuelle Aufnahme: Treppenhaus; die rückwärtige Wand ist eine Wohnungstrennwand.



Abbildung 90: Fußboden im EG (Oberseite der Kellerdecke). Erste Treppenstufe der gewendelten Treppe. Die Temperaturdifferenzen sind hier extrem niedrig; auf der Stufe kann in etwa die mittlere operative Temperatur angenommen werden; diese beträgt hier 19,5°C. Der Fußboden liegt an der Oberfläche nur ein Zehntel Kelvin darunter. Der „dunkelblaue“ Streifen dazwischen ist der „thermische Schatten“ der Stufe. Hier sieht der Fußboden die Stufenunterseite (kälter) statt der Wand des Treppenhauses (wärmer) und ist daher geringfügig kühler (19,2 °C).

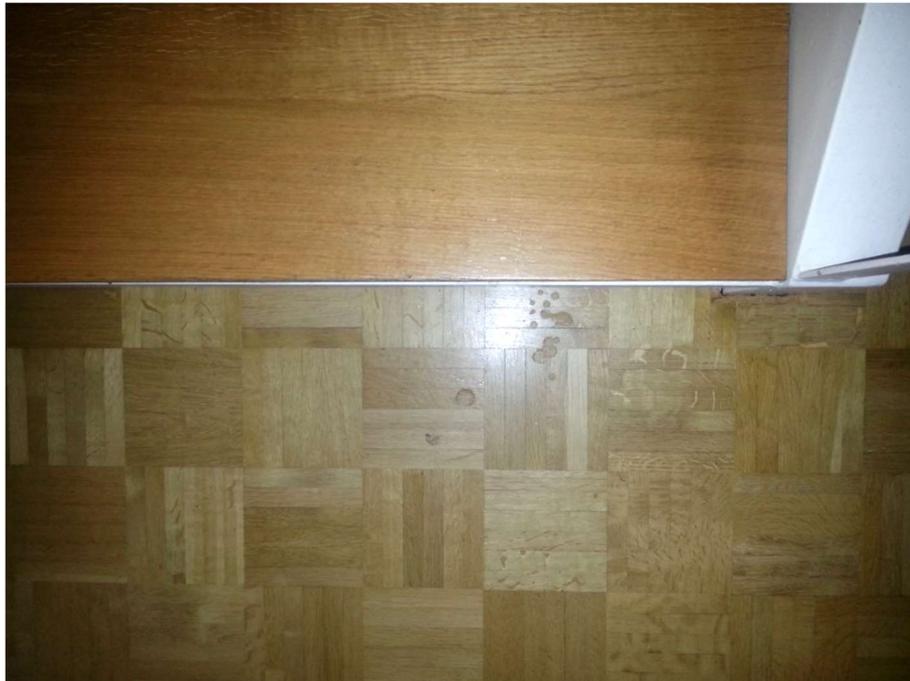


Abbildung 91: Zugehöriges visuelles Bild: Fußboden am Treppenaufgang

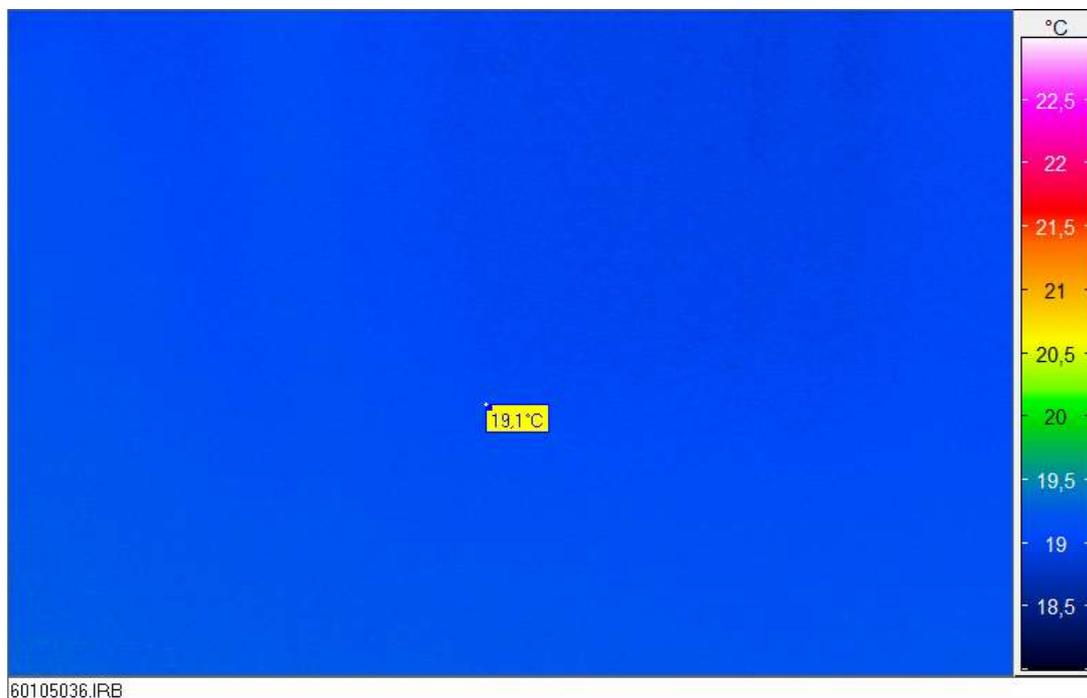


Abbildung 92: Fußboden im EG, Nordraum, Oberseite der Kellerdecke: auch hier sind keine Inhomogenitäten erkennbar, im Mittel beträgt die Oberflächentemperatur 19,2°C; bei höchster Temperaturauflösung lassen sich andeutungsweise die thermischen Reflexe von kälterer Wohnungstür und wärmerer Zimmerdecke differenzieren (hier noch nicht erkennbar).



Abbildung 93: Visuelle Aufnahme Fußbodenoberfläche im EG; Beachtenswert: Der gute Zustand des Parketts nach 25 Jahren. Das ist vor allem eine Folge der gleichmäßigen hygrothermischen Bedingungen im Raum.

Fazit: **Wärmebrückenfreie Anschlüsse** sind auch im Massivbau generell plan- und ausführbar. Die in Kranichstein gewählten Lösungen haben sich über 25 Jahre Nutzung an keiner Stelle messbar verändert – das Objekt ist rundum wärmebrückenfrei (mit einer nicht relevanten Fehlstelle durch mangelnde Bauaufsicht). Zertifizierte Bauprodukte sind heute mit dauerhaft wärmebrückenfreien Lösungen für alle Bauarten und Bauweisen verfügbar (vgl. www.passiv.de).

4 Fenster und Verglasung

Zur Errichtungszeit des ersten Passivhauses in Darmstadt-Kranichstein waren Dreischeiben-Wärmeschutzverglasungen nicht marktverfügbar. Diese wurden daher als Prototypen in Sonderanfertigung bezogen. Dabei wurden 8 mm-Zwischenräume mit Kryptonfüllung ausgeführt. Thermisch optimierte Abstandhalter waren zwar als Notwendigkeit erkannt, auf dem Markt aber nicht verfügbar und auch nicht mit vertretbarem Aufwand in Einzelfertigung herstellbar. Zur Ausführung kamen deshalb konventionelle Aluminium-Abstandhalter, deren Wärmeverluste durch einen besonders tiefen Glaseinstand begrenzt wurden. Da wärmegeämmte Rahmen ebenfalls noch unbekannt waren, wurden konventionelle Holzfensterrahmen mit aufgesetzten Dämmschalen aus Polyurethan-Hartschaum in Einzelfertigung thermisch ertüchtigt.

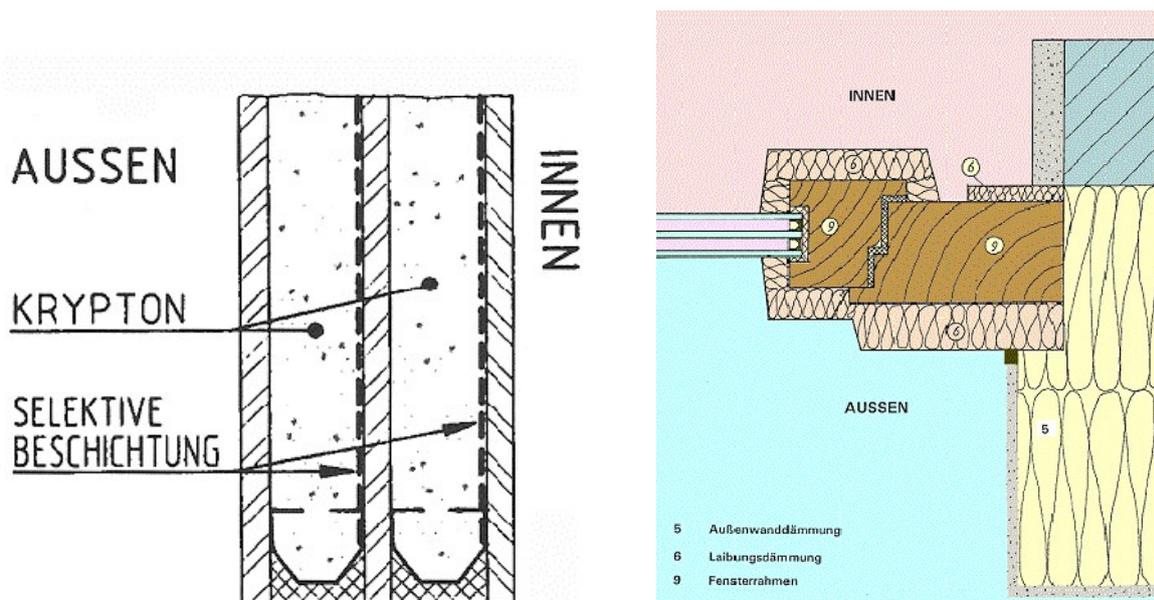


Abbildung 94: Links: Die verwendete Dreifach-Wärmeschutzverglasung mit drei Scheiben im schematischen Aufbau.

Rechts: Das durch aufgesetzte PU-Dämmschalen ertüchtigte Holzfenster mit Wandanschluss.

Um Wärmebrückeneffekte im Stoßbereich von Fenster und Wand zu minimieren wurden die Fenster vor der tragenden Kalksandsteinwand, in der Dämmebene, eingebaut. Diese Einbauposition war zur Bauzeit ebenfalls völlig untypisch; der positive Einfluss auf die Einbauwärmebrücke ist erheblich.

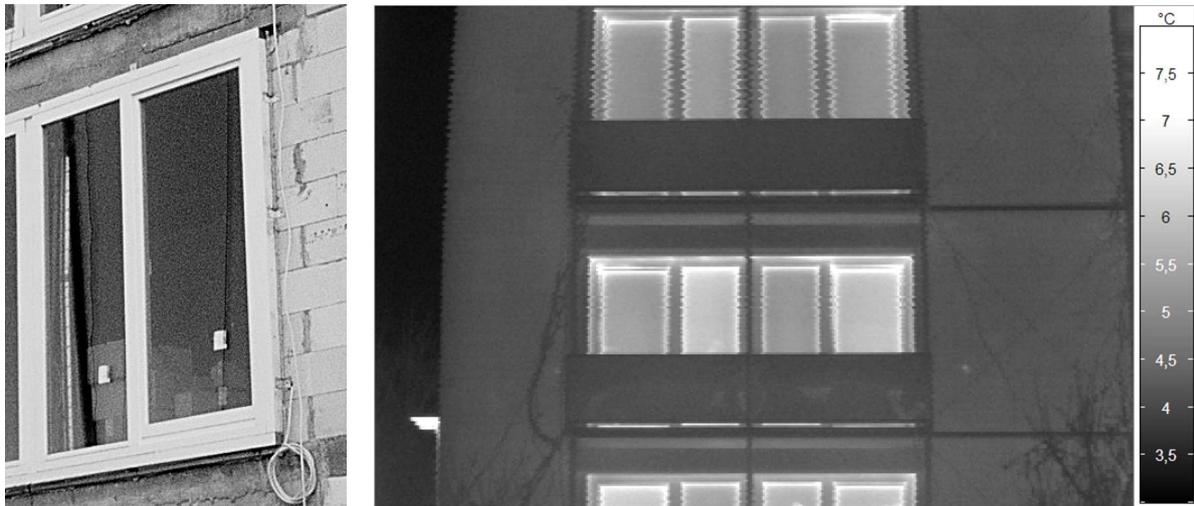


Abbildung 95: Links: Baustellenfoto 1991: Einbau der Fenster vor die gemauerte Wand. Rechts: Thermographie der Südfassade 2016 (hier in s/w Darstellung): Im Umfang der Fenster ist keinerlei Wärmebrückenwirkung erkennbar (wohl die IR-Verschattung durch den Balkon und die leicht unterschiedlichen Verglasungs-U-Werte). Links unten ist in dem Thermogramm der wärmere Fortluftauslass erkennbar.

Innerhalb der erstmalig eingesetzten Dreifach-Wärmeschutzverglasung wurde je eine Oberfläche zu jedem Scheibenzwischenraum hin mit einer selektiven Beschichtung ausgeführt (vgl. Abbildung 94, Oberflächen 3 und 5); dies führt bei Absorption von Sonneneinstrahlung zu deutlich erhöhten Temperaturen der mittleren Scheibe. Tatsächlich kam es im ersten Jahr (1992) zu einer Reihe von thermisch bedingten Scheibensprüngen - die Industrie ging daraufhin dazu über, die Beschichtungen auf den Ebenen 2 und 5 anzuordnen, um die Absorption in der mittleren Scheibe zu reduzieren. Außerdem konnten die Absorptionsgrade der Beschichtungen immer mehr verringert werden (soll doch die mittlere Scheibe beschichtet werden, so muss dort teilvorgespanntes Glas oder Einscheiben-Sicherheitsglas eingesetzt werden). Seit diese Zusammenhänge geklärt sind [Feist/Holtmann 1998], ist das Thema Scheibensprung nur noch ganz vereinzelt bei unsachgemäßer Lagerung oder Transport relevant.

Der U_g -Wert dieser 1991 neu entwickelten Superverglasung beträgt im Zentrum des Glases $0,75 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ (vgl. im Folgenden die vertiefende Untersuchung hierzu). Heute sind Verglasungen ab $U_g \geq 0,49 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ am Markt erhältlich.

Die Dämmschalen aus CO_2 -geschäumtem Hart-Polyurethan zur thermischen Verbesserung der Rahmen wurden auf der Außenseite des konventionellen Holz-Fensterrahmens (IV 68) an Blend- und Flügelrahmen und auf der Innenseite nur an den Flügelrahmen angeschraubt [Fingerling 1992]. Diese Maßnahme führte zu

Rahmen- U_f -Werten um $0,7 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ und zu einer großzügigen Abdeckung des Randbereiches der Verglasung (Glaseinstand), der wegen Aluminium-Randverbunds eine starke Wärmebrücke darstellt. Diese Details wurden im Zuge der Bauvorbereitung erstmals mit mehrdimensionalen Wärmestromprogrammen berechnet [Feist 1993].



Abbildung 96: Dämmschalen vor (links) und während der Montage (rechts) an den Holzfensterrahmen. Die Konstruktion der Dämmschalen wurden maßgeblich von K. H. Fingerling entwickelt (vgl. auch [AkkP 3]).

Die Fenster sind die passiv-solaren „Kollektoren“ des Passivhauses. Echte solare Wärmegegewinne sind in Deutschland allerdings nur mit sehr hochwertigen Verglasungen zu erreichen: Die U-Werte für das gesamte Fenster müssen unter $0,8 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ liegen; damit wird auch sichergestellt, dass die inneren Oberflächentemperaturen nicht unter etwa 17°C absinken. Das ist für eine hohe Behaglichkeit im Raum auch ohne ausgleichende Heizflächen wichtig. Wenn im kalten Winter die Sonne scheint, erwärmt sich die Innenoberfläche dieser Fenster auf über 35°C - ein unmittelbar für Besucher fühlbares Kennzeichen des Passivhaus-Prinzips.

Rechnerische Fenster-Kennwerte

Für die Fenster-Prototypen des Passivhauses Darmstadt-Kranichstein wurden im Rahmen der vorliegenden Untersuchung die technischen Kennwerte rechnerisch neu bestimmt. Zur Anwendung kamen hierbei zum Zweck der Vergleichbarkeit die in der Zertifizierung von Passivhaus-Komponenten heute eingeführten Werkzeuge und Methoden:

Ansichtsbreite b_f	170 mm
U_f	0,615 W/(m²K)
Ψ_g	0,0299 W/(mK)
U_g	0,81 W/(m²K)
U_w	0,79 W/(m²K)
Effizienzklasse	phB

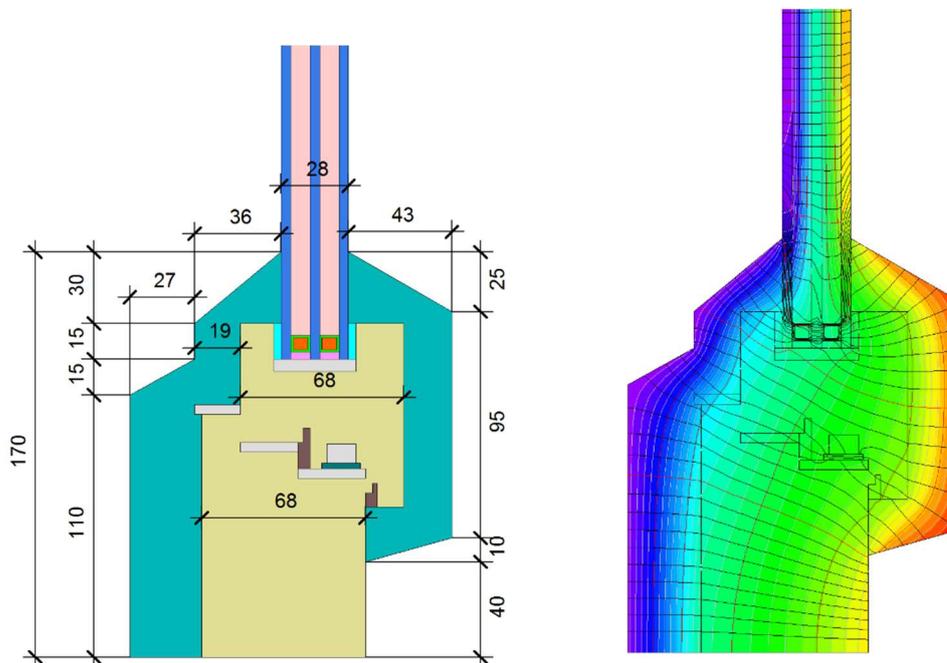


Abbildung 97: Neues Berechnungsmodell und resultierende Isothermengrafik des Passivhaus-Fensters.



Abbildung 98: Außenansicht des Passivhauses von 1992 mit montierten, aber noch nicht lackierten Dämmschalen an den Fensterrahmen (alle Fenster in allen Wohnungen sind so ausgestattet).

4.1 Messtechnische Untersuchung der Verglasungen

Bei den im Passivhaus Darmstadt-Kranichstein verwendeten Verglasungen handelt es sich um eine projektspezifische Einzelanfertigung aus 3 mal 4 mm Floatglas, beschichtet auf den Flächen 3 und 5, mit 8 mm Scheibenabstand und Kryptonfüllung. Die 1990 verfügbaren Low-e-Beschichtungen wiesen einen Emissionsgrad von $\epsilon \approx 0,1$ auf. Bei einem (angenommenen) Krypton-Füllgrad von 95% (Restanteil: Luft) hatte der ursprüngliche U-Wert der Verglasung $0,75 (\pm 0,03) \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ betragen.

In den nun 25 Jahren Nutzungsdauer gab es verschiedene, oft emotional geführte Debatten ob solche Verglasungen sich als dauerhaft erweisen würden (Füllgasverlust), ob Strahlungsabsorption zu unzulässigen thermischen Belastungen führt, inwiefern Pumpeffekte durch Temperaturwechsel die Haltbarkeit des Randverbundes beeinträchtigen und ob die Aufbringung der dritten Scheibe ökonomisch tragfähig sei. Diesen Fragen wurde in den hier vorliegenden Untersuchungen nachgegangen um wissenschaftlich fundierte Hinweise liefern zu können.

Es wurde hierzu zunächst eine mobile Wärmestrom-Mess-Apparatur gebaut und eine zugehörige Auswerte-Software erstellt (vgl. [Feist et al. 2016]). Sie besteht aus einer Wärmestrom-Messplatte mit Schutzrand sowie Temperatursensoren zur Bestimmung der Temperaturdifferenz, eingebettet zwischen Glasplatten. Damit konnten die Verglasungs-U-Werte von sechs der verwendeten Verglasungen nach 25 Jahren mit einer Messunsicherheit von $\pm 0,05 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ bestimmt werden. Dazu wurden über mehrere Tage hinweg bei ausreichend großer Temperaturdifferenz fortlaufend Daten erfasst. Um Wechselwirkungen durch Absorption von Solarstrahlung zu minimieren wurde dabei der außenliegende Sonnenschutz (Raffstore) geschlossen sowie ein zusätzlicher Schutzschirm installiert. Überdies wurden für die Auswertung nur Daten aus den Nachstunden (22:00 h bis 07:00) herangezogen.

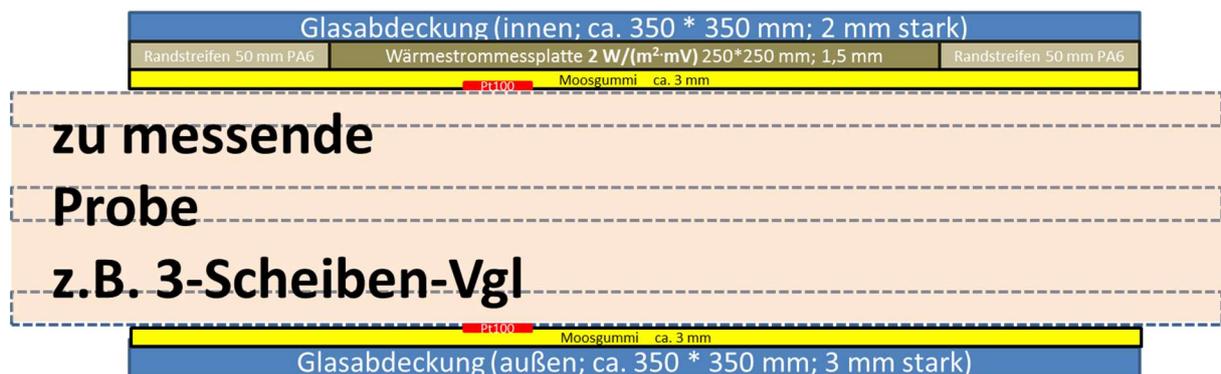


Abbildung 99: Schematischer Aufbau der Wärmestrom-Messeinrichtung (Schutzringprinzip)

Tabelle 5: Eingesetzte Messtechnik für die U-Wert Messung der Verglasung

	Hersteller	Beschreibung
Wärmestrom-Messplatte	PHYMEAS Physikalische Messtechnik	#97080, $1,88 \text{ W}/(\text{m}^2\text{mV})$, Abmessung: $250 * 250 \text{ mm}$
Pt100 Folienfühler (Draht)	Ahlborn FPA 686	Ausgesuchtes, aufeinander kalibriertes Paar von Pt100-Widerständen
Datenlogger	Ahlborn	ALMEMO 2890-9

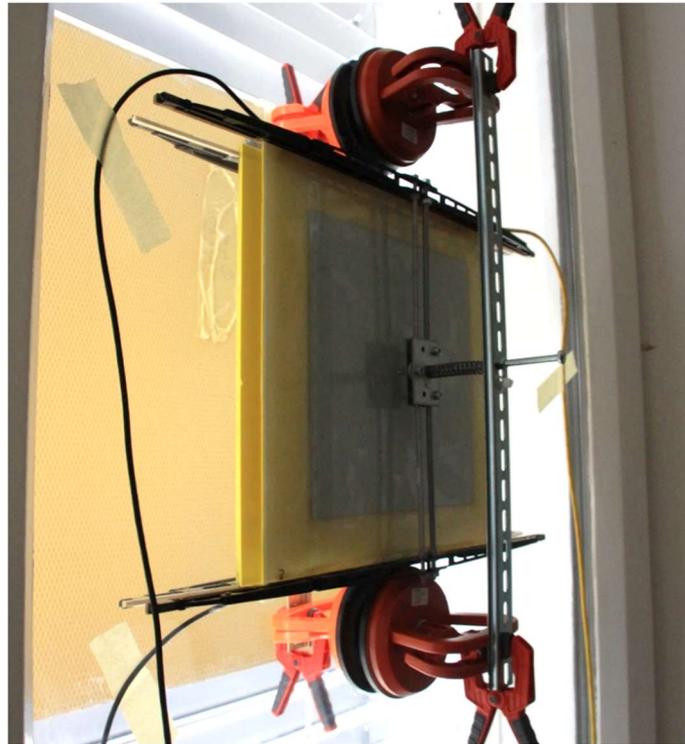


Abbildung 100: An der Verglasung montierte Wärmestrom-Messapparatur. Davorliegend außen der Strahlungsschutz und geschlossene Raffstoren.

Insgesamt wurden sechs Scheiben vermessen, wobei fünf Verglasungen weitgehend übereinstimmende Werte zeigten. Im Mittel dieser fünf untersuchten Scheiben konnte der Verglasungs-U-Wert auf $0,78 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ bestimmt werden; eine weitere Scheibe wies abweichend $U_g = 0,97 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ auf.

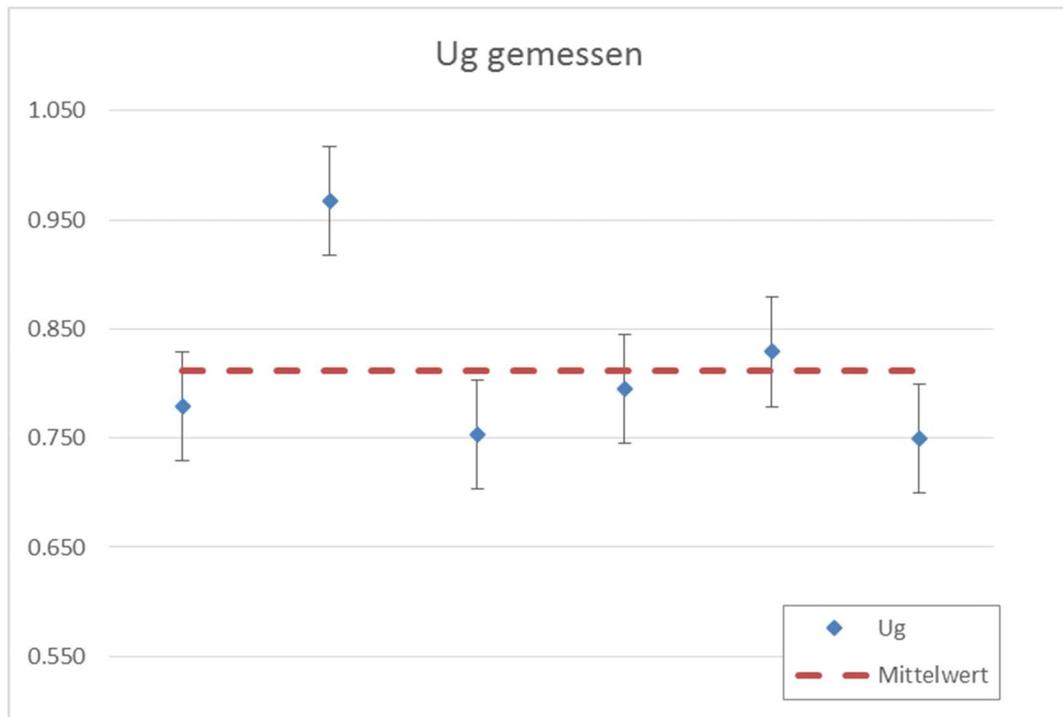


Abbildung 101: Messergebnisse der U-Werte (in der Einheit $[W/(m^2K)]$) der Einzelscheiben und Gesamt-Mittelwert

Unter der Annahme, dass sich die Scheibenbeschichtungen über die Zeit nicht relevant verändert haben, kann damit der Gasverlust im überwiegenden Feld der Verglasungen mit weniger als $0,2 (\pm 0,1)\%/a$ quantifiziert werden. Bei der einen stärker wärmeleitenden Scheibe kann im Nachhinein nicht eindeutig festgestellt werden, ob sie möglicherweise schon am Anfang einen etwas geringeren Füllgrad von dann nur 65% Krypton aufgewiesen hat⁵. Unterstellt man auch hier einen 95%igen Füllgrad, so wäre für diese Verglasung der Gasverlust mit $1,2 (\pm 0,2)\%/a$ zu beziffern.

Die angetroffene Gasverlustrate ist somit in der überwiegenden Mehrzahl der Fälle mit unter $0,25\%/a$ extrem gering; in etwa 15% der Fälle können Raten von um $1\%/a$ auftreten; auch in diesen Fällen ist die funktionale Nutzungsdauer der Dreischeibenverglasung mit jedenfalls über 40 Jahren zu bemessen. Die Empfindlichkeit gegenüber Gasverlusten nimmt stark ab, wenn, wie heute üblich, Argon als Füllgas verwendet wird und der Scheibenabstand auf $2 \times 15 \text{ mm}$ erhöht wird. Zusammen mit den heute

⁵ Die Inspektion alter thermographischer Aufnahmen führte diesbezüglich nicht zu einer eindeutigen Bewertung.

verfügbaren besseren Beschichtungen verbessert dies auch den Anfangs-U-Wert auf unter $0,60 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$.

Um den mittleren Gasverlusten Rechnung zu tragen, sollte der Nenn-U-Wert der Verglasung bei einem Füllgrad von 85% angegeben werden, aber eine Befüllung auf 95% angestrebt werden.

Das „Pump-Phänomen“ wird nach wie vor kontrovers diskutiert. Bei den nur geringen Scheibenabständen in Kranichstein ($2 \times 8 \text{ mm}$) ist nach generellem Konsens kein Problem zu erwarten – und auch keines aufgetreten. Neueste Entwicklungen beim Randverbund gehen dazu über, den Pumpeffekt durch Volumenaufnahme des sich thermisch ausdehnenden Füllgases zu reduzieren.

Hinsichtlich der für eine Dreischeiben-Wärmeschutzverglasung erforderlichen Investitionskosten haben sich in den vergangenen 25 Jahren dramatische Änderungen vollzogen. Etwa 2012/13 stellte die Industrie in Deutschland auf automatische Fertigung von Dreischeibenverglasungen um; damit fiel der Mehrpreis von Drei- zu Zweischeibenglas auf weniger als 25 €/m^2 Glasfläche (Endverbraucherpreis). Da entsprechende Verglasungen über 3 € je Quadratmeter und Jahr an Heizkosten einsparen und mindestens 25 Jahre halten (vgl. oben), ist die Wirtschaftlichkeit der Drei- statt Zweischeibenverglasung heute unbestritten.

Obwohl Dreischeibenverglasungen trotz erwiesener Wirtschaftlichkeit in Deutschland noch immer nicht verbindlich vorgeschrieben sind, hat sich deren Verwendung am Markt inzwischen durchgesetzt. Die Verwendung von Zweischeiben-Wärmeschutzverglasung erscheint heute ökonomisch wie ökologisch suboptimal und eine vergebene Chance für verbesserten thermischen Komfort. Es wäre hilfreich, wenn U_g-Werte von Verglasungen unter $0,75 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ im kühl-gemäßigten Klima generell verbindlich vorgesehen würden – im Neubau und bei der Sanierung.

4.2 Innenthermographie Fenster

Die Fenster des Passivhauses Darmstadt-Kranichstein wurden einer eingehenden Untersuchung mittels Infrarot-Thermographie unterzogen. Diese eröffnet nicht nur die Möglichkeit thermische Schwächen der Fensterrahmen und Verglasungen zu erkennen. Solche können etwa durch mechanische Desintegration oder Feuchtebelastungen des Holzrahmens auftreten. Darüber hinaus liefern die Bilder aber auch Hinweise auf die Wirkung eintretender Kaltluft uns somit von Undichtheiten in der Fenster-Einbaufuge und zwischen Blend- und Flügelrahmen.

Das Bauteil mit der höchsten mechanischen Belastung als Durchgang zwischen innen und außen ist die Hauseingangstür. Da das Haus über einen ungeheizten Glasvorbau verfügt und dieser den Einbruchschutz gewährleistet, konnte die eigentliche Hauseingangstür im Wesentlichen baugleich mit den übrigen Fenstern ausgeführt werden. Modifiziert wurden, der Funktion entsprechend, der Rahmen im Schwellenbereich und der Beschlag, der hier ein Schloss mit beidseitigen Drückern und einen Profilzylinder umfasst.

In der nachfolgenden Thermographie ist der untere Teil dieser Tür, das ist auch der Bereich, in dem im Winter die höchste Infiltration zu erwarten ist, dargestellt. Die Temperaturabsenkungen gehen nur an wenigen Stellen geringfügig über die hier zu erwartende Wärmebrückenwirkung hinaus. Alle Ergebnisse liegen durchweg im komfortablen und sicheren Bereich.

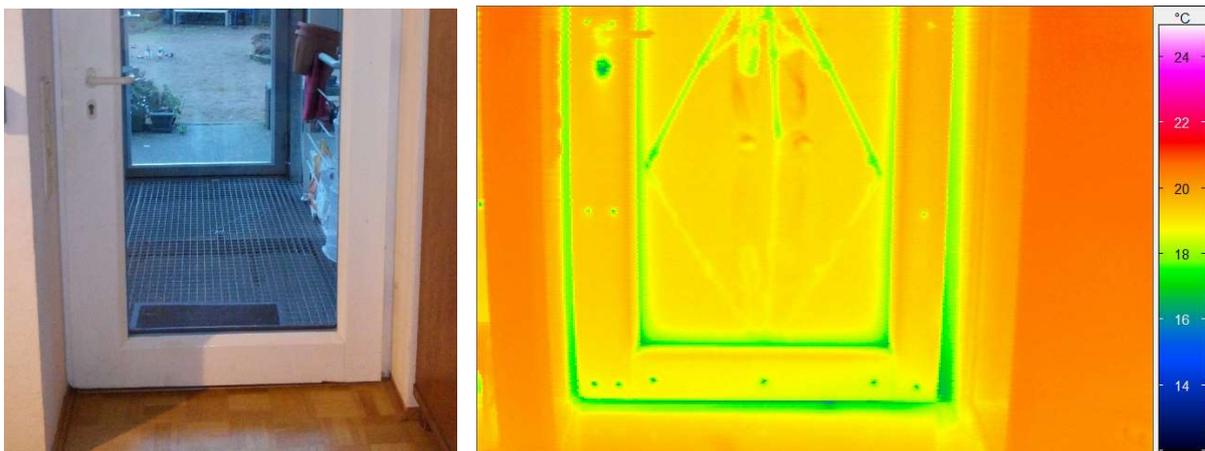


Abbildung 102: Haus-Eingangstür von innen als Foto (links) und als Thermogramm (rechts). In der Verglasung reflektieren das Stativ der Kamera und der Thermograph selber (Beine und Füße).

Die reguläre Glasoberfläche liegt bei etwa 19,0°C, Im Bereich der Wärmebrücken gehen die Temperaturen bis auf minimal 16,8°C zurück (grüner Bereich: Glasrand und Einbauwärmebrücke); alle Temperaturen sind hoch genug, um kritische erhöhte Wasseraktivitäten zuverlässig zu vermeiden. Daher findet sich auch im gesamten Bereich kein Schimmel.

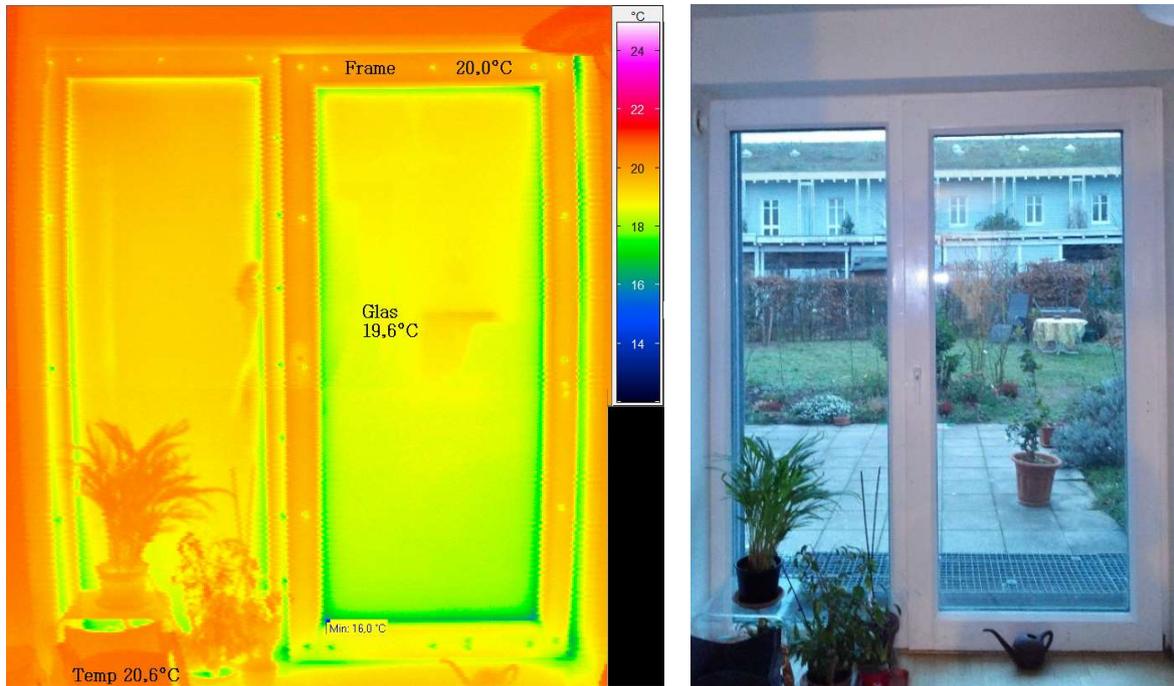


Abbildung 103: EG-Süd / Wohnzimmer in Thermogramm und Foto

Im Raum EG Süd (Wohnzimmer) lag die mittlere operative Temperatur zum Zeitpunkt der Aufnahme am 01.01.2016 bei 20,6°C (erkennbar im IR-Bild an frei stehenden nichtspiegelnden Oberflächen). Die Innenoberfläche der Verglasung weist mit im Durchschnitt 19,6°C nur ein Kelvin weniger auf, wie an dem Klebestreifen (auf der Verglasung) abgelesen werden kann. Erkennbar ist, dass der Wärmeschutz des Fensterrahmens im Regeldetail noch besser ist (Oberflächentemperatur um 20°C). Deutlich ist die Temperaturabsenkung im Bereich der Einbauwärmebrücke (z.B. am rechten Fensterrand) zu sehen. Hier ist der Blendrahmen weniger gut gedämmt und die Temperaturen gehen stellenweise auf 16,5°C zurück. Die niedrigsten Temperaturen liegen aber am Glasrand vor; wegen des Aluminium-Randverbundes bis hinunter zu 16°C. Diese Bereiche sind hygienisch unkritisch: sie liegen weit oberhalb aller für erhöhte Wasseraktivität schädlichen Werte und sie beeinflussen wegen der kleinen Flächen (weniger als 3 cm Breite) die thermische Behaglichkeit nicht. Ebenfalls auffällig sind die punktförmigen Wärmebrücken durch die Verschraubung der Innendämmschalen der Fensterrahmen. Die beiden in der folgenden Abbildung 104 markierten Schrauben (links im Bild) sind bis tief in das Holz der Rahmenkante gesetzt. Sie dienen der Materialfeuchtemessung nach dem Widerstandsverfahren. Am Vortag waren hier mit Gann Hygromette 9,1% Holzfeuchte gemessen worden – ein stabil trockener Wert.

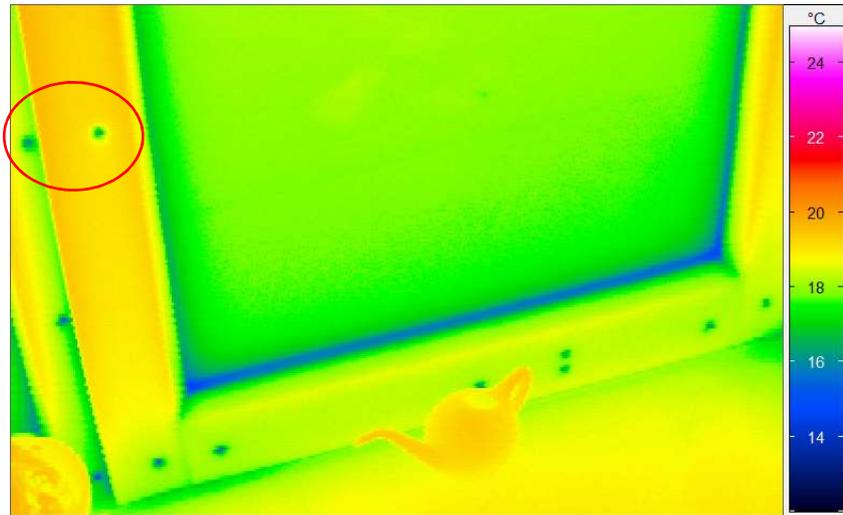


Abbildung 104: Detail-Thermographie des Wohnzimmerfensters. Markiert sind zwei Schrauben, welche zur Materialfeuchtemessung am Rahmen angebracht wurden.

Im unteren Bereich des Wohnzimmerfensters ist die reduzierte Temperatur am Glasrand in der Detailaufnahme gut zu erkennen; sie liegt nirgends unter 15°C ; die Einbauwärmebrücke ist (plangemäß) äußerst gering, um 17°C hier sind mit den Werten der zweidimensionalen Berechnung verträglich. Am Boden ist keine Kaltluftfahne erkennbar: Die Bodenoberflächentemperaturen liegen oberhalb von 19°C ab 5 cm Abstand vom Fenster. Zum Vergleich ist die Gießkanne mit im Bild, deren Oberflächentemperatur bei ca. $20,2^{\circ}\text{C}$ nur knapp unter der mittleren operativen Temperatur im Raum liegt.

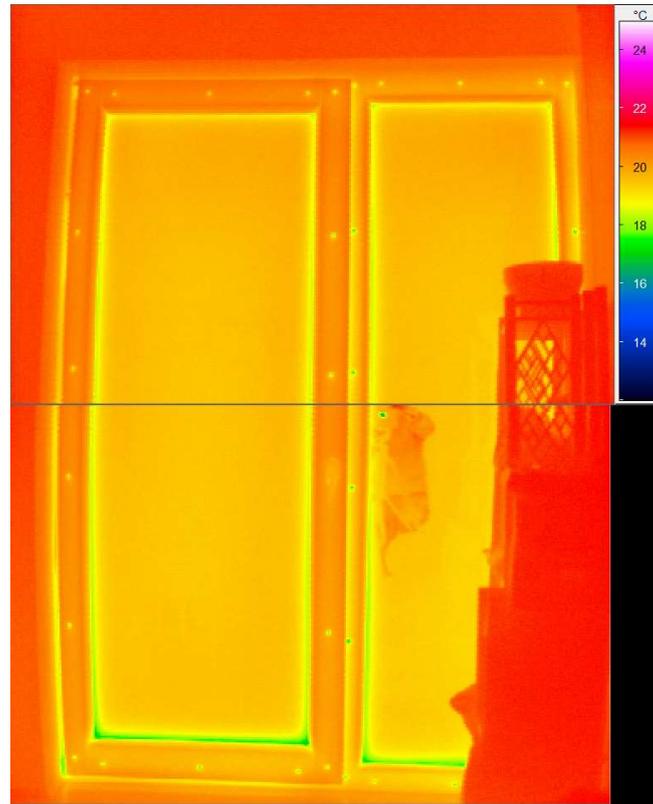


Abbildung 105: Thermographie (zusammengefügt) eines Fensters im Obergeschoss (Südfassade, östliches Fenster).

Auch im Obergeschoss wurden die Fenster von der Innenseite thermographisch untersucht. Die Abbildung zeigt links einen Öffnungsflügel, rechts eine Festverglasung des östlichen Raumes an der Südfassade. Der grüne Punkt unter der Bildmitte ist das IR-Spiegelbild des Objektivs der gekühlten Kamera. Die mittlere operative Raumtemperatur liegt bei etwa 21,3°C, messbar am Mobiliar. Die niedrigste Temperatur (Wärmebrücke durch Aluminium-Randverbund, unterer Glasrand) liegt bei ca. 17,3 °C; das ist weit auf der sicheren Seite bez. Feuchtgrenzen und Komfort. Auch alle anderen Fenster zeigen jeweils ein vergleichbares Bild; es finden sich keine Auffälligkeiten

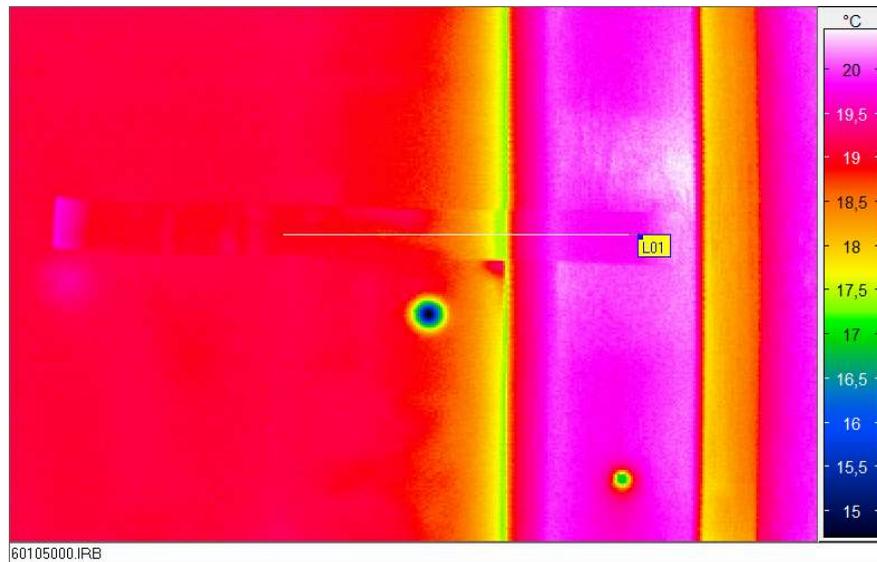


Abbildung 106: Innenthermographie mit hoher Temperaturauflösung von Verglasung, Fensterrahmen und Fensteranschluss im Obergeschoss und zugehöriges Lichtbild (unten). Das aufgeklebte Kreppband dient wieder zur ungestörten Bestimmung der Oberflächentemperaturen.

Zur weiteren Klärung des Befundes wurde eine Innenthermographie mit hoher Temperaturauflösung von Verglasung, Fensterrahmen und Fensteranschluss im Obergeschoss am Südfenster (erstes von Westen) durchgeführt. Ein Kreppband-Streifen wurde verwendet, um die direkte Reflektion an der Scheibe zu verhindern und einen definierten Absorptionsgrad zu erhalten.

Der Temperaturverlauf auf dem Kreppband zeigt zunächst die weitgehend konstante Temperatur der Glasoberfläche („center of glass“) bis zum Einflussbereich der Wärmebrücke durch den Abstandhalter. Die Temperatur sinkt dann bis zur Überdeckung

durch die Polyurethanschale ab, um anschließend sehr schnell wieder zu zunehmen. Der Rahmen dämmt offensichtlich deutlich besser als die Verglasung; der Blendrahmen ist allerdings auf der Innenseite nicht gedämmt; hier fallen die Temperaturen wieder auf um 18 bis 18,5 °C ab.

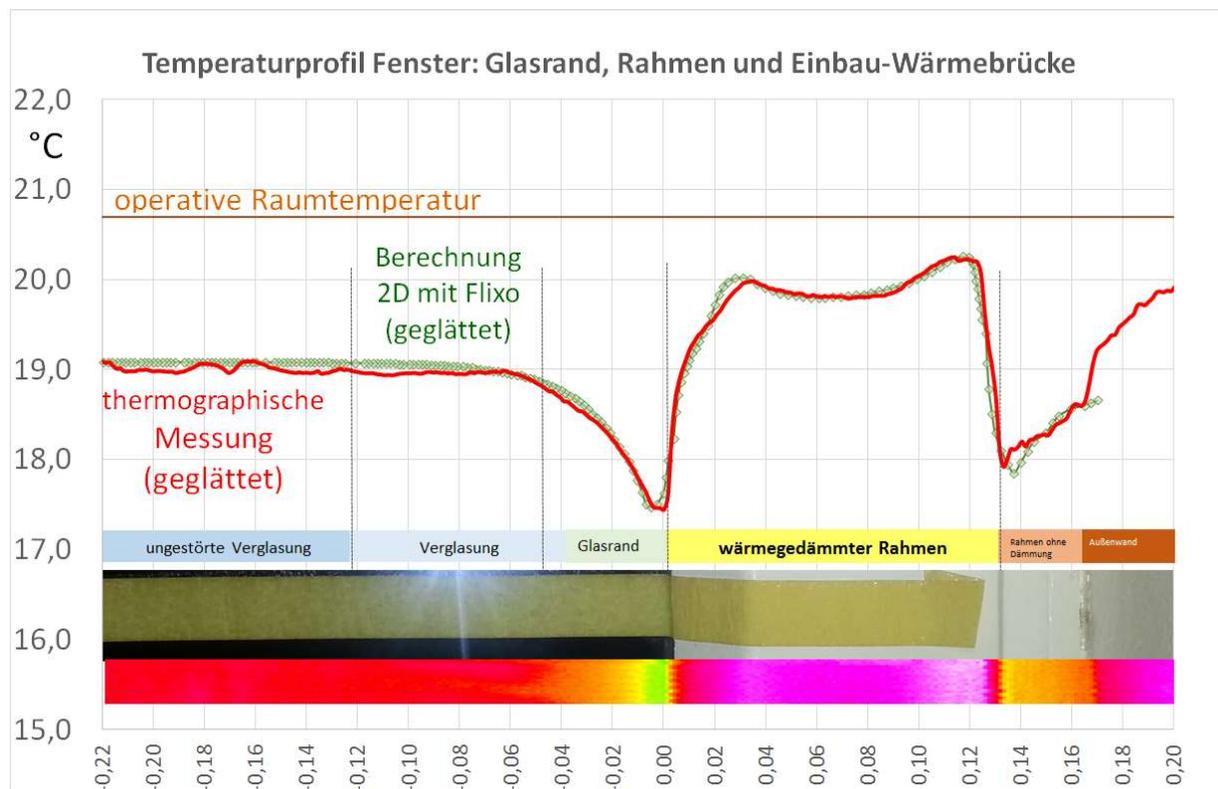


Abbildung 107: Darstellung der einzelnen Messwerte der Infrarot-Thermographie entlang des Kreppbandes in graphischer Darstellung. Sie sind hier zusammen mit den Rechenwerten aus der zweidimensionalen numerischen Wärmestromberechnung aufgetragen. Nachrichtlich sind unten nochmals die Bildausschnitte aus Lichtbild und Thermographie angefügt.

Abbildung 107 zeigt, dass sich Mess- und Rechenwerte in guter Übereinstimmung befinden. Die Zuverlässigkeit der numerischen Werkzeuge wird hier einmal mehr bestätigt. Zudem liefert der Vergleich einen weiteren Beleg für den fehlerfreien Zustand des vermessenen Fensters.

5 Luftdichtheit

Für ein energieeffizientes Gebäude (wie z.B. mit Passivhausstandard) ist eine gut luftdichtende Gebäudehülle unverzichtbar. Die Gründe dafür sind zahlreich: Bautenschutz, Zugfreiheit, Behaglichkeit, einwandfreie Funktion der Lüftungsanlage sowie Verbesserung des Schallschutzes. Aus den bisher vorliegenden Erfahrungen mit luftdichten Gebäuden wurde in [Feist 1993] ein Zielwert von unter $0,6 \text{ h}^{-1}$ für den 50 Pa-Drucktestluftwechsel als zielführend erkannt. Der Hintergrund für dieses Ziel stellte sich wie folgt dar:

- Bis zum Bau des Prototypen in Kranichstein gebaute Niedrigenergiehäuser in Deutschland hatten Drucktestkennwerte zwischen 1 und 4 h^{-1} mit einer Häufung um 3 h^{-1} auf. Nur wenige Objekte kamen nahe an 1 h^{-1} heran. In der deutschen Baupraxis lagen noch wenige Erfahrungen mit dem Bau von gut luftdichtenden Gebäudehüllen vor.
- Andererseits wurden in Schweden bereits seit einigen Jahren bei Neubauten regelmäßig Drucktestluftwechsel um 1 h^{-1} erreicht, und dies bei meist vollständig aus Holzständerkonstruktionen aufgebauten Gebäudehüllen, die generell in dieser Beziehung als schwieriger galten. Einige schwedische Drucktests kamen auch bereits auf Werte um $0,5 \text{ h}^{-1}$ herunter. Damit war erwiesen, dass derart geringe Restleckagen auf der Basis der schwedischen Baupraxis durchaus erreichbar sind.
- Rechnet man in der Infiltrationsformel mit einem Dauerströmungsverhältnis von $e = 0,04$, so ergibt sich bei einem n_{50} -Zielwert von $0,6 \text{ h}^{-1}$ eine mittlere jährliche Infiltration von $0,024 \text{ h}^{-1}$; dies bedeutet in typischen kalt-gemäßigten Klimaverhältnissen Infiltrationswärmeverluste für das gesamte Haus von um 320 kWh/a oder wohnflächenspezifisch von etwa $2 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$. Bei einem Ziel für den Energiekennwert Heizwärme von um $10 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ ist dies bereits ein bedeutender Beitrag.

Der letzte Punkt zeigt, dass eine wesentlich höhere Restleckage beim Passivhaus nicht hätte toleriert werden können, ohne die Gesamtzielsetzung in Gefahr zu bringen. Andererseits zeigt Punkt eins, dass eine Dichtheit entsprechend der Zielsetzung bereits sehr hohe Anforderungen in Relation zur gängigen Baupraxis in Deutschland bedeutet hatte. Für das erste Passivhaus musste das Niveau sehr guter Niedrigenergiehäuser übersprungen und eine noch weit bessere Dichtheit erreicht werden.

Der energetische Einfluss der Luftdichtheit des Endhauses auf den rechnerischen Heizwärmebedarf sowie den Heizlastbedarf kann mit einer Parametervariation einfach ermittelt werden (Abbildung 108). Dabei ist bemerkenswert, wie stark sich die

Luftdichtheit des Gebäudes auswirkt, wenn alle anderen Komponenten des Gebäudes gleich bleiben. Die heute verbindlichen staatlichen Anforderungswerte nach der EnEV liegen für Gebäude mit Lüftungsanlage bei $n_{50} = 1,5 \text{ h}^{-1}$ und für Gebäude ohne Lüftungsanlage bei $n_{50} = 3,0 \text{ h}^{-1}$. Die Abbildung zeigt, dass derart schlechte Dichtheitskennwerte das Erreichen des Passivhausstandards sehr schwierig machen.

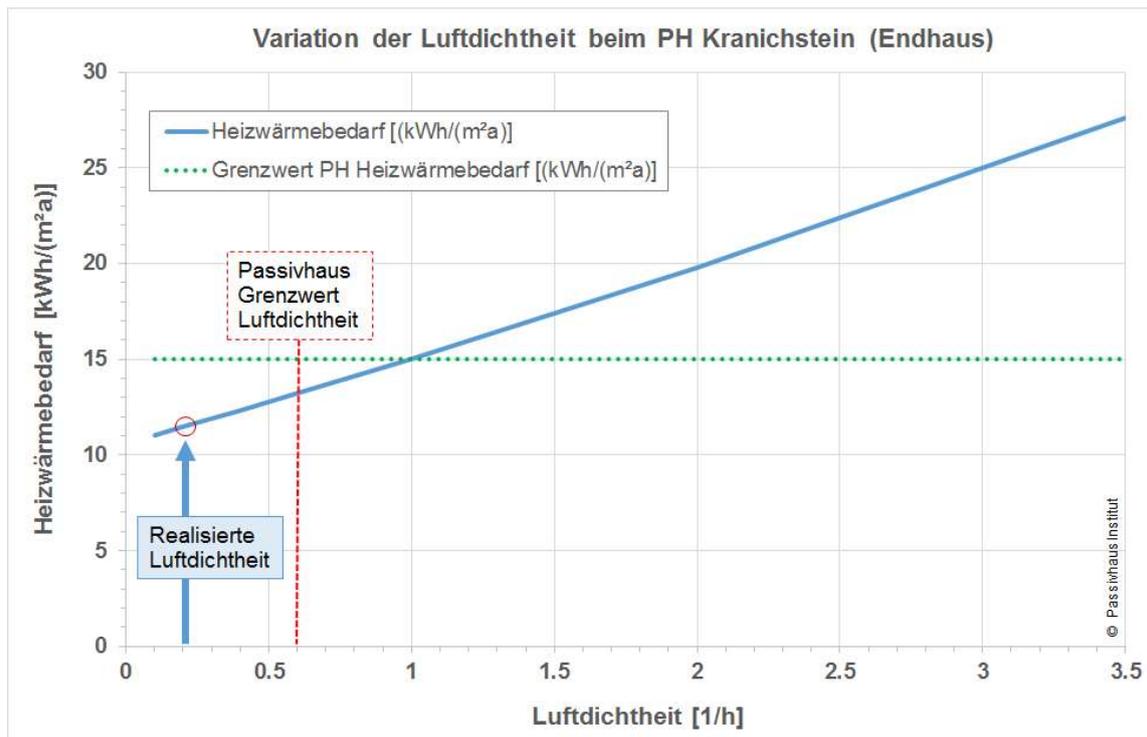


Abbildung 108: Variation der Luftdichtheit und die Auswirkungen auf den Heizwärmebedarf beim ersten Passivhaus (Endhaus) mittels PHPP Bilanz.

Das **Luftdichtheitskonzept** des ersten Passivhauses verwendet – zumindest aus heutiger Sicht – die „klassischen“ Lösungen bei den Flächenbauteilen: **PE-Folie im Leichtbaudach, Innenputz der Massivwände und eine Ortbetonbodenplatte**. Eine tabellarische Übersicht über die Anschlüsse ist Tabelle 6 zu entnehmen. Dabei muss auch beachtet werden, dass 1991 viele der heute verfügbaren Produkte nicht am Markt waren. Dass trotzdem sehr langlebige Lösungen - insbesondere der Verbindungen der unterschiedlichen Flächenabdichtungen - zum Einsatz kamen, zeigen die folgenden detaillierten Darstellungen sowie die durchgeführten Überprüfungen der Luftdichtheit (Blower Door Messung).

Tabelle 6: Luftdichte Anschlüsse im Reihenhaus Darmstadt-Kranichstein (Quelle: [Feist 1995a])

Stoss von/gegen	Kellerdecke	Flügelrahmen	Blendrahmen	Außenwand	Dach
Dach				Einputzen der Folie in Gipsputz	Verklebung d. Folien (Butylkautschukklebebänder)
Außenwand	Gipsputz bis auf die Rohdecke gezogen		Putzendschiene, mit Acrylatdichtmasse gegen Rahmen verfugt	durchgehender Gipsputz	
Blendrahmen	angeschraubte Dreiecksleiste mit Silikon verfugt	Lippen-dichtung			

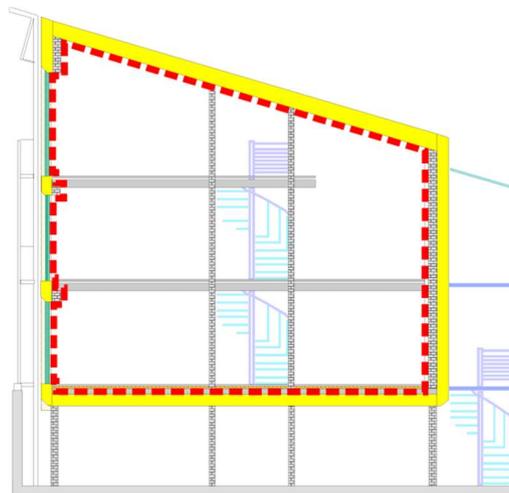
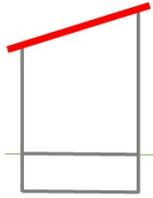


Abbildung 109: Verlauf der luftdichten Ebene im Gebäudeschnitt. Es muss eine durchgehend luftdichte Ebene geben, welche mit einem Stift ohne abzusetzen abfahrbar ist („Stiftregel“) [Peper et al. 2005].

5.1 Luftdichtheit Dach und Anschluss Dach - Wand



Für das Dach wurden spezielle Doppel-T-Leichtbauträger verwendet, die eine gute Wärmedämmung bei nur sehr geringer Wärmebrückenwirkung erlauben. Die Dichtheit dieser Konstruktion wird durch eine durchgehende Polyäthylenfolie erreicht, die in großen Bahnen unter der Konterlattung angetackert wurde. Die Planung sah vor, dass in jedem Raum des Dachgeschosses nur ein großes Folienstück von Giebelwand zu Giebelwand verlegt wird; dadurch waren keine Verklebungen zwischen Folienstücken erforderlich. Solche Verklebungen können mit zweiseitigem Butyl-Klebeband dauerhaft und zuverlässig dicht ausgeführt werden. Wenn der Raum nicht zu groß ist, spart die Verlegung in einem Stück jedoch Arbeit.

Verbindung Dach – Wand: Beim Dach (Leichtbauteil) bildet die PE-Folie die luftdichte Lage, bei der gemauerten Massivwand der durchgehende Gipsputz. Ein absolut dichter Anschluss dieser beiden Ebenen wurde durch **Einputzen** möglich: Die Folie wurde vor dem Anbringen des Innenputzes verlegt - dies hat darüber hinaus den Vorteil, dass die Feuchtigkeit während des Putzens nicht in die Leichtbaukonstruktion eindringen kann. An den Rändern zu den Massivbauteilen wurde die Folie 8 bis 20 cm überstehen gelassen und auf das (Rohbau-) Massivbauteil aufgelegt. Am Massivbauteil wurde sodann ein Streckmetall-Putzträger fixiert (genagelt bzw. Krampfenhalterung). Die Fixierungen dürfen auch durch die Folie hindurchgehen, jedoch sollte ein Abstand von mindestens 5 cm zur Stoßkante der Bauteile gehalten werden. Im letzten Arbeitsgang kann die Folie nun beim standardmäßigen Aufbringen des Innenputzes vollständig in diesen eingeputzt werden (Abbildung 110 und Abbildung 111). Der so entstehende Anschluss ist einfach auszuführen und absolut luftdicht. Später wurde an Decken und Wand Raufasertapeten angebracht (das Finish ist für das Ergebnis allerdings nicht relevant).

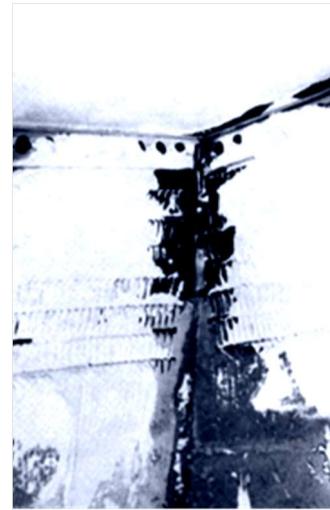
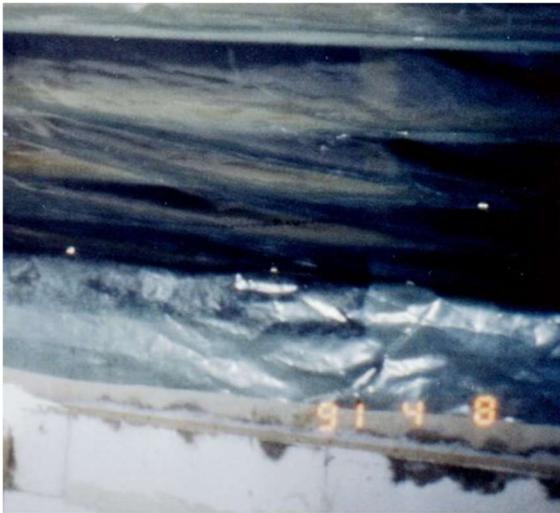


Abbildung 110: Die Bilder aus der Bauzeit zeigen die mit der Wand überlappenden Folie (links), welche mit Streckmetall abgedeckt und dann überputzt wird (rechts).

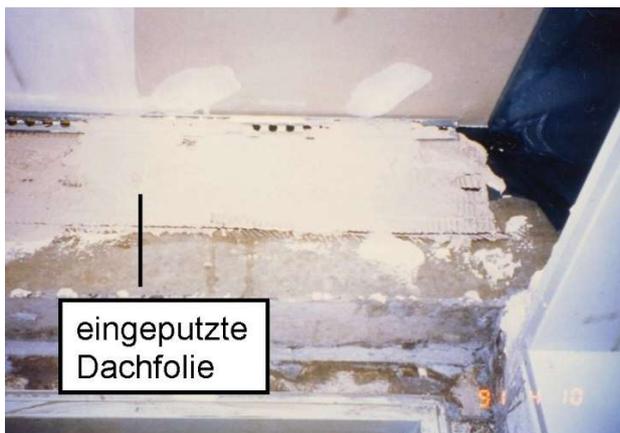


Abbildung 111: Links: Halb eingeputzte, mit Streckmetall abgedeckte PE-Folie vom Dach (1991). Rechts: Fertig verputzte PE-Folie für den luftdichten Anschluss Dach-Wand. Rechts oben im Bild der Ringanker (dunkler „Kasten“) (1991).



Abbildung 112: Visuelle Aufnahme Tapetenriss an der Anschlussstelle Außenwand/ Dach; Achtung: Das ist nicht die Dichtebene – die liegt darunter in Form der eingeputzten Folie und hält trotz der örtlichen Verschiebung dicht.

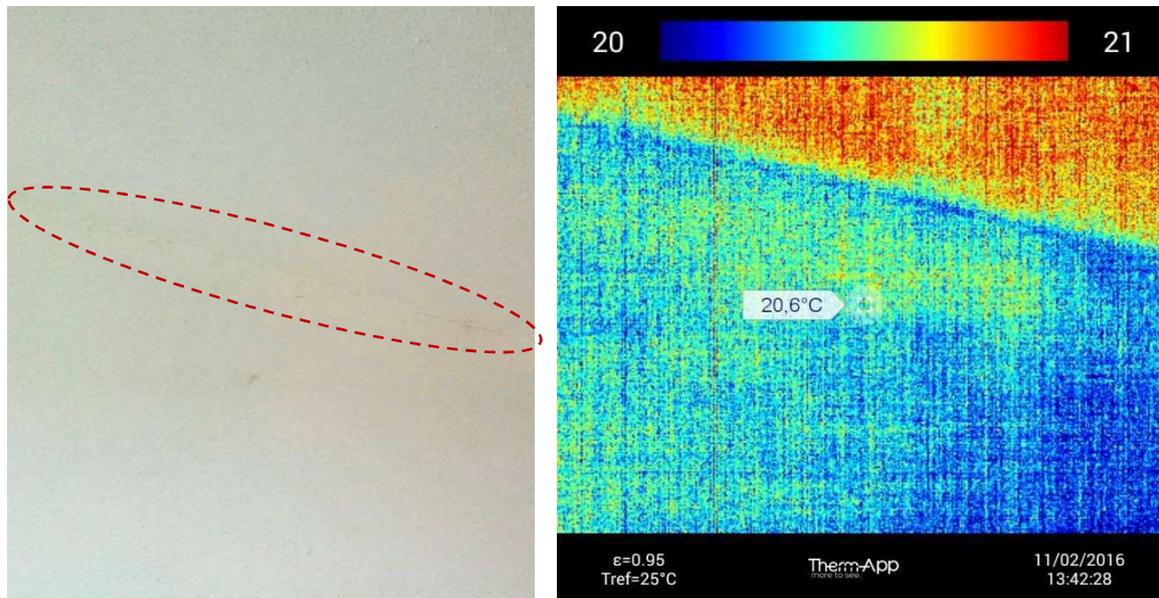


Abbildung 113: Die Nachuntersuchung nach 25 Jahren zeigt in allen Thermographieaufnahmen der Anschlussstelle Dach/Wand an keiner Stelle eine strömungsbedingte Abkühlung. Für die Leckagesuche wurden über zwei Stunden 50 Pa Unterdruck erzeugt. Die Abbildung zeigt als Lichtbild und als Thermographie beispielhaft den Anschluss der Außenwand an der Giebelseite zum Dach (im Lichtbild ist die Kante mit der Linie eingekreist). Erkennbar ist (bei höchster Temporaufauflösung) die geringfügig niedrigere Oberflächentemperatur der Außenwand (ca. 20,5°C) gegenüber dem Dach (ca. 20,8 °C). Der U-Wert der Wand ist etwas höhere als der des Daches. Das Rauschen und die Pixelunterschiede der hier verwendeten Flir-C2-Kamera dominiert bei diesen geringen Differenzen das Bild. Es gibt kein Anzeichen für irgendwelche Strömungspfade: Der Anschluss ist offensichtlich perfekt dicht. Dieses Ergebnis wurde überall rundum erreicht – die „eingeputzte Folie“ erweist sich so als dauerhaft sichere Luftdichtheitsstrategie.

Erwartungsgemäß ist nach einigen Jahren die Tapete an der Stoßstelle zwischen Außenwand und Dachkonstruktion aufgrund der Bauteilbewegungen aufgerissen – der zugehörige Riss ist in Abbildung 112 gut zu erkennen. Diese Situation wurde über die Jahre unverändert gelassen. In Bezug auf die Luftdichtheit war von Interesse, ob es sich nur um Risse in der Tapete handelte oder ob auch die überputzte Luftdichtheitsbahn beschädigt war.

Bei den Untersuchungen des Anschlusses Dach-Wand nach 10 und 25 Jahren wurde bei Unterdruck festgestellt, dass auch die Bereich mit den Tapetenabrissen noch immer sehr gut luftdicht sind; Schäden an der, mit ausreichend „Spiel“ (Überlänge)

verlegten Folie konnten nicht festgestellt werden. Bereits die Unterdruck-Thermographie nach 25 Jahren (Abbildung 113) zeigt, dass durch den Riss keine Luft einströmt (in höchster Temporaturauflösung ist nur Rauschen zu erkennen).

Zur Detektion und Visualisierung einer möglichen Leckageströmung wurde an den Rissen auch eine Rauchbeimischung aus einer Rauchpipette zugeführt. Der Rauch verteilt sich gleichmäßig ohne Impuls einer Leckageströmung (Abbildung 114). Auch damit zeigt sich, dass der Anschluss mit der eingeputzten Folie, trotz erwiesener Bewegung in der Konstruktion (Tapeten-Riss) absolut sicher dicht ist.



Abbildung 114: „Theaternebel“-Test am Anschluss Dach – Wand bei 50 Pa Unterdruck. In der Nähe des Tapeten-Risses wird Rauch eingeblasen. Es ist keine induzierte Luftbewegung durch einströmender Luft durch den Riss erkennbar. Das untere Bild ist 4 Sekunden nach dem oberen aufgenommen; der Nebel verteilt sich nur ungerichtet. Zur besseren Visualisierung ist ein Bogen schwarze Pappe auf die Wand geklebt worden.

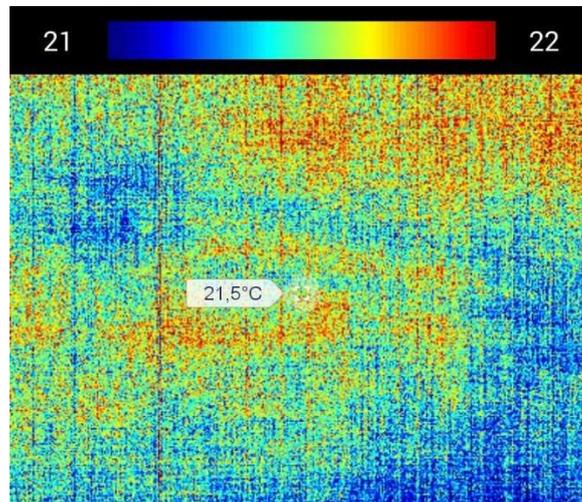
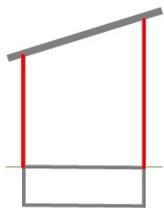


Abbildung 115: Thermographiebild bei Unterdruck der Position aus Abbildung 114 mit nur 1 K Temperaturintervall (ca. 0,04 K Auflösung). Auch bei dieser hohen Auflösung ist an der Kante nur Rauschen zu erkennen – es gibt keinen Kaltluftfall.

5.2 Luftdichtheit Wand und Anschluss Wand - Fensterrahmen



Für die Luftdichtung im Bereich der Außen- und Wohnungstrennwände wurde im Passivhaus ein vollflächig aufgebrachter Innenputz aus Gips verwendet. Es wurde speziell darauf geachtet, dass alle Mauerwerksbereiche vollständig verputzt wurden: Insbesondere auch die Bereiche, welche im fertigen Innenraum nicht sichtbar sind. Der Putz reicht also von Oberkante Rohfußboden bis Unterkante Rohdecke. Dies ist auch heute noch die sinnvolle Praxis für die Sicherstellung der Luftdichtheit von Massivbauten. Nach weiteren Tests in anderen Objekten stellte sich heraus, dass sich jede Art von Innenputz als Luftdichtheitsebene eignet, solange die innere Glattstrichfläche keine Risse aufweist. Das ist mit jedem herkömmlich verwendeten Putzmaterial erreichbar, gegebenenfalls unter Zusatz von Fasern, welche die Rissfreiheit ermöglichen (z.B. im Fall von Lehmputzen).

In die verputzten Massivwände sind die Fenster und Türen dauerhaft luftdicht einzubauen. Dies ist nicht durch einfaches Einputzen möglich, da der Putz wegen der unterschiedlichen thermischen und hygri-schen Ausdehnungseigenschaften regelmäßig abreißt – wie zahlreich dokumentiert wurde. Als Lösung wurden in diesem Gebäude Putzendschienen montiert, welche mit normalem, spritzbarem Acryl mit dem Fensterrahmen verbunden wurden. Vorher wurde zur Haftverhinderung an der Mauer

ein Stoffband eingelegt (Sicherstellung einer „Zweiflankenhaftung“⁶ – eine Rundschnur erfüllt den gleichen Zweck). Der Aufbau wird mit den folgenden Abbildungen erläutert und die Luftdichtheit des Details nach 25 Jahren thermographisch dokumentiert.

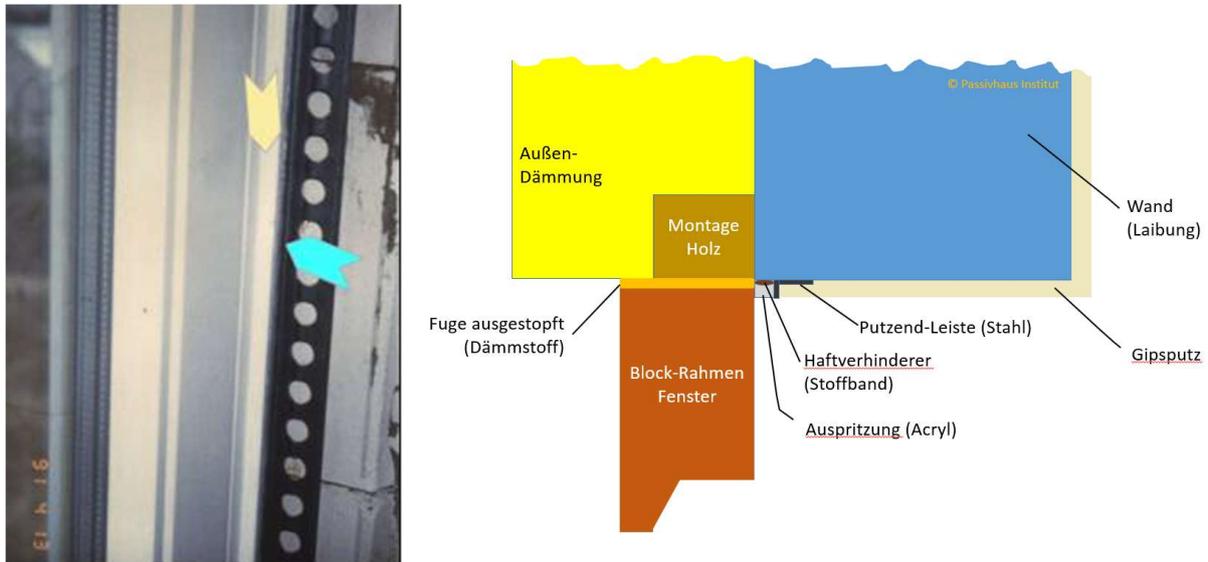


Abbildung 116: Links: Anschluss Fensterrahmen an Wand (Laibung) während der Bauphase. Die Fensterkanteln aus Holz sind luftdicht. In sie sind die Verglasungen mit einer umlaufenden Silikondichtung eingedichtet. Der Putz endet am Fenster etwa 10 - 12 mm vor dem Rahmen mit einer Anputzleiste (blauer Pfeil). Der Raum zwischen der Leiste und dem Fenster wurde mit Acryl luftdicht verfugt (gelber Pfeil). Wichtig ist, dass vor dem Verfugen zunächst ein Band zur Haftverhinderung am Untergrund eingelegt wird – die Haftung des Acryl soll ausschließlich an den beiden Flanken „Rahmen“ und „Anputzleiste“ erfolgen, damit genügend Dehnungsspiel für die Acrylmasse besteht. Rechts: Schematische Aufbauskinne der Verbindung Wand – Fenster mit Anputzleiste und Acrylfuge mit hinterlegtem Haftverhinderer.

⁶ Haftet die Dichtmasse an drei aneinandergrenzende Flanken, so ist das Material entlang dieser gesamten Fläche fixiert; der Bereich, in dem sich die Masse dehnen könnte, ist dann verschwindend schmal. Jede Krafteinwirkung führt dann auf diesem schmalen Ausdehnungsbereich zu großen Spannungen, die i.d.R. zum Abriss führen. Dieser Vorgang ist es, der die Verwendung elastischer Fugenmassen in Verruf gebracht hat – er hat aber nichts mit der Eignung dieser Lösung zu tun, sondern ausschließlich mit einer inkompetenten Anwendung.

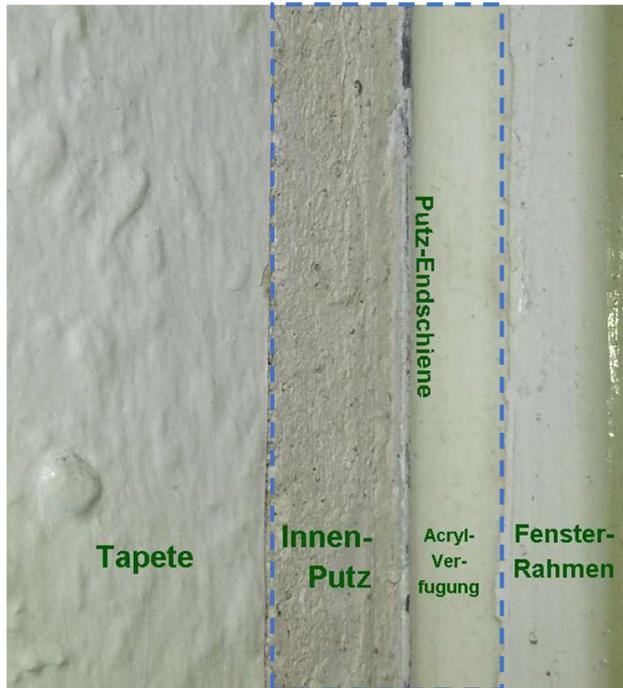


Abbildung 117:

Foto nach 25 Jahren vom Anschluss Wand – Fensterrahmen nach dem Freischneiden der Tapete (innerhalb der blauen Strich-Linie).

Erkennbar von links nach rechts: Tapete (abgeschnitten), Putz (wie er unter der Tapete liegt), Kante der Putzendschiene, Oberfläche der Acrylfuge (Breite ca. 12 mm), Lack auf dem Fensterblockrahmen. Das Bild zeigt keine Auffälligkeiten wie Ablösungen etc. Beim Drucktest am 11.02.2016 war diese Anschlussfuge an allen Fenstern rundum absolut dicht. Die Acryloberfläche federt bei Druck mit einem Finger nach wie vor elastisch ab.

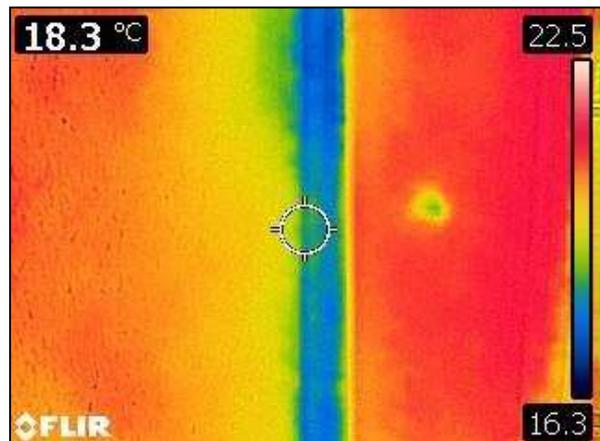


Abbildung 118: Das Thermographiebild bei 50 Pa Unterdruck zeigt die geringere Wärmedämmung im Bereich des Blockrahmens, weist aber keinen Hinweis auf eine Luftströmung auf. Etwas weiter oben und unten gibt es allerdings eine gewisse einströmende Luftmenge aufgrund der nicht mehr perfekt elastischen Fensterlippendichtung zwischen Flügelrahmen und Blendrahmen. Bei dem geringfügig kälteren Punkt auf dem Rahmen handelt es sich um den Schraubenkopf zur Befestigung der Dämmschale.

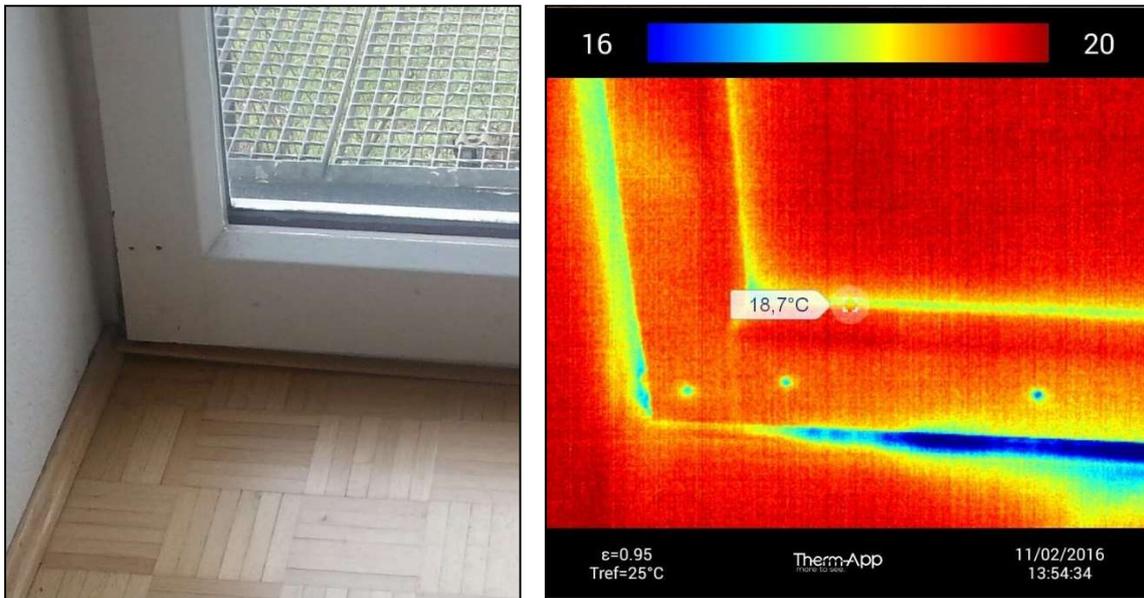


Abbildung 119: Das gleiche Fenster wie im vorausgehenden Bild etwas weiter unten. Hier ist in der Nähe des Scharniers (links in der Thermographie) eine geringfügige Einströmung durch die Lippendichtung des Fensterflügels erkennbar, die Einbau-fuge ist jedoch absolut dicht. Deutlich ist die einströmende Kaltluft im unteren Bereich des Fensterflügels erkennbar. Nach dem Einsetzen der neuen Lippen-dichtungen (siehe weiter unten) ist diese Leckage aber ebenfalls vernach-lässigbar (Die folgende Abbildung 120, aufgenommen mit der FLIR-Kamera einen Tag später zeigt die gleiche Fenstertür).



Abbildung 120: Das Fenster aus Abbildung 118 und Abbildung 119 in der Unterdruck-IR-Aufnahme während der Nachkontrolle nach dem Auswechseln der Dichtlippen in den Fensterflügeln. Im Vergleich zur Situation vor dem Dichtungstausch sind die massiven Einströmfahnen am unteren Fensteranschluss verschwunden. Die Auskühlung am linken Rand (ca. 3 K) ist, wie oben erklärt, auf die geringere Wärmedämmung des Blockrahmens am Anschlag zurückzuführen. Geringfügige Abkühlung durch einströmende Luft ist noch immer erkennbar - das ist konsistent mit der Erkenntnis, dass ein großer Teil der verbleibenden Restleckage immer noch durch Undichtheiten an den Fenstern resultiert. Diese sind jedoch in dieser geringen Höhe tolerierbar. Bei den Thermographien mit der FLIR C2 handelt es sich um eine Kombination von Thermogramm und Lichtbild. Damit kann man sich gut orientieren, es erscheint aber fälschlich so, als ob man z.B. durch Glasscheiben „hindurchsehen“ kann. Mit der Thermographie werden jedoch nur die Oberflächentemperaturen der für mittleres Infrarot völlig intransparenten Glasscheibe detektiert.

Die Untersuchung aller Fenster und Türen hat ergeben, dass der Anschluss: „Putz – Endschiene – Acrylfuge mit Haftverhinderer – Blockrahmen“ überall auch nach 25 Jahren luftdicht ist, somit als dauerhaft luftdicht angesehen werden kann. Eine moderne Variante dazu ist die Verwendung einer sog. „Apu-Leiste“ (Anputzleiste) mit einem luftdichten Dichtband mit ausreichendem Funktionshub – ein solcher Fensteranschluss ist sehr leicht und kostengünstig herstellbar.

5.2.1 Bodenanschluss Fenster

Einige kleine Restleckagen wurden bei der Nachuntersuchung wiederholt am Bodenanschluss in den Ecken der bodentiefen Fensterrahmen festgestellt. Diese Abdichtung konnten im Bauprozess aus Ermangelung geeigneterer Produkte nicht optimal gelöst werden. Es wurde mit spritzbarer Dichtmasse (Silikon) abgedichtet. Auch

hier wurde vorher ein Haftverhinderer (Stoffband o.ä.) eingelegt. Das Silikon ist während der Nutzungsphase vor UV-Licht geschützt, da der Aufbau von dem Bodenaufbau (Estrich, Fußbodenbelag) überdeckt wird. An den punktuellen Fensterhalterungen (Metalllaschen zur Lastabtragung, siehe Abbildung 121) sind kleinere Restleckagen verblieben. In der Längsausdehnung der Verbindung selber wurden keine Restleckagen festgestellt. Die Eckleckagen (Festgestellt als Sekundärleckage in der Ecke des Fußbodenbelags) wurden auch schon - in der gleichen Größenordnung - bei der Nachmessung 2001 festgestellt. Damit ist nicht davon auszugehen, dass sich über die weiteren Jahre Veränderungen einstellen werden. Insgesamt ist zu resümieren, dass auch diese nicht ganz optimale Abdichtung bis auf wenige Punkte noch luftdicht ist.



Abbildung 121: Foto vom Fensteranschluss (unten) während der Bauzeit (1991). Die Fensterabdichtung ist mit einer Dreiecksleiste ausgeführt (gelb). Zur Lastabtragung sind Stahllaschen auf dem Rohfußboden befestigt. Im Bild verläuft ein Kabelleerrohr (schwarz/weiß) über diese Lasche (beachte: Ausreichender Abstand von der Anschlussfuge).



Abbildung 122: Kleine tolerierbare Restleckagen in den Ecken der Anschlusspunkte „Fenster an Betonfußboden“ bei der Blower Door Messung 2016.

5.2.2 Luftdichtheit Schalter und Steckdosen in Außenwänden

Schaltern und Steckdosen in Außenwänden stellen klassische Leckagen bei der Verwendung von z.B. Hochlochziegeln und Kalksandstein dar. Die luftdichte Ebene „Innenputz“ wird an diesen Punkten regelmäßig unterbrochen, was ungewollte Luftströmungen ermöglicht. Im Passivhaus Kranichstein wurde die Luftdichtheit an diesen Punkten kostengünstig mit extra viel Gips realisiert: Dafür werden die Kernbohrungen für die Unterputz-Leerdosen etwas größere als allgemein üblich gebohrt. In diese werden die Leerdosen - erst nach dem Verlegen und Einführen der Kabel in die Dose - mit üppig viel Gips eingedrückt. Der Gips verschließt die Kabelwege in der Wand bis zum Eintritt der Kabel in die Dose vollständig. Der herausquellende, überschüssige Gips wird entfernt. Dieser zeitliche Ablauf (**„erst die Kabel, dann die Dose“**) ist damit anders als bei der üblichen Verlegung von Kabeln. Vom PHI wurde später diese Einbauart im Modell erstellt, um das Vorgehen als Fotostrecke veranschaulichen zu können (Abbildung 123).

Bei der Untersuchung des Gebäudes wurden in der Regel an den Schaltern und Steckdosen keine Restleckagen festgestellt. Damit kann diese Einbauweise, auch nach Rücksprache mit Elektrofachkräften, als einfach, kostengünstig und dauerhaft empfohlen werden.

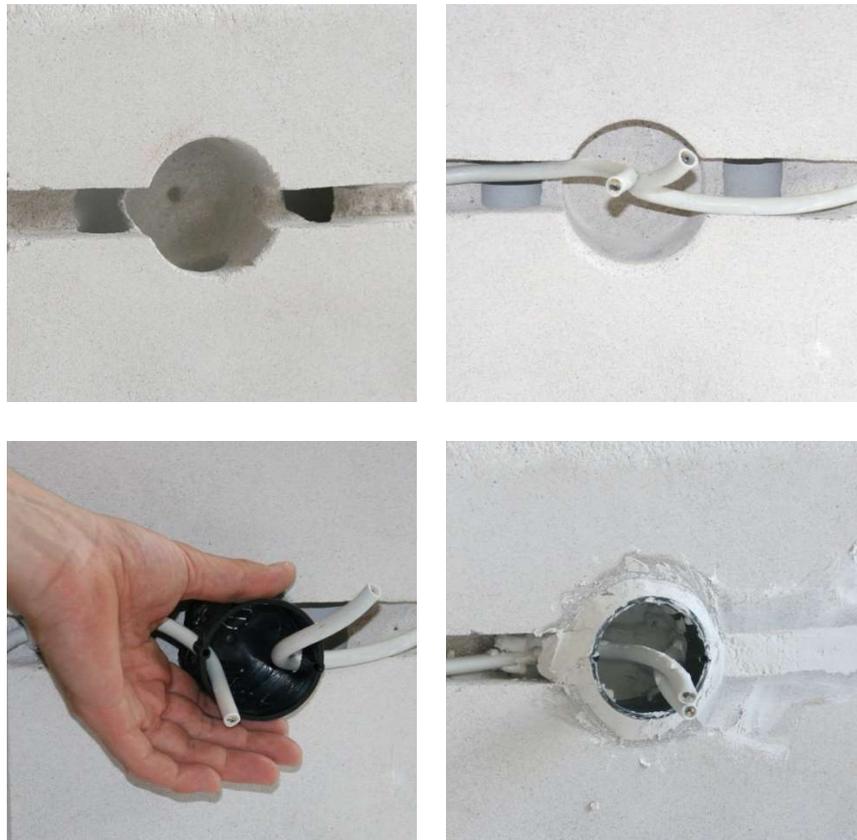
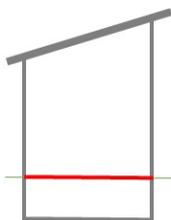


Abbildung 123: Luftdichte Montage einer Unterputzdose für Schalter- und Steckdosen mittels übergroßem Kernloch sowie Einbau nach der Verlegung der Kabel mit Gipsüberschuss in einer Kalksandsteinwand (Quelle: PHI).

5.3 Luftdichtheit Bodenplatte EG und Anschluss Außenwand



Der Keller des Gebäudes befindet sich außerhalb der thermischen sowie luftdichten Hülle. Daher stellt die Betonbodenplatte als unterer Abschluss die luftdichte Ebene dar. Eine ordnungsgemäß gegossene Ortbetondecke ist in sich als konstruktiver Werkstoff luftdicht. Die aufsteigenden Außenwände sowie alle Kabel und Rohrleitungen in Richtung Keller müssen daran luftdicht verbunden werden. Dazu wurde der Innenputz der Außenwände vollständig bis auf die Rohbetondecke geführt und so die beiden Flächenabdichtungen miteinander verbunden. Es ist dabei zu beachten, dass auch im später nicht sichtbaren Bereich (vom Estrich verdeckt) sorgfältig bis auf den Rohbetonboden gearbeitet werden muss. Das funktioniert, da an dieser Stelle auf Grund der vertikalen Lasteintragung eine kraftschlüssige Verbindung vorliegt und hier Rissbildung nicht zu erwarten ist.

Alle Durchbrüche für Kabel- und Rohrleitungen wurden während der Bauzeit mit flüssigem Anhydrit verfüllt, der sich beim Trocknen ausdehnt und so auch kleine Spalte verschließt. Damit ist einfache, sichere und kostengünstige Lösung für horizontale Abdichtungen gewählt worden.

Während der Leckagesuche bei 50 Pa Unterdruck nach 25 Jahren wurden keine nennenswerten Leckagen an den Verbindungen Außenwand-Bodenplatte oder an Durchbrüchen festgestellt. Die Abdichtungen können damit auf jeden Fall als Dauerhaft eingestuft werden.

5.4 Austausch der Fenster- und Türdichtungen

Bereits bei der Luftdichtheitsmessung nach 10 Jahren (2001) wurde festgestellt, dass die Hauptleckagen zwischen Blend- und Flügelrahmen zu finden waren. Diese Leckagen konnten weitgehend ganz einfach durch eine Nachstellung (erhöhen bzw. vergleichmäßigen des Anpressdrucks) behoben werden. Solches Nachjustieren wird bei Fenstern von den Herstellern generell regelmäßig empfohlen, aber im Regelfall nicht durchgeführt.

Nach 25 Jahren war der Fachfirma bewusst, dass das Justieren der Fensterflügel keinen ausreichenden Spielraum mehr geben würde. Die Rückstellkraft der Dichtungen hat über die 25 Jahre an Flexibilität verloren. Es war an der Zeit die „Flügel-dichtungen“ vollständig – in jedem Fenster und der Haustür – auszutauschen. Dies war ein überschaubarer Aufwand von etwa einer bis eineinhalb Stunden pro Gebäude.

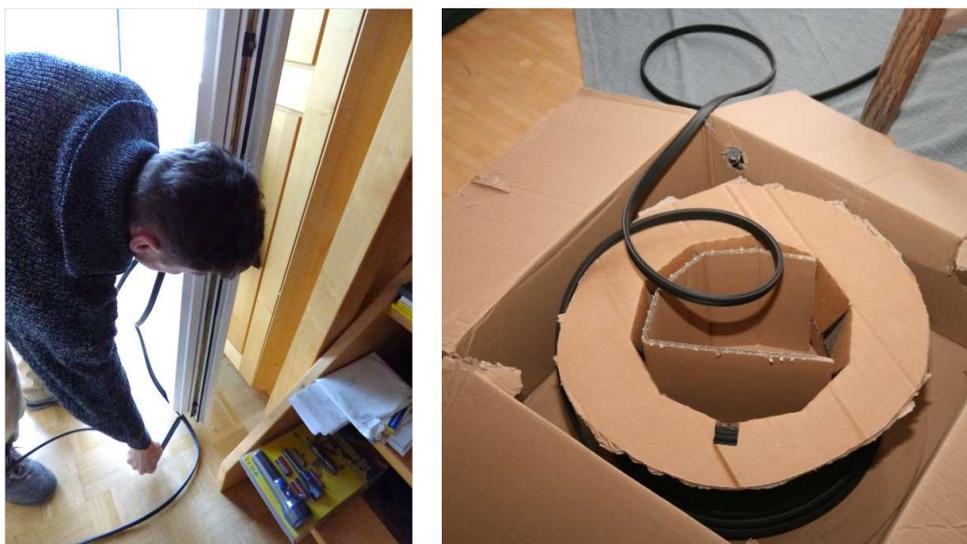


Abbildung 124: Fachkraft des Handwerks beim Austausch der Fensterdichtungen am 12.02.2016 in Haus A und die verwendeten Dichtung (Meterware).

5.5 Luftdichtheit im Langzeittest - Messergebnisse

Im Jahr 1991 waren die Drucktestergebnisse der vier Einheiten des ersten Passivhauses exzeptionell gut. Alle vier Häuser wiesen geringe n_{50} -Ergebnisse zwischen 0,2 und 0,4 h^{-1} auf, was zuvor selbst von Experten nicht für möglich gehalten worden war. Damit war der Beweis geführt, dass die explizite Planung der Luftdichtheit auch den gewünschten Erfolg erbringen kann.

Tabelle 7: Drucktestmessergebnisse der ersten Blower Door Messung vom 24./25.05.1991 der vier Teilhäuser des ersten Passivhaus in Darmstadt Kranichstein.

Messung	n_{50} -Drucktest-luftwechsel [h^{-1}]
Haus A	0,24
Haus B	0,28
Haus C	0,26
Haus D	0,40
Haus A, Haustür abgeklebt	0,25
Haus C, ein Fenster im EG gekippt	12,89

Natürlich war nicht von vornherein klar, wie dauerhaft die verwendeten Materialien und Anschlusskonstruktionen sein würden. Das Ziel ist es, eine dauerhafte, über die gesamte Lebensdauer des Gebäudes hohe Luftdichtheit des Baukörpers sicher zu stellen. Aus diesem Grund wurden im Laufe der Jahre mehrere Drucktests in zwei der vier Häuser wiederholt (vgl. auch [Peper et al. 2005]). Die Ergebnisse konnten damals gut reproduziert werden.

Wie auch bei den vorausgegangenen Messungen wurden bei der aktuellen Überprüfung jeweils die Lüftungsrohre direkt am Lüftungsgerät im Keller an der Zu- und Fortluft abgedichtet. Mögliche Restleckagen des Lüftungssystems (Rohrleitungen und Gerät mit Wärmetauscher) werden bei der Wahl dieser Abdichtungsstellen mitgemessen; sind also im Messergebnis enthalten. Für die Messungen wurde das Drucktestgebläse jeweils im Wohnzimmer in einer Terrassentür eingebaut. Die Durchführung der Messungen erfolgte normkonform nach DIN EN 13829 jeweils mit einer Unter- sowie einer Überdruckmessreihe. Die Drucktestprotokolle der Messungen nach dem Austausch der Dichtungen sind im Anhang dokumentiert.



Abbildung 125: Links: Der erste Drucktest wurde nach Fertigstellung der luftdichten Hülle am 24./26.05.1991 durch das Ingenieurbüro ebök durchgeführt.

Rechts: Der aktuelle Blower Door Test (hier in Haus B) erfolgte nach 25 Jahren am 11./12.02.2016 durch das PHI.

Wie bereits oben beschrieben, wurden die Fensterdichtungen durch einen Handwerksbetrieb ausgetauscht. Um den Einfluss dieser Verbesserungsmaßnahme dokumentieren zu können, wurden beide Häuser vor und nach der Maßnahme gemessen. Die Ergebnisse zeigen, dass die Differenz zwischen den Messungen immerhin 0,14 bzw. 0,07 h⁻¹ betragen. Das entspricht Volumenstromdifferenzen von 38 bzw. 69 m³/h. Die Ergebnisse der vier Messungen sind in Abbildung 126 dargestellt.

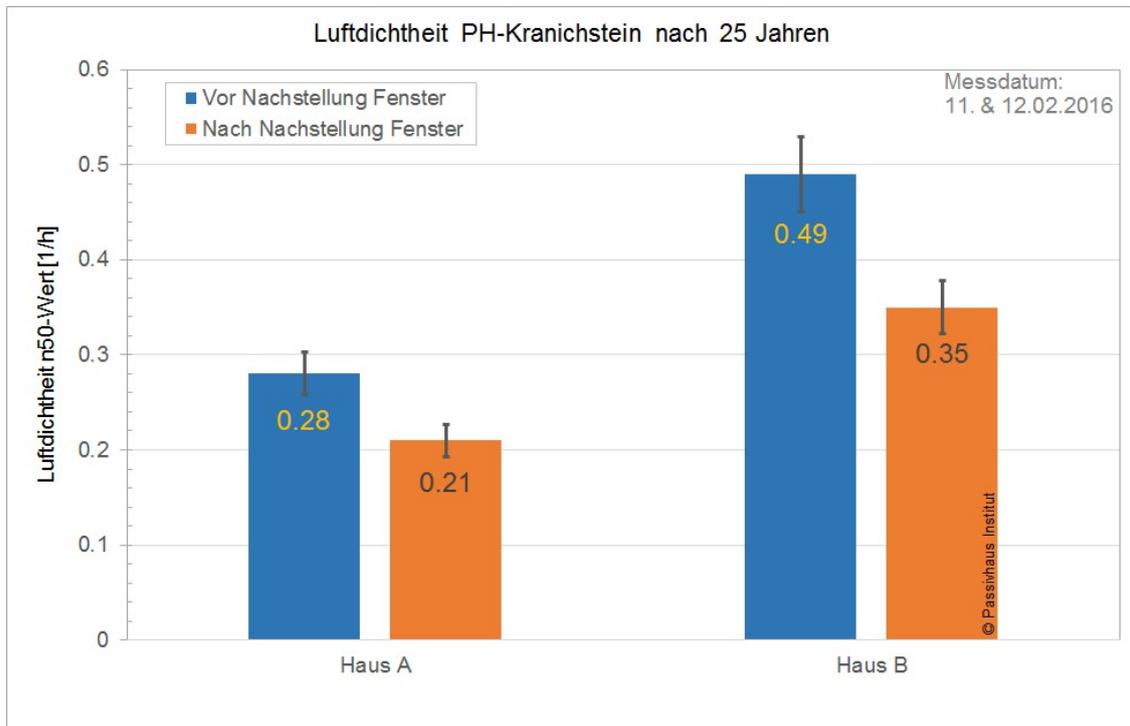


Abbildung 126: Luftdichtheitsmessungen im Februar 2016 vom Passivhaus Kranichstein (Haus A und B) vor und nach dem Austausch der Fenster- und Tüрдichtungen nach 25 Jahren.

Damit zeigt sich, dass bei der aktuellen Messung auch nach 25 Jahren weiterhin extrem gute Luftdichtheitsergebnisse erreicht werden. Die einzigen nennenswerten Verschlechterungen können so in beiden Häusern der Alterung der Fenster- und Tüрдichtungen der öffenbaren Flügel zugeordnet werden. Es ist ein normaler Prozess, dass die Rückstellkraft der Dichtung nach 25 Jahren nachlässt (genau aus diesem Grund handelt es sich bei den Lippendichtungen um leicht zu wechselnde Austausch-teile). In beiden Gebäuden konnte mit der Maßnahme eine signifikante Reduktion erreicht werden, in Haus IV sogar der ursprüngliche Kennwert wieder hergestellt werden: Mit $n_{50} = 0,21$ bzw. $0,35 \text{ h}^{-1}$ wurden die guten Ergebnisse der Vormessungen reproduziert. Eine Übersicht über alle Messergebnisse der beiden Teilgebäude des ersten Passivhauses ist in Abbildung 127 zusammengestellt.

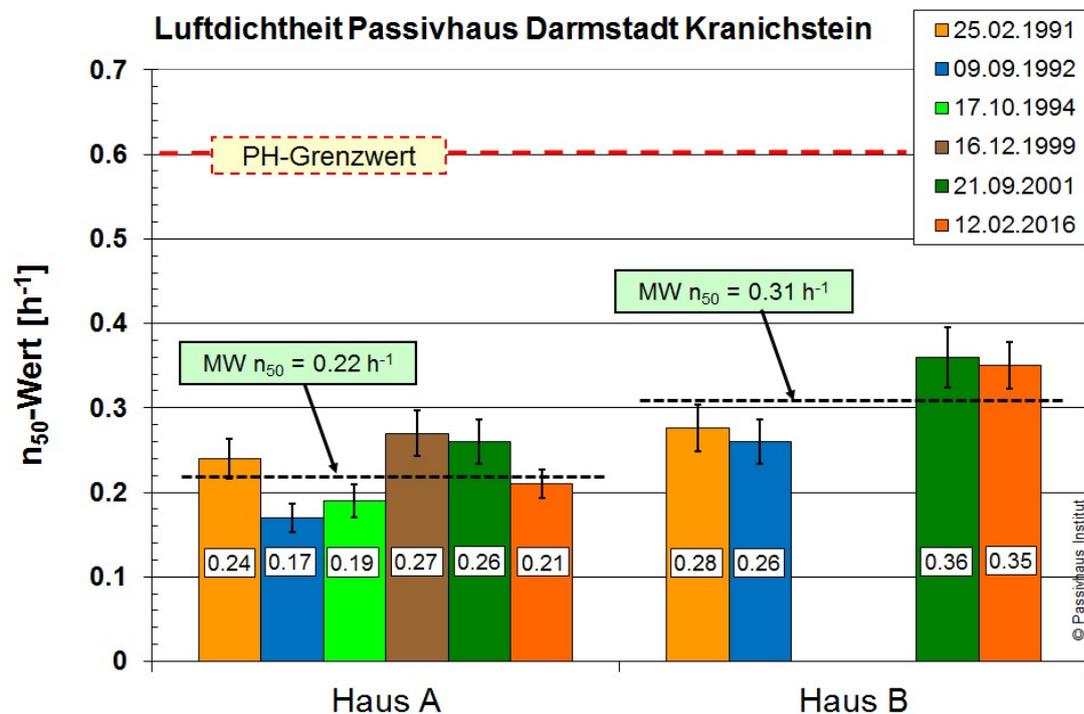


Abbildung 127: Übersicht aller Drucktestmessungen von zwei der vier Einheiten vom Passivhaus Kranichstein welche über die Jahre durchgeführt wurden. Nicht dargestellt sind die beiden Messungen vor dem Austausch der Dichtungen.

5.6 Fazit Luftdichtheit

Insgesamt ist festzuhalten, dass die detaillierte Untersuchung der Bauteil-Anschlüsse die Dauerhaftigkeit der ausgeführten Verbindungen zeigt, obwohl 1991 noch nicht die heute verfügbaren Materialien und Konstruktionslösungen zur Verfügung standen. Die sehr guten Luftdichtheitsergebnisse des Gebäudes von deutlich unter $n_{50} = 0,4 \text{ h}^{-1}$ liegen über den langen Zeitraum gesichert vor. Eine dauerhaft luftdichte Ausführung der Gebäudeaußenhülle ist vor allem eine Frage der Planung (vgl. dazu auch [Peper/Feist 1999]). Es kommt auf die Anschlüsse der luftdichten Ebenen an den Kanten zwischen Bauteilen an. Hierfür gibt es einfach auszuführende Standardlösungen, wie z.B. die elastisch verfüllte Fuge (mit Haftverhinderungsband „Rundschnur“ um Dreiflankenhaftung zu vermeiden) oder die eingeputzte Dichtungsbahn. Diese Verfahren wurden auch bereits beim Bau des Passivhauses in DA-Kranichstein eingesetzt und sie haben sich auch nach 25 Jahren als nach wie vor perfekt luftdicht erwiesen.

6 Lüftung mit Wärmerückgewinnung

Neben der Entwicklung von Fenstern, die in mitteleuropäischem Klima einen bilanziellen Solargewinn bereitstellen können, lag beim Bau des ersten Passivhauses ein weiterer Schwerpunkt auf der Verminderung von Lüftungswärmeverlusten. Neben den bauphysikalischen Untersuchungen wurden daher auch die Lüftungsanlage sowie die Raumluftqualität messtechnisch überprüft.

6.1 Lüftungsanlage in Darmstadt Kranichstein

6.1.1 Lüftungssystem und Betriebsweise

Der primäre Zweck einer Lüftungsanlage ist es, die Wohnräume gleichmäßig und zuverlässig mit frischer Luft zu versorgen. Mit Abluftanlagen waren in Niedrigenergiehäusern bereits Erfahrungen gesammelt worden. Der geringe Heizwärmebedarf in einem Passivhaus kann nur mit einer zusätzlichen Wärmerückgewinnung aus der Abluft erreicht werden. Daher wurden alle vier Wohnungen des Gebäudes jeweils mit einem Kanalnetz für Zu- und Abluft sowie einem Wärmerückgewinnungsgerät ausgestattet. Diese Anlagen ermöglichen sowohl die kontinuierliche Versorgung der Wohn- und Schlafräume mit der hygienisch erforderlichen Frischluftmenge und sind auch geeignet, den Lüftungswärmeverlust wesentlich zu reduzieren [Feist 1997c]. Für das Kanalnetz wurden metallische Wickelfalzrohre und zugehörige Bögen und Passstücke verwendet.

Der schematische Gebäudequerschnitt zeigt das Lüftungssystem (rot) der Wohnungslüftungsanlagen. Das Zentralgerät mit dem Wärmeübertrager befindet sich im Keller außerhalb der thermischen Hülle.

Die Anlage wurde auf einen balancierten Betrieb ausgelegt, das heißt, Zuluft-Massenstrom und Abluft-Massenstrom sind zu allen Zeiten gleich groß. Beide Kanalstränge gehen vom Wärmeübertrager aus bzw. führen zu diesem zurück. Nach Übertragung der Wärme von der Abluft auf die Zuluft im Wärmetauscher wird die Fortluft nach außen abgeführt; gleichzeitig wird eine entsprechende Menge Außenluft über ein Filter in das Außenluft-Kanalnetz angesogen. Zur Vermeidung von Frostgefahren im Wärmeübertrager, wird die Außenluft durch einen tief im Erdreich verlegten Kanalabschnitt geführt. Anschließend tritt die vorgewärmte Außenluft in den Wärmeübertrager ein.

Erkennbar in der Schnittzeichnung ist auch die Außenluftansaugung über einen Filterkasten, der sich in ca. 2,8 m Höhe über Gelände am Glasvorbau auf der Nordseite

(im Schnitt rechts) des Gebäudes befindet. Diese erhöhte Anordnung wird auch von der Hygienerichtlinie VDI 6022 empfohlen. Der Grund liegt darin, dass die Ansaugung außerhalb der Vegetationszone erfolgen soll; jegliche Radonansaugung wird damit ebenfalls vermieden. Der Filterkasten ist mit einem großflächigen und damit druckverlustarmen Industriefilter der Filterqualität F8 ausgestattet. Dies entspricht den Empfehlungen der VDI 6022 (Mindestanforderung F7).

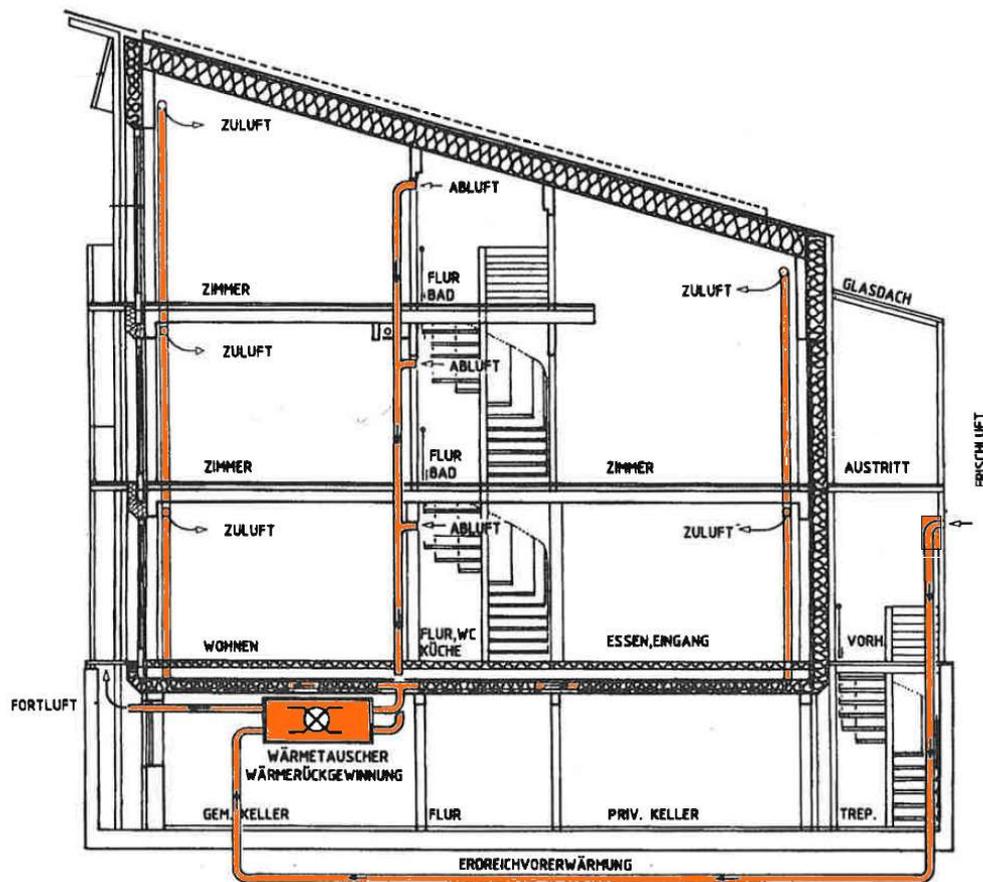


Abbildung 128: Schematische Übersicht der Lüftungsanlage im Passivhaus Darmstadt-Kranichstein.

Die Zuluft wird in nördlichen und südlichen Steigsträngen zu den jeweiligen Zuluft-räumen (Schlafräume, Arbeitszimmer, Wohnräume) geführt. Die Steigstränge im Gebäudekern führen die Abluft aus Badezimmer, WC und Küche zurück zum Wärmerückgewinnungsgerät. Die vier Fortluftauslässe der vier Einheiten befinden sich an der Westfassade bzw. an der Südwestecke des Gebäudes. Eine Kurzschlussströmung (Ansaugung von Fortluft) wird damit vollständig vermieden.

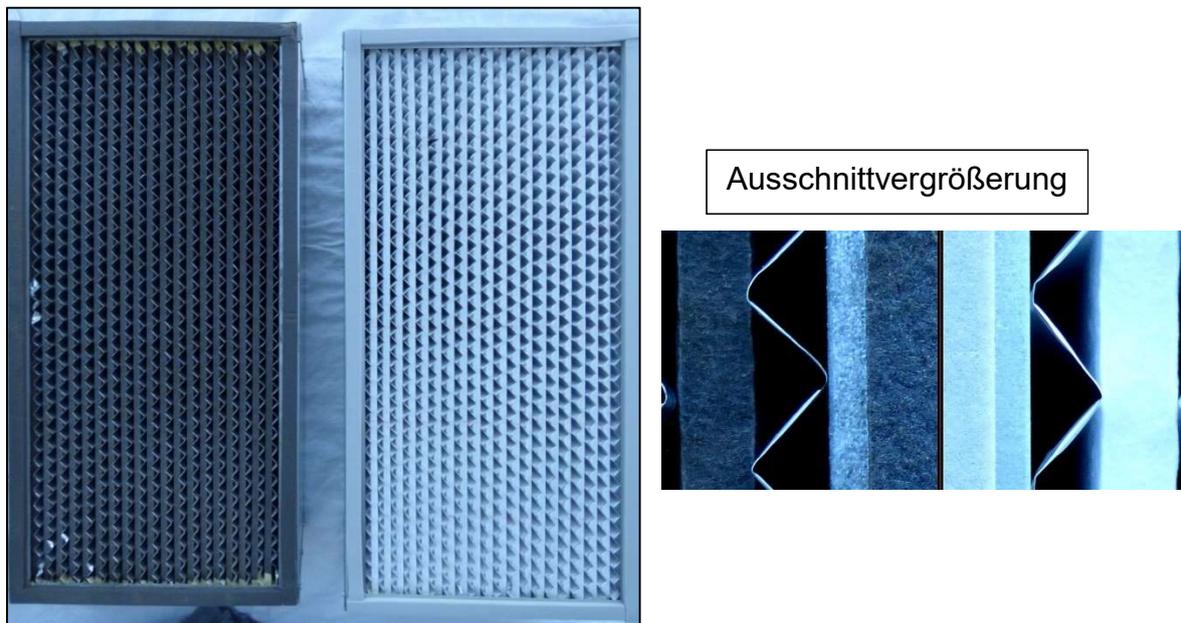


Abbildung 129: Vergleich der F8-Filter im Ansaugkasten: links: alt (1 Jahr);rechts: neu (linkes Bild Totale, rechtes Bild vergrößerter Ausschnitt). Die Filter waren bei der Untersuchung trocken, ohne sichtbaren biologischen Bewuchs und ohne auffällige Radioaktivität.

Die Zuluftauslässe wurden damals mit Tellerventilen an den Außenwänden ausgeführt. Hierfür war zum Zeitpunkt des Baus noch ein aufwendiges Kanalnetz mit langen Kanälen nötig. Mit den heute üblichen Weitwurfdüsen, welche mit extrem kurzen Leitungswegen vom Gebäudekern über die Zimmertüren geführt werden, erreicht man deutlich kompaktere, im Bedarfsfall leichter zu reinigende Kanalnetze und eine noch kostengünstigere Ausführung. Darüber hinaus wurden die Abluftventile damals auch noch ohne Vorlegefilter ausgeführt.

Abluftventile befinden sich in den Sanitärräumen sowie in der Küche. Hier wird verbrauchte und mit Feuchtigkeit angereicherte Luft aus dem Gebäude entfernt. Ursprünglich wurde das Gebäude hier ebenfalls mit einfachen Tellerventilen ausgestattet. Die Inspektion des Kanalnetzes im Rahmen dieser Nachuntersuchung zeigte eine deutlich sichtbare, aber akzeptable Verschmutzung des Abluftstranges. Eine Reinigung ist auch nach dieser langen Zeit nicht unbedingt erforderlich. Nichtsdestotrotz wurden nach der durchgeführten Inspektion die Ventile durch Ausführungen mit zusätzlichem Vorlegefilter ersetzt. Diese enthalten ein Edelstahlgeflecht als G2-Filter, das einfach in der Geschirrspülmaschine gereinigt werden kann. Staubeinträge sind dadurch zukünftig weiter reduziert und es wird erwartet, dass es nun auch auf sehr lange Zeiträume hinweg keinen Bedarf für eine Kanalreinigung auch im Abluftnetz geben wird.



Abbildung 130: links: Zuluftauslass mit Tellerventil im Wohnzimmer/Erdgeschoss des Passivhauses Darmstadt-Kranichstein. Der Luftkanal ist bis an die Außenwand geführt. Heute verfügbare Weitwurf-Ventile erlauben deutlich geringere Kanal-längen durch Anordnung an einer Innenwand.
rechts: Abluftventil Badezimmer, 2016 nachgerüstet mit auswaschbarem G2-Vorlegefilter in einem Edelstahlgehäuse.

Bei dem „zonierten“ Lüftungskonzept mit Zu- und Ablufträumen werden Verkehrsflächen wie Flure durch überströmende Luft aus den Zulufräumen versorgt. Die Überströmung erfolgt durch einfache Gitter in den Innentüren. Von dort gelangt die Luft durch Überströmöffnungen über den Türen in die Feuchträume, in denen die Abluft-Absaugungen positioniert sind. Die unterschiedliche Ausführung der Überströmöffnungen (im Türblatt bzw. über den Türen) erklärt sich aus den in Feuchträumen



konzentrierten, höheren Volumenströmen. Das Ventil ist im Bad bewusst oben montiert, um Luftströme im Fußbereich zu begrenzen (Komfort im Bad).

Abbildung 131: Überströmöffnung in der Tür eines Zulufrumes. Der Druckverlust ist kleiner als 1 Pa.



Abbildung 132: Überströmelement oberhalb der Badezimmertür. Für den hier größeren Luftvolumenstrom wurde ein entsprechender Querschnitt vorgesehen. Das Ventil ist im Bad bewusst oben montiert, um Luftströme im Fußbereich zu begrenzen (Komfort im Bad). Der Druckverlust ist außerordentlich gering.

6.1.2 Lüftungsgeräte mit Wärmerückgewinnung

Zum Errichtungszeitpunkt des Gebäudes waren Lüftungs-Zentralgeräte mit hochwertiger Wärmerückgewinnung (> 75%) außerordentlich selten. Das schließlich gewählte Gerät („Temovex 480“ aus Schweden) besaß einen hochwertigen Gegenstrom-Luft/Luft Wärmeübertrager aus Aluminiumplatten mit insgesamt $2 \times 19 \text{ m}^2$ Fläche. Allerdings war es serienmäßig mit Ventilatoren mit konventionellen Wechselstrommotoren zur Luftförderung bestückt. Damit war sein Stromverbrauch mit 2-mal 100 Watt Dauerleistung prohibitiv hoch. Zudem war die Wärmedämmung des Gehäuses nicht optimal. In dieser Form hätte ein Missverhältnis aus Stromeinsatz und rückgewonnener Wärme bestanden; dies hätte die gesamte Wärmerückgewinnung in Frage gestellt.



Abbildung 133: Der verwendete Gegenstrom-Luft-Luft-Wärmeübertrager für die Wärmerückgewinnung. Die Aufnahme zeigt den Blick auf das Plattenpaket von der Abluft / Zuluft-Seite. An dieser Stelle wird der Ventilatorkasten mit den beiden ECM-Lüftern aufgesetzt

Um die Wärmerückgewinnung aus der Abluft zu einem hocheffizienten Element des Gebäudes weiter zu entwickeln, musste der Stromeinsatz zur Luftförderung entscheidend vermindert werden. Dies gelang durch erstmaligen Einsatz von Ventilatoren mit elektronisch kommutierten Gleichstrommotoren (ECM-Lüftern) anstelle der ursprünglichen Wechselstrom-Ventilatoren. Der Leistungsbedarf konnte hierdurch von über 100 W auf etwa 25 W bei 105 m³/h Förderleistung gesenkt werden.

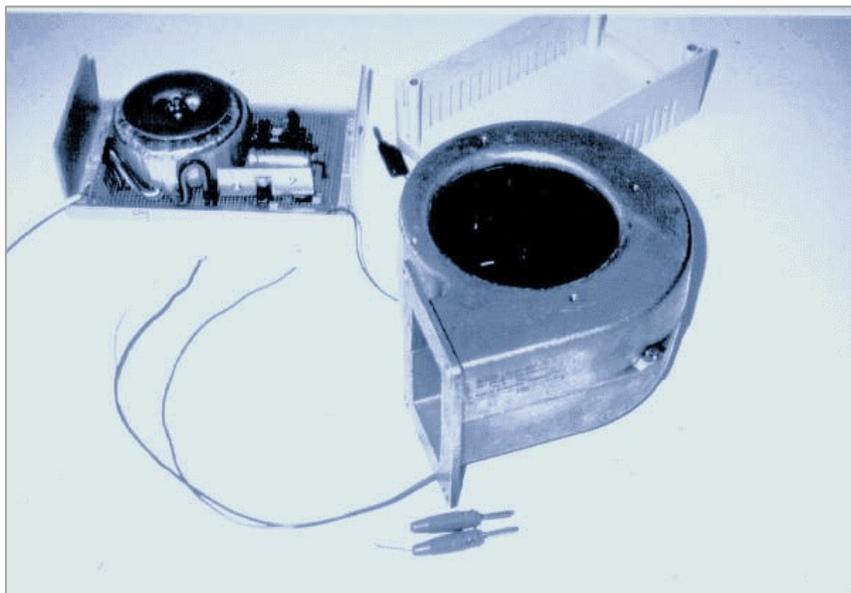


Abbildung 134: Erstmals in Darmstadt-Kranichstein in Wohnungslüftungsanlagen eingesetzt: das elektronisch kommutierte Gebläse mit hoher Stromeffizienz. Es wurde eine passende Steuer- und Regeleinheit entwickelt (geregelter Gleichstromnetzteil oben links im Bild).

Zudem wurde das solcherart ertüchtigte Gerät durch um das Gehäuse angebrachte Dämmplatten aus Polyurethan thermisch verbessert. Interne Leckagen wurden ebenfalls vermieden und eine Leckagerate unter 1% des Fördervolumenstromes messtechnisch bestätigt [AkkP 4].

Heutige Wärmerückgewinnungsgeräte werden regelmäßig mit leicht demontierbaren Wärmeübertragern ausgestattet, diese könnten also jederzeit zu Reinigungszwecken leicht aus- und eingebaut werden. Im Falle des Prototypen in Darmstadt-Kranichstein wurde der Plattenwärmeübertrager aber fest mit dem Gehäuse verbunden und in der gesamten Betriebszeit über 25 Jahre nicht ausgebaut und gereinigt.

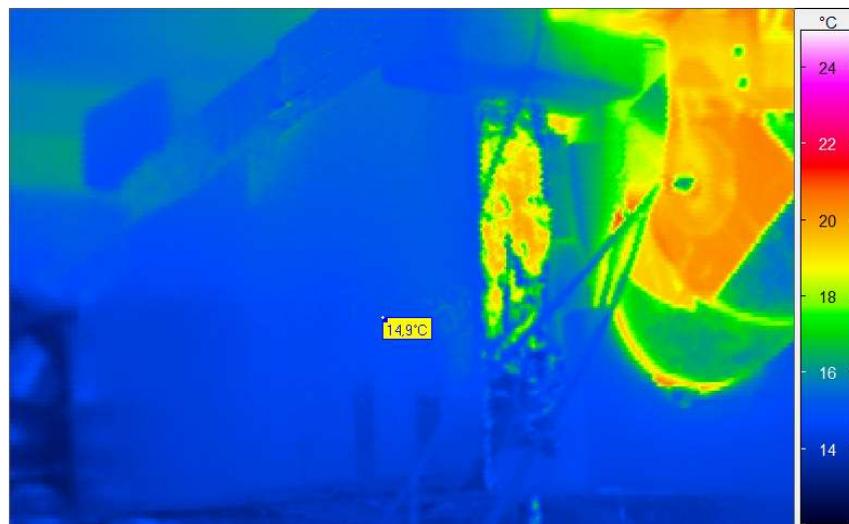


Abbildung 135: Das Wärmerückgewinnungsgerät im Keller ist sehr gut wärmegeklämt; es weist Oberflächentemperaturen von um 14°C auf. Wegen der Durchführung von Experimenten im Zuluftstrang (Luftentnahmen, Messungen der Zustandsgrößen) ist das Zuluftrohr vorn rechts allerdings zum Zeitpunkt der Thermographie nicht gedämmt. Seine Oberfläche hat eine Temperatur von 20,2°C, dies entspricht in etwa der Zulufttemperatur.



Abbildung 136: Im visuellen Bild ist am unteren Rand die Oberkante des Bildschirms der Thermographiekamera zu sehen. Korrekte Oberflächentemperaturen sind in diesem Bild thermographisch nur an den nicht metallischen und nicht mit Aluminium beschichteten Oberflächen messbar: z.B. auf dem Klebeband (dort Messpunkt) und auf der Oberfläche der Luftdichtungstülle für den Temperatursensor (rechts im Zuluftkanal).

6.2 Wirksamkeit und Effizienz der Lüftungsanlage

6.2.1 Stromverbrauch und Wärmebereitstellungsgrad des Wärmerückgewinnungsgerätes

Um die im realen Betrieb nach nunmehr 25 Jahren vorliegende Effizienz des Lüftungsgerätes messtechnisch über einen längeren Zeitraum erfassen zu können, wurden zusätzliche Sensoren in die vier Luftströme am Gerät eingebracht. Diese erfassen die Temperatur und die relative Feuchte der Luft. In Minuten-Intervallen werden die Werte von einer eigens entwickelten Datenlogger-Einheit erfasst und gespeichert. Das System arbeitet dezentral mit je einer eigenen Loggereinheit an jeder Messstelle. Nähert sich der interne Speicher seiner Kapazitätsgrenze, werden die Daten drahtlos an eine Zentraleinheit übermittelt, auf der sie auch über einen Webbrowser eingesehen werden können.

Zur Kontrolle der Volumenstrombalance konnte auf vorhandene *Staukreuze* zurückgegriffen werden. Durch eine Verminderung des Querschnittes von DN 160 auf DN 100 und strömungstechnisch optimierte Ein-/Auslaufstrecken kann hier ein vergleichsweise gutes Signal gemessen werden. Aufgezeichnet wurden die jeweiligen Differenzdrücke über Druckaufnehmer auf einem PC.

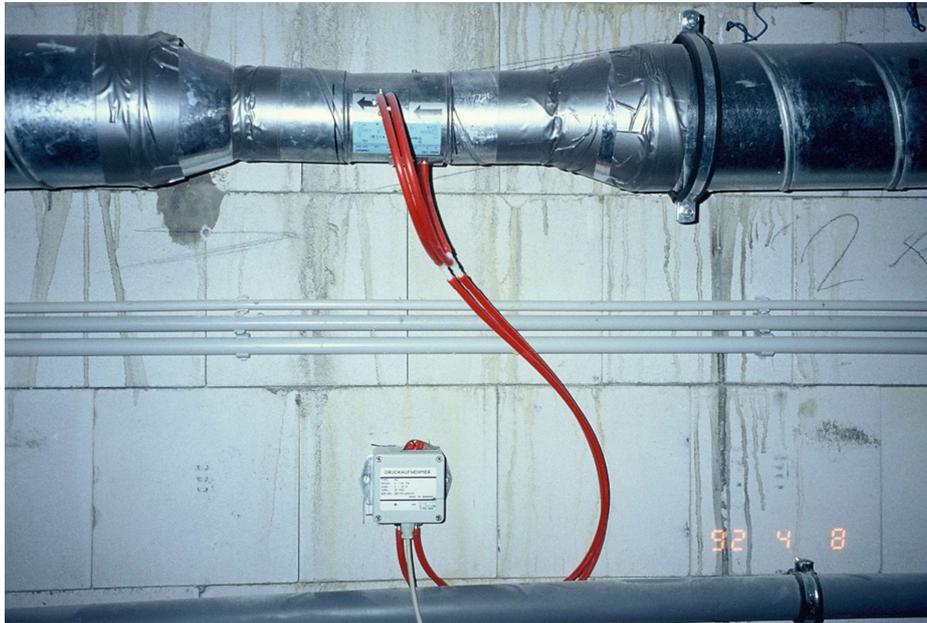


Abbildung 137: Messblende Halton MSD 100 in einer Aufnahme von 1992. Deutlich erkennbar die Querschnittsverminderung zur Vergrößerung der Luftgeschwindigkeit.

Parallel wurde die Druckdifferenz über die Gebäudehülle erfasst. Sie ermöglicht eine unabhängige Kontrolle einer möglichen Disbalance. Dazu konnte über ein bestehendes Probenahmernetz aus Schläuchen der Druck etwa in der druckneutralen Zone des Gebäudevolumens abgegriffen werden. Für den Außendruck wurde eine Ringleitung horizontal um das Gebäude verlegt.

Tabelle 8: Spezifikationen der verwendeten Messtechnik

Sensor Lufttemperatur/-feuchte	Sensirion SHT 75	Nominell $\pm 1.8 \% rF$, ± 0.3 K, Signal digital, ähnlich I ² C, nachkalibriert
Datenlogger	Eigenentwicklung auf Basis Sparkfun ESP8266	Datenübertragung über WLAN
Echtzeituhr	MAXIM DS3231M	± 0.432 Sekunden/Tag, Digital, I ² C
Zentrale Datenerfassung und Server	Eigenentwicklung auf Basis Raspberry Pi 2	Entgegennahme der Loggerdaten und Webserver mittels PHP Script
Volumenstrom Außenluft / Fortluft	Staukreuz Halton MSD 100, Querschnittsverminderung DN 160/100	
Druckerfassung Messblenden / Gebäudedruck	APT, The Energy Conservatory	
CO ₂ -Konzentration Raumluft	Netatmo	nachkalibriert
Elektrische Leistung Lüftungsgerät	EMH CheckMeter 2.3, tragbares Arbeitsnormal	Klasse 0.2 ww

Zur Auswertung hinsichtlich des Wärmebereitstellungsgrades wurde eine Zeitreihe der ersten Februarwoche 2016 herangezogen. Hier lagen ausreichende Temperaturdifferenzen vor, gleichzeitig konnte von kondensatfreiem Betrieb ausgegangen werden. Im Mittel wurde nominell eine Balance von Außenluft und Fortluft von größer gleich 98 % bestimmt, was einem minimalen Fortluft-Überschuss entspricht. Im Rahmen der Messgenauigkeit kann damit von einem balancierten Betrieb ausgegangen werden.

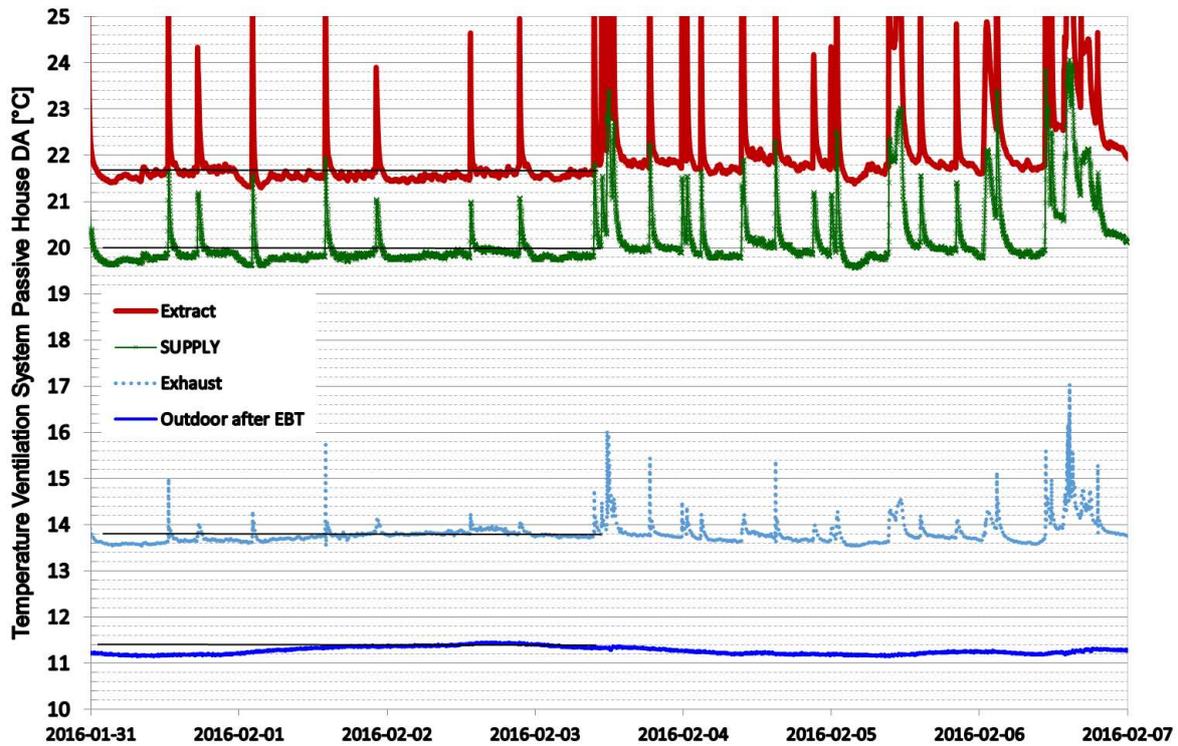


Abbildung 138: Temperaturverlauf in den Luftströmen der Lüftungsanlage für das Endhaus im Februar 2016. Die Temperatur-Spitzen kommen rühren von Küchenabluft bei Kochvorgängen her.

Der trockene effektive Wärmebereitstellungsgrad des Lüftungsgerätes konnte durch diese Messung zu **82 (± 2) %** bei rund 105 m³/h bestimmt werden. Dieser Wert ist gegenüber den Anfangswerten von 1991 im Rahmen der Messgenauigkeit unverändert. In diesen Wert floss die elektrische Leistungsaufnahme der Ventilatoren gemäß [Zertifizierungskriterien Lüftung] ein.

Die elektrische Leistung wurde mit einem Prüfnormtal für Elektrozähler gemessen und betrug ca. 26,5 W. Darin gehen die Nutzleistung der Ventilatoren sowie alle Hilfsenergien der Steuerung ein. Die elektrische Leistungsaufnahme kann mit dem geförderten Luftvolumenstrom (Zuluft) in Beziehung gebracht werden und liefert den zur Einordnung hilfreichen spezifischen Wert von **0,25 Wh/m³**, was auch nach heutigen Maßstäben als sehr gering einzustufen ist. Hier profitiert die Gesamtanlage neben den hochwertigen Ventilatoren von einer Auslegung aller Luftleitungs-Komponenten und Filter auf geringe Strömungsgeschwindigkeiten und, daraus resultierend, geringem Druckverlust.

Im Jahresverlauf werden von der Lüftungsanlage ca. 232 kWh elektrische Energie benötigt (Dauerbetrieb auch im Sommer). Gleichzeitig können in einem typischen Jahr (am Standort beträgt der Heizgradstundenwert 72,4 kWh/a) rund 2.200 kWh Wärmeverluste vermieden werden, was einer **Arbeitszahl von 9,5** entspricht. Der Einsatz von hoch effizienten Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung ist damit sehr attraktiv, ihre Funktion stellt sich als zuverlässig über lange Zeiträume heraus, auch nach 25 Jahren kann keine Abnahme der Leistungsfähigkeit festgestellt werden.

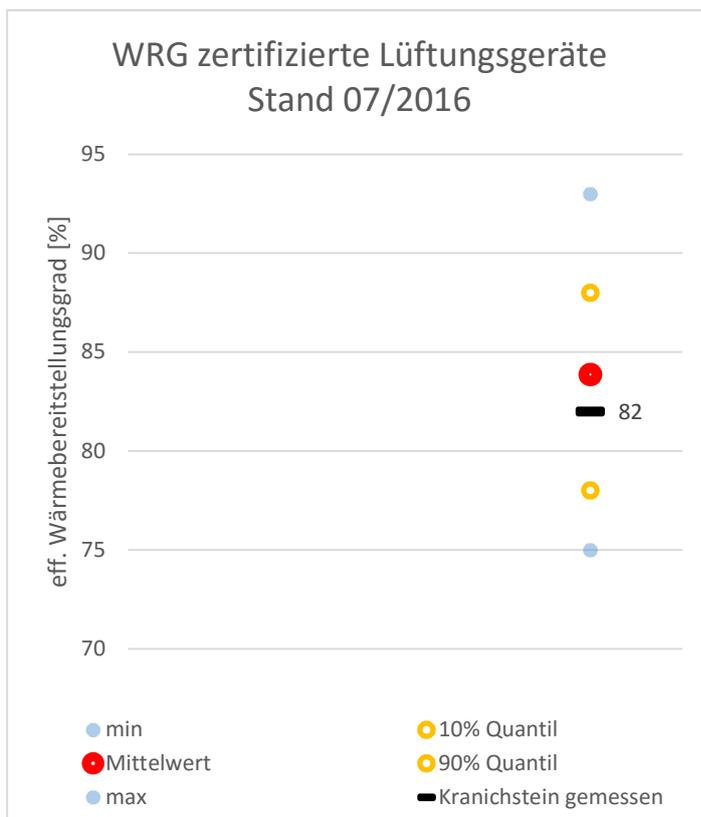


Abbildung 139: Messwerte der Lüftungsanlage Darmstadt-Kranichstein mit 82 (± 2)% im Vergleich zu statistischen Kennwerten von 160 zertifizierten Lüftungsgeräten.

Der Vergleich mit den Zertifizierungsmessungen marktgängiger Geräte (2016) ist im Fall des Wärmebereitstellungsgrades ohne weiteres möglich: Der 25 Jahre alte Prototyp liegt hier im Mittelfeld, wenngleich erfreulicherweise die Mehrzahl der Geräte (108 von 160) inzwischen einen noch höheren Wärmebereitstellungsgrad aufweist.

Ein Vergleich der elektrischen Effizienz ist nicht gleichermaßen leicht zu führen, da in der Zertifizierungsmessung einheitlich eine externe Pressung von 100 Pa zu Grunde gelegt wird. Die im Betrieb der Anlage in Darmstadt-Kranichstein tatsächlich vorhandene Pressung weicht von diesem Standardwert ab. Gemessen wurden im Rahmen der ursprünglichen Begleitforschung [AkkP 4] Außenluft/Zuluftseitig um etwa 60 Pa und Abluft/Fortluftseitig um etwa 55 Pa. Hier zeigt sich, wie günstig diese Anlage, selbst mit Erdwärmeübertrager und hochwertigen Filtern, ausgelegt worden ist.

Gemessen wurde eine elektrische Leistung von 26,5 W bei 105 m³/h, spezifisch entspricht dies rund 0,25 Wh/m³. Hochgerechnet auf den Standard-Bezugsdruck von 100 Pa wären für die Anlage in Darmstadt-Kranichstein ca. 0,44 Wh/m³ zu erwarten. Der Grenzwert der Zertifizierungskriterien von 0,45 Wh/m³ wird damit eingehalten. Berücksichtigt man die nicht optimale aerodynamische Abstimmung der ersatzweise eingebauten EC-Ventilatoren mit dem Gerätegehäuse ist dies ein guter Wert. Heutige Ventilatoren mit rückwärtsgekrümmten Schaufeln und guter Abstimmung mit dem Gehäuse lassen Kennwerte bis unter 0,25 Wh/m³ auch bei 100 Pa externer Pressung zu.

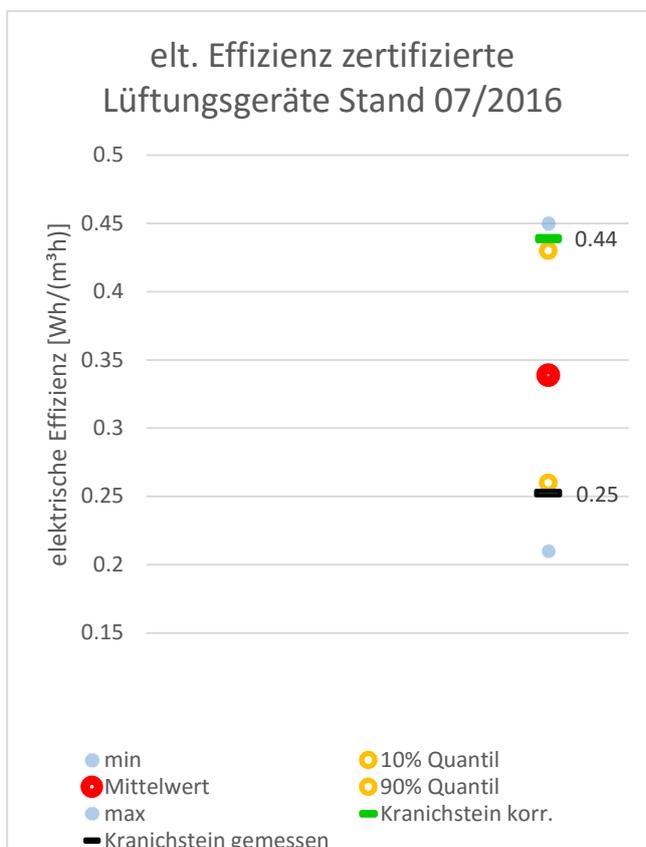


Abbildung 140: Messwerte der Lüftungsanlage Darmstadt-Kranichstein im Vergleich zu statistischen Kennwerten von 160 zertifizierten Lüftungsgeräten. „Kranichstein korr.“ entspricht dem auf 100 Pa Druckverlust umgerechneten spezifischen Stromverbrauch.

6.2.2 Luftfeuchtigkeit und CO₂-Konzentrationen

Ein Blick auf die relativen Luftfeuchtigkeiten des Auswertzeitraumes bestätigt den kondensatfreien Betrieb der Anlage. Die Abluftfeuchte stellt hier eine gute Näherung der Raumlufffeuchte (im Bad) dar und beträgt in dieser Winterperiode um 40 %. Dies steht im Einklang mit früheren Messergebnissen und ist hygienisch einwandfrei.

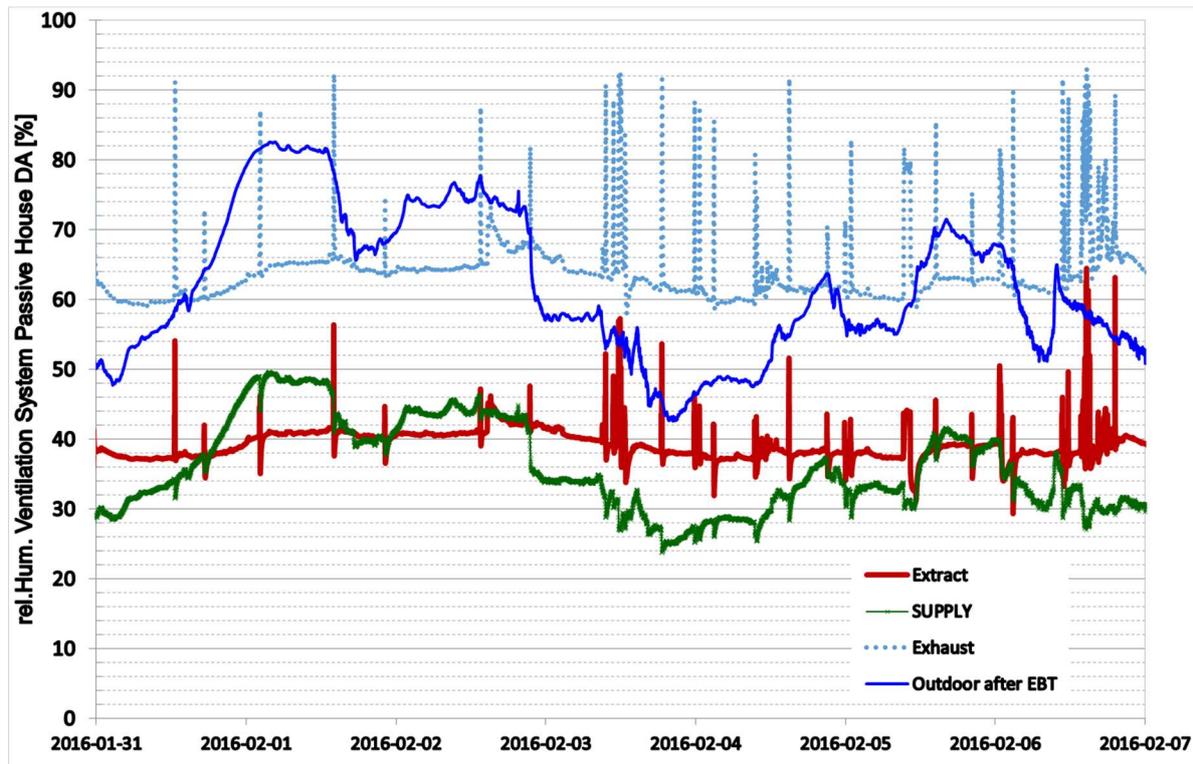


Abbildung 141: Feuchteverlauf in den Luftströmen der Lüftungsanlage für das Endhaus im Februar 2016. Die Feuchte-Spitzen kommen rühren von Küchenabluft bei Kochvorgängen her.

CO₂-Konzentration

Zur weiteren Kontrolle der Wirksamkeit des Lüftungssystems wurden Dauermessungen der CO₂-Konzentration im Innenraum durchgeführt. Die CO₂-Konzentration ist eine relativ leicht messbare Größe der Raumluft, welche als Leitwert für andere Luftbestandteile dienen kann. Damit die Komfortlüftung zu jeder Zeit eine ausreichende Lüfterneuerung garantiert, sind bei dem von drei Personen bewohnten Haus 3 x 30 m³/h, entsprechend 90 m³/h Außenluft erforderlich. Gleichzeitig muss die gleiche Menge an Abluft den Feuchträumen entnommen werden. Abbildung 142 zeigt den mit einem nachkalibrierten Netatmo-Sensor [Wörner, Bomhard 2014] gemessenen Verlauf der CO₂-Konzentration im OG/Nord des Gebäudes Januar/ Februar 2016.

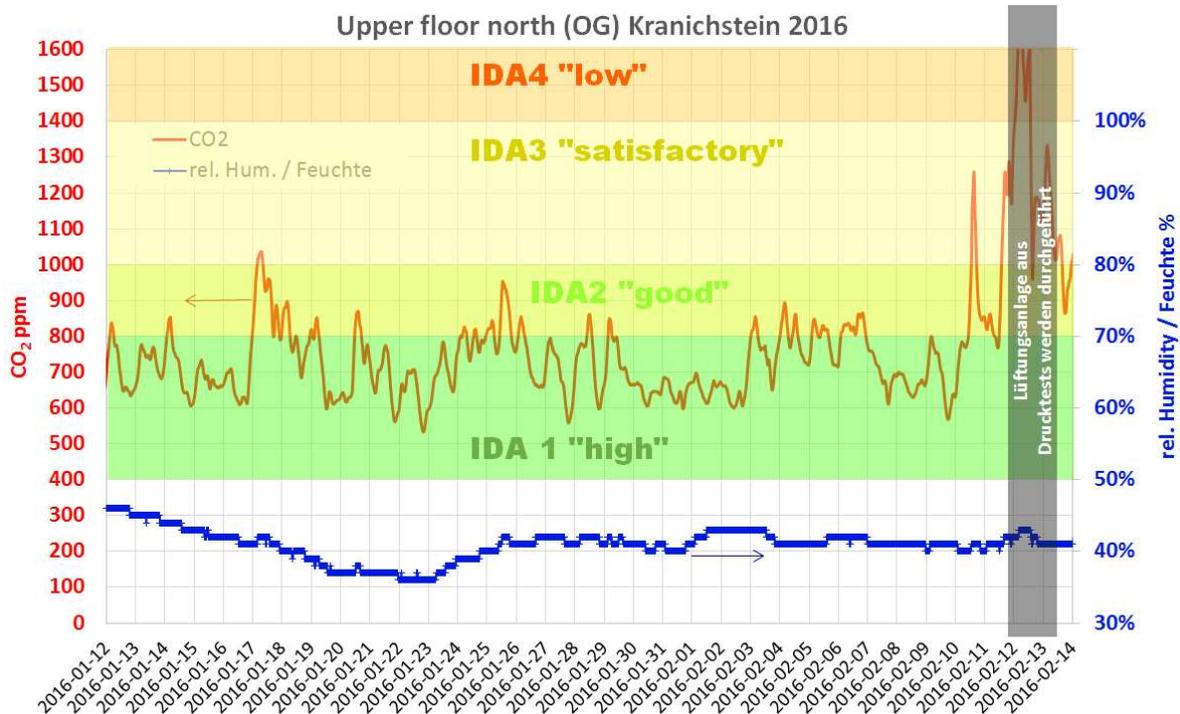


Abbildung 142: Zeitverlauf von CO₂-Konzentration und Raumluftheuchte im Raum OG Nord Passivhaus Kranichstein (Winter 2016). Auffällig: Der Zeitraum ohne Betrieb der Lüftungsanlage 12.2. bis 13.2.2016 zur Durchführung der Drucktests (hier waren alle Kanäle verschlossen; es wurde jedoch zwischendurch immer wieder durch Öffnen der Fenster gelüftet).

Die gemessenen CO₂-Konzentrationen bewegen sich überwiegend im Bereich IDA1 (hohe Innenraumluftheuchte) – für die Mittelung sind allerdings nur die Anwesenheitszeiten zu berücksichtigen; es ergibt sich ein anwesenheitszeitengemittelter CO₂-Wert von 851 (± 100) ppm; die geringe Messgenauigkeit ist auf die prinzipielle Schwierigkeit bei der Kalibrierung der Netatmo-Sensoren zurückzuführen. In der Abbildung auffällig sind bestimmte „Störzeiten“, z.B. vom 11. bis 13.2.2016 (grau hinterlegt); hier wurde in dieser Wohnung eine Nachmessung der Luftdichtheit durchgeführt und dazu (normgerecht) die Lüftungsanlage außer Betrieb genommen und die Kanäle luftdicht verschlossen; es wurde zwar regelmäßig durch Öffnen von Fenster gelüftet, die Messwerte zeigen jedoch sehr klar, dass dies nicht ausgereicht hat um eine zufriedenstellende Luftqualität zu erreichen.

6.2.3 Fazit zur Dauerhaftigkeit der Lüftungsanlage

Auf Basis der Messergebnisse kann auf eine vollständig dem Neuzustand entsprechende technische Leistungsfähigkeit des gesamten Lüftungssystems geschlos-

sen werden. Insbesondere erwiesen sich das Lüftungsgerät (hocheffizienter Gegenstromwärmetauscher) und die Kanäle (hier verzinkte Wickelfalzrohre) als langlebig und wartungsfrei. Bei sachgemäßer Wartung und Auswechseln der hochwertigen Filter kann allenfalls ein Austausch der Ventilatoren erforderlich werden, die mehrheitlich seit 25 Jahren im Dauereinsatz sind. Alle übrigen Komponenten werden noch viele Jahrzehnte ohne Wartung, Reinigung oder Ersatz einsatzfähig sein. Daraus geht hervor, dass bis auf Verschleißteile wie Filter und Ventilatoren keine Bauteile ausgetauscht oder ersetzt werden mussten. Die Langlebigkeit der Kanäle sowie des Lüftungsgerätes einschließlich des Wärmeübertragers konnte zweifelsfrei nachgewiesen werden.

6.3 Innenraum-Luftqualität I: Gasförmige Luftverunreinigungen

Gute Luftqualität ist von zentraler Bedeutung für Gesundheit und Wohlbefinden der Bewohner. Aus diesem Grund wurde das Projekt Darmstadt Kranichstein von Anfang an von einer Gutachtergruppe begleitet, mit deren Unterstützung ein Luftqualitäts-Messkonzept entworfen wurde. Dieses sollte, unter Berücksichtigung der Baustoff- und Geräteauswahl des Lüftungskonzepts und einem begrenzten Mitteleinsatz möglichst umfassende Aussagen machen können. Und zwar Aussagen in Bezug auf die grundsätzlichen Synergien oder Zielkonflikte von energieeffizientem Bauen und Luftqualität. Zusätzlich sollten gegebenenfalls Handlungsempfehlungen dazu abgeleitet werden.

Nicht untersucht wurden dabei solche Stoffklassen, bei denen kein Hinweis oder keine Veranlassung zur Annahme vorlag in Bezug auf ein spezifisches Vorkommen im Passivhaus (wie Konservierungsmittel, PAK, PCB, halogenierte Phthalate, Lösungsmittel wie Nitrophenole, Benzochinone, Pyrethroide) und deren Untersuchung einen vergleichsweise hohen Aufwand verursacht hätte.

Neben den mikrobiologischen wurden vor allem die leichtflüchtigen organischen Substanzen (VOC) und Radon als mögliche Belastungen identifiziert. Die Untersuchungen wurden über mehrere Jahre wiederholt, lagen aber zum Zeitpunkt der Neuuntersuchung mehr als 15 Jahre zurück. Daher wurde im Rahmen dieses aktuellen Projekts („25 Jahre Passivhaus“) auch die Frage nach möglichen Langzeitauswirkungen gestellt.

6.3.1 VOC und Formaldehyd

Die flüchtigen organischen Verbindungen wurden ab 1993 zunächst in regelmäßigen ca. halbjährlichen Abständen gemessen [AkkP 8], dann in längeren Abständen, letztmalig 1999. Die Untersuchungen wurden vom eco-Umweltlabor durchgeführt und bewertet [Grün 1995], [AkkP 8]. Ende Februar 2016 wurde in 2 Häusern eine Nachmessung vorgenommen und vom Labor Dr. Drexler + Dr. Fecher (Groß Umstadt) ausgewertet. Die folgende Abbildung zeigt die Zeitreihen der Summenkonzentrationen der sechs Stoffgruppen (Chlorierte Kohlenwasserstoffe, Aromate, Alkane, Terpene, sonstige und Formaldehyd) im Mittel der jeweils gemessenen Häuser.

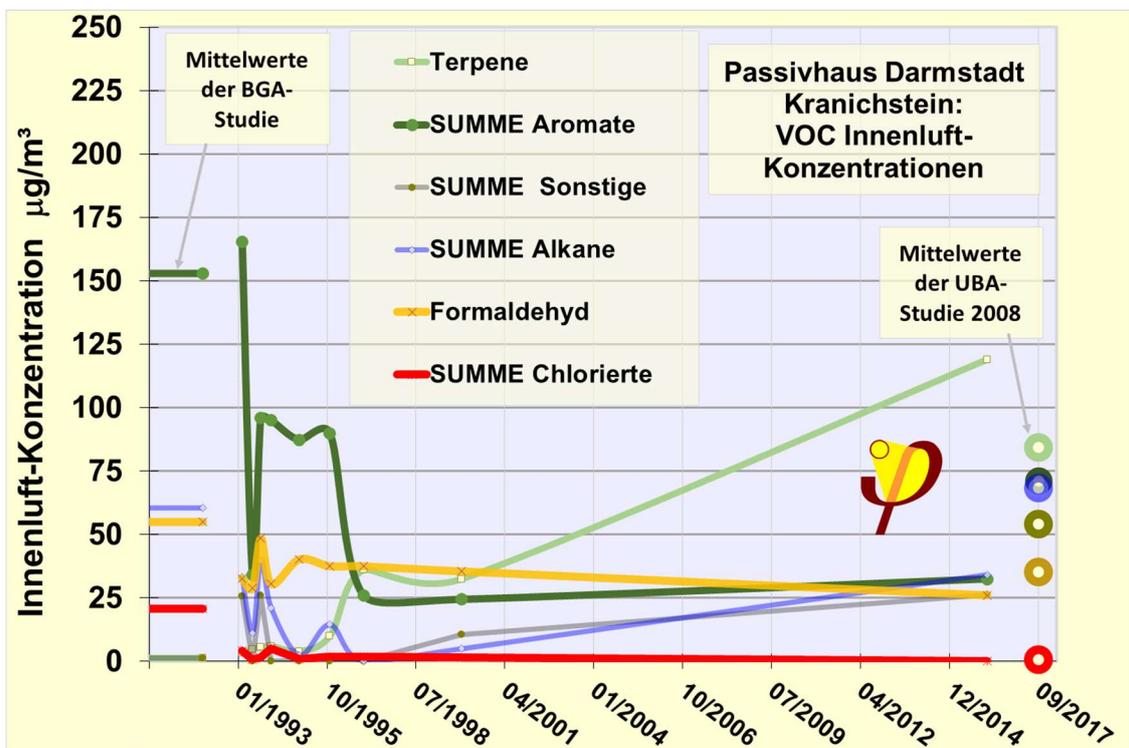


Abbildung 143: Messergebnisse der flüchtigen organischen Verbindungen (VOC) von 1993 bis 2016 als Summenkonzentrationen der angegebenen Stoffgruppen. Im Vergleich dazu Mittelwerte aus [BGA 1986], und rechts aus der Studie des Umweltbundesamts von 2008.

Die Werte waren bis auf wenige Ausnahmen (Aromate in der ersten Messung Anfang 1993) von Anfang an geringer als übliche Vergleichswerte [BGA 1986]. Neben unauffälligen Konzentrationen klassischer Lösemittelkomponenten wie Toluol, Xylol, Ethylbenzol und Alkanen wurden in den jeweiligen Wohneinheiten verschiedene Glykol-Verbindungen festgestellt, die insbesondere auf die Verwendung von wasserlöslichen Dispersionsfarben und Lacken zurückzuführen sind. Die Formaldehydkonzentration der Raumluft lag bei allen Untersuchungen im Passivhaus weit unter den Richtwert

des Bundesgesundheitsamtes und der WHO. In den verschiedenen Wohneinheiten des Passivhauses wurden zum gleichen Untersuchungszeitpunkt geringe, aber unterschiedliche VOC Komponenten gemessen, was auf die unterschiedliche Ausstattung der Wohnungen zurückzuführen ist.

Eine Besonderheit war zunächst das Styrol, welches bei den VOC in die Gruppe der Aromaten gehört. Bei den ersten Messungen zeigten sich deutlich erhöhte (aber unproblematische) Werte zwischen 18 und 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, offenbar aufgrund von Rückständen im verwendeten Dämmstoff der Außenwand. Die späteren Messergebnisse belegen bereits wenige Monate später eine zügige Abnahme der Styrolkonzentration in der Raumluft. Weitere VOC konnten nicht mit dem Bau oder der Lüftungsanlage in Verbindung gebracht werden. Die Messung vom Februar 2016 zeigte keine wesentlichen Veränderungen gegenüber den Messungen, die 15 – 20 Jahre zuvor durchgeführt worden waren, mit Ausnahme der Terpene, deren Konzentration im Zeitverlauf anstieg. Dominant ist bei der Messung vom Februar 2016 das Limonen. Terpene kommen häufig als Ersatzstoffe zum Einsatz; die damit verbundene steigende Raumluftbelastung sollte allerdings im Auge behalten werden.

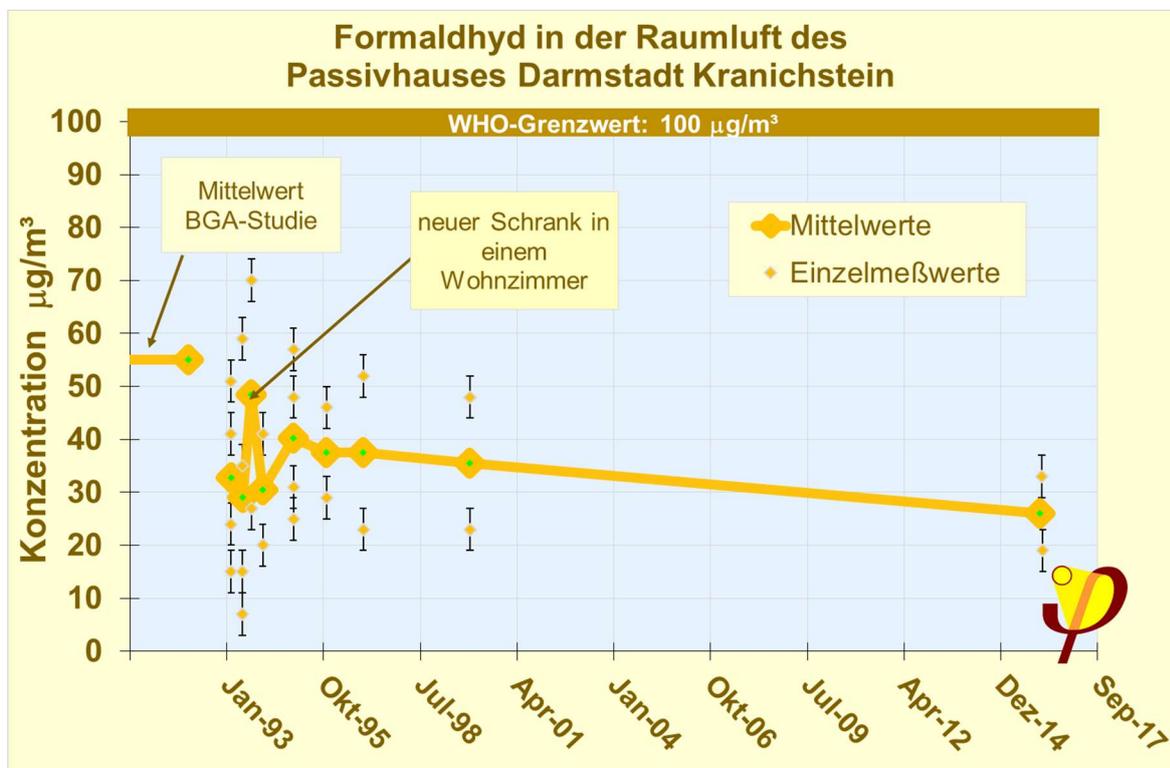


Abbildung 144: Zeitreihe der Formaldehydkonzentrationen als Einzel- und Mittelwerte der jeweils gemessenen Häuser

Alle beobachteten Tendenzen setzten sich bei der erneuten Messung fort. Die einzige Substanz, die auf das Gebäude bzw. die Gebäudedämmung zurückgeführt werden kann, Styrol, ist als Einzelsubstanz in der Gruppe der Aromate nicht mehr nachweisbar.

6.3.2 Radon

Radon wurde über mehrere Jahre mit verschiedenen Untersuchungsmethoden in allen 4 Häusern gemessen [AkkP 8]. Die passiven Messungen ergaben stets unter 50 Bq/m^3 (Nachweisgrenze). Die aktive Messung im Zeitverlauf zeigte in den Wohn- und Schlafräumen Werte um 25 Bq/m^3 und lagen damit erheblich unter den mittleren Werten, die im Regierungsbezirk Darmstadt gemessen und publiziert worden waren (Median 45 Bq/m^3).

Die Aktivmessungen in den Zuluftauslässen der Lüftungsanlage zeigten nur extrem geringe Aktivitäten. Da die Kellerdecke des Hauses (Radon-)dicht ist, kann die Quelle der in den Räumen noch verbliebenen Belastung nur in Baustoffen und Einrichtungsgegenständen liegen. Die geförderten Luftmengen reichen offenbar aus, die Exhalation aus den verwendeten Baustoffen weit unter den Durchschnittswert konventioneller Wohnungen zu senken.

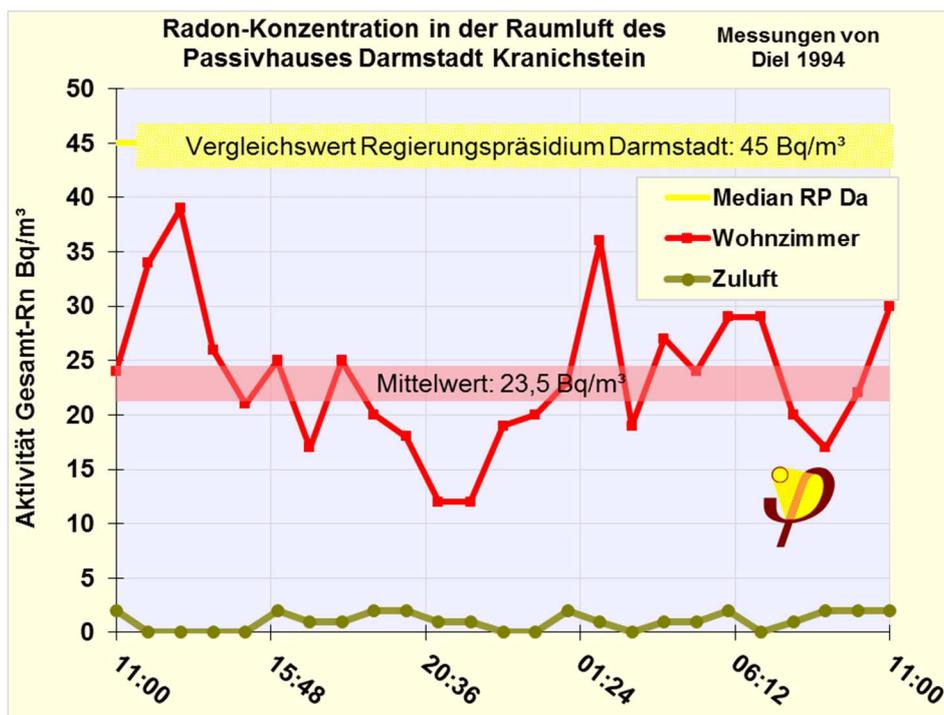


Abbildung 145: Radonmessungen (1994) in der Zuluft und in der Raumluft (vgl. [AkkP 8]). Radon ist in der Zuluft praktisch nicht nachweisbar, und die Raumluftkonzentration bleibt deutlich unter den üblichen Werten am Standort.

In Bezug auf die Radon-Belastung hatte sich das Passivhaus-Projekt vollauf bewährt. Wesentlich sind dafür die Abdichtung gegenüber dem Keller, die Wahl nicht zu hoch Radon-exhalierender, aber doch ganz konventioneller Baustoffe (Mauersteine, Naturgipsputz, Gipskartonplatten, Betondecken und Zementestriche), eine regelmäßige, auf die Nutzung ausgelegte Luftzufuhr durch die Lüftungsanlage, und eine völlig dichte Verlegung des Erdreichwärmetauschers. Da sich hieran nichts geändert hat, konnte auf eine erneute Radon-Messung verzichtet werden. Bei Beachtung der genannten Prinzipien kann der Schluss gezogen werden, dass bei sorgfältiger Baustoffauswahl bei Passivhäusern auch in höher belasteten Regionen keine zusätzliche Radon-Belastung zu erwarten ist.

6.4 Innenraum-Luftqualität II

Untersuchung zur Hygiene von Lüftungsanlage und Raumluft im Passivhaus Darmstadt Kranichstein nach 25 Betriebsjahren

6.4.1 Hygienemessungen und Probenahme

Im ersten Passivhaus wurden über einen längeren Zeitraum in den ersten Jahren nach dem Bezug Hygienemessungen der Raumluft durchgeführt. Dabei ergab sich eine geringe Belastung der Zuluft sowie der Raumluft [AkkP 8]. Die hochwertigen Filter halten einen großen Teil der Außenluftverunreinigungen zurück. Gerade die Langlebigkeit des Lüftungssystems wirft aber auch die Frage auf, ob die Hygiene über diesen langen Zeitraum problemlos aufrecht erhalten werden konnte, zumal in diesem Beispiel bislang keine Reinigung der Kanäle vorgenommen wurde. Gerade die Hygiene und die Frage der notwendigen Reinigungsintervalle stellen in der Öffentlichkeit eine der häufigsten Diskussionsthemen dar. Die folgenden aktuellen Untersuchungen und Ergebnisse können hierzu wertvolle Erkenntnisse liefern. Umfang und Detailgrad der Probenahmen lassen sowohl über die Hygiene des Kanalnetzes als auch über die Raumluftqualität Rückschlüsse zu.

Mit den Probenahmen, die im Zeitraum vom 20. bis 21.2.2016 im westlichen Reihendaus bei windiger und regnerischer Witterung und Außenlufttemperaturen zwischen 5-10°C durchgeführt wurden, sollten sowohl der Hygienezustand des Kanalnetzes als auch die Raumlufthygiene untersucht werden. Dazu wurden die folgenden Untersuchungen durchgeführt:

- Raumluftproben (Gesamtkeimdichte)
- Zuluftproben an den Zuluftauslässen (Lufthygiene)

- Luftproben im Zuluftkanal vor und hinter dem Gerät (Lufthygiene)
- Abklatschproben an Kanalwandungen
- Visuelle Inspektion durch Kamarabefahrung im Kanal
- Oberflächenbeprobungen (Filtermaterial und Staub Schlafrum)

Die Untersuchungen werden im Folgenden kurz beschrieben:

Raumluftproben: Es wurden mittels des Luftkeimsammlers MBASS30 (Hohlbach) Luftproben genommen. Die Probenahme erfolgte in den Innenräumen sowie zu Vergleichszwecken in der Außenluft auf der Nordseite des Gebäudes (Ansaugseite). Mit diesen Probenahmen konnte die jeweilige Gesamtkeimdichte in der Luft (Sammelvolumen je 100 l bei einem Durchfluss von 30 l/min) bestimmt werden. Die genaue Dokumentation der Bebrütung und Auswertung der Malzextraktagar- und DG18-Agarplatten findet sich im Laborbericht Nr. A-2015/6127 [Kirchmair 2016]. Als Ergebnis wurden die jeweiligen koloniebildenden Einheiten (KBE/m³ Luft) ausgewiesen.



Abbildung 146: Luftkeimsammler (Impactsammler MBASS30, Fa. Hohlbach) beim Einsatz im Untersuchungsgebäude.

Zuluftproben: Um auch die Lufthygiene der Luft an den Zuluftauslässen untersuchen zu können, wurden mittels Filtrationssammler (Sartorius MD8) jeweils 200 l Luft auf Gelatinefilter gesammelt und im mikrobiologischen Labor ausgewertet.



Abbildung 147: Filtrationssamplers Typ MD 8 (Fa. Sartorius)

Luftproben Zuluftkanal: Darüber hinaus wurde auch der Zuluftkanal an verschiedenen Stellen vor und nach dem Gerät untersucht. Hierfür wurde nach der Methode der isokinetischen Probenahme vorgegangen, bei der die Absauggeschwindigkeit in den eingeführten Glasröhrchen genau der Luftgeschwindigkeit im Kanal entspricht. Die Proben wurden anschließend ebenfalls auf Malzextrakt und DG18 Nährböden angesetzt.



Abbildung 148: Filterhalter und Filter zur isokinetischen Probenahme (rechts: Vorbereitung zur Sterilisierung)

Abklatschproben Kanalwandung: Die Kanalwandung wurde mit Hilfe von Abklatschproben (Abklatschplatten Merck ENVIROCHECK CONTACT TVC) untersucht. Diese Art der Beprobung eignete sich besonders gut, weil die Probenahme­stäbchen (Abbildung 149) relativ schmal ausgeführt sind und sich dadurch problemlos an die Innenoberfläche der Rundkanäle anlegen lassen.

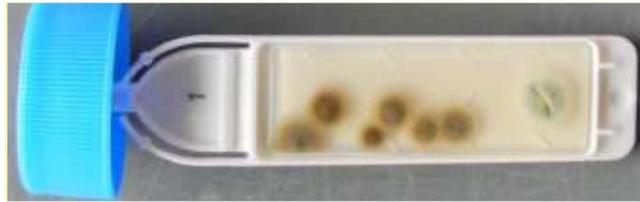


Abbildung 149: Abklatschproben mit Abklatschplatten (Fa. Merck ENVIROCHECK CONTACT TVC) nach der Bebrütung.

Filter- und Staubproben: Zusätzlich zu den Luft- und Oberflächenbeprobungen wurden Materialproben von Filtermaterial und Staubproben im Schlafräum entnommen, in steriler Kochsalzlösung suspendiert und auf Malzextraktagar bzw. DG18 Agar aufgespalten. Nach der Bebrütung wurden die koloniebildenden Einheiten (KBE) gezählt.

Die mikrobiologische Beprobung der Anlage wurde ergänzt durch visuelle Inspektion, Fotodokumentationen und eine Kamerabefahrung des Kanalnetzes (wie in Abschnitt 6.4.2 erläutert) vorgenommen.

6.4.2 Sichtprüfung und Kamerabefahrung im Zuluftkanalnetz

Neben der nachfolgend beschriebenen mikrobiologischen Hygieneuntersuchung der Anlage wurde das Kanalnetz zunächst durch Sichtprüfung auf etwaige Verunreinigungen überprüft. Dazu wurde das Kanalnetz an den Zuluftelementen sowie am Außenluftfilterkasten und dem Lüftungszentralgerät geöffnet und inspiziert. Im Zuluftkanalnetz konnten praktisch keine Verunreinigungen festgestellt werden, das verzinkte Wickelfalzrohr und die Wandungen der Filterkästen und Einbauten waren bis auf winzige trockene Staubablagerungen in Bereichen geringer Strömungsgeschwindigkeit vollständig blank.

Neben der reinen Sichtprüfung, welche sich auf die Kanalwandungen unmittelbar an den Auslässen und dem Filterkasten bzw. dem Gerät beschränkte, wurde eine Kamerafahrt mit einer sog. „Snake-Cam“, also einer Spezialkamera mit einem beleuchteten Kamerakopf an einem Kabel, welches durch das Rohr geführt werden kann, durchgeführt. Damit ist es möglich zumindest bis zur nächsten Abzweigung bzw. dem nächsten Hindernis im Kanal eine Inspektion vorzunehmen.

Die Kamerabefahrung bestätigte das Ergebnis der Sichtprüfung und brachte keine Hinweise auf signifikante Verunreinigungen, Korrosionsstellen oder Staubablagerungen im Zuluftkanalnetz.



Abbildung 150: Eine Spezialkamera zur Inspektion von Lüftungskanälen (Snake-Cam) wird in ein Zuluftrohr eingeführt.



Abbildung 151: Fotodokumentation der Sichtprüfung am Filterkasten

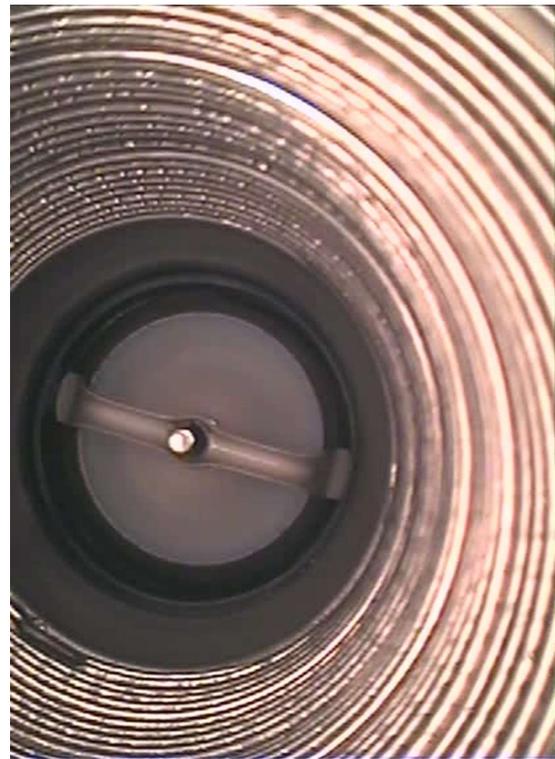


Abbildung 152: Screenshot von der Kamerabefahrung mit der Snake-Cam. Alle Oberflächen sind in gutem, sauberem Zustand.

Diese ausgezeichnete Sauberkeit im Zuluftkanalnetz ist auf die hohe Filterqualität des Außenluftfilters und den regelmäßigen Filterwechsel zurückzuführen. Damit kann das Kanalnetz offensichtlich über mehrere Jahrzehnte ohne Reinigung sauber gehalten werden. Voraussetzung hierfür ist sowohl die Reinhaltung der Kanalabschnitte

während der Bauphase (Abdecken der offenen Kanalenden der jeweiligen Abschnitte bis zur Inbetriebnahme) sowie ein dichter Filtersitz (Korrekte Abdichtung des Filters zum Filtergehäuse, damit Luftnebenwege am Filter vorbei vermieden werden). Sollte die Reinhaltung der Kanalabschnitte in der Bauphase nicht garantiert werden können, ist das Kanalnetz vor der Inbetriebnahme bereits zu reinigen, was hohe und eigentlich unnötige Kosten verursachen würde. Generell gilt, dass Filterwechsel kostengünstiger als Reinigung ist.

Die Abluftauslässe in den Bädern waren im untersuchten Gebäude nicht mit Vorlegefiltern geschützt, entsprechend haben sich Staubablagerungen an den Rohrwandungen gebildet, im Bereich der Küchenabluft wird dieser Staub durch kondensierende Fettdämpfe im ersten Meter Kanalabschnitt nach dem Abluftdurchlass gebunden. Im ersten Passivhaus in Darmstadt Kranichstein wurde dieser Kanalabschnitt aus kostengünstigem Aluflexrohr ausgeführt, der leicht ausgewechselt werden kann. Mit Hilfe von marktüblichen Fettkondensationsfilter aus Edelstahl können diese Fettdämpfe aus der Küchenabluft auskondensiert werden. Die Edelstahlfilter können in der Spülmaschine in regelmäßigen Zeitabständen vom Fett befreit und erneut eingesetzt werden.

Generell ergab die Untersuchung des Abluftkanalnetzes zwar deutlich sichtbare Staubablagerungen, aber selbst nach 25 Jahren Dauerbetrieb ohne Reinigung lag noch keine funktionelle Beeinträchtigung vor. Hygienisch sind die Staubablagerungen in der Abluft ohnehin nicht problematisch, weil sie mit der Fortluft nach außen geführt werden.

Nach der Inspektion wurden die Abluftauslässe auch in den Bädern mit einfach über die Tellerventile installierbaren Vorlegefiltern nachgerüstet, um den Staubeintrag auf der Abluftseite künftig noch geringer zu halten (siehe weiter oben Abbildung 130). Auch hier werden Edelstahlstreckmetallfilter verwendet, die sich einfach regelmäßig in der Spülmaschine mitreinigen lassen. Der empfohlene Zyklus hierfür beträgt etwa ein halbes Jahr.

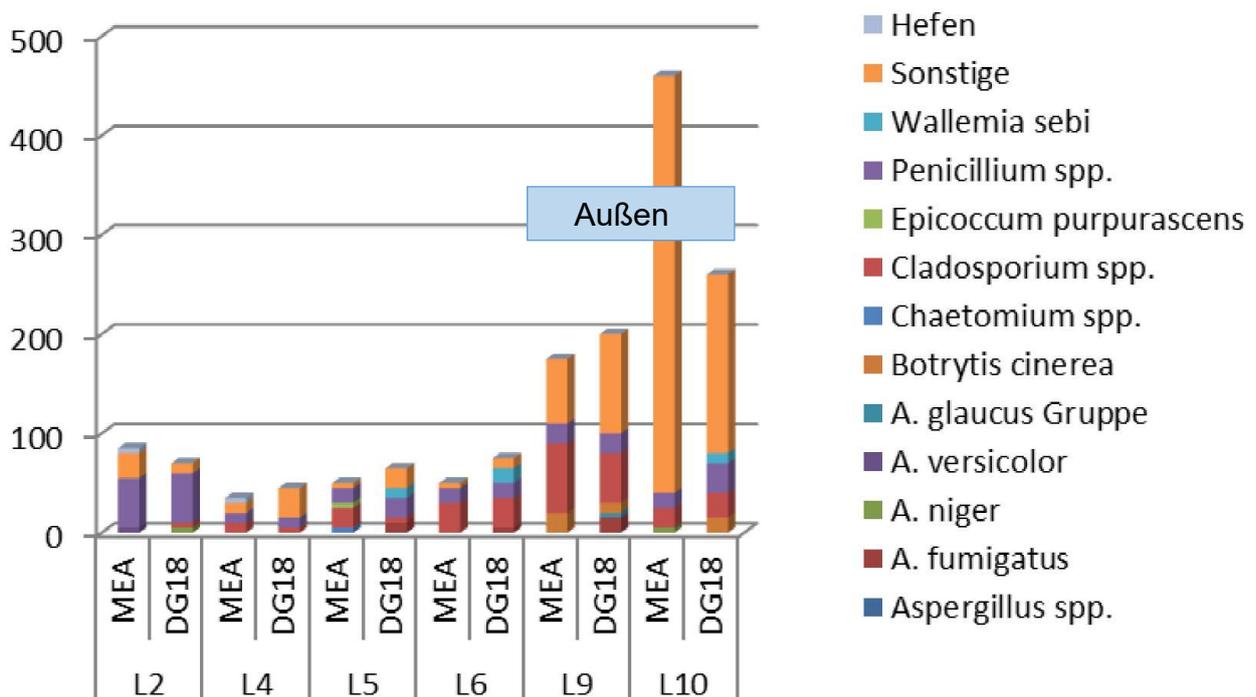
6.4.3 Raumlufthproben

Die Auswertung der Raumlufthproben nach Pilzarten und Hefen sowie Bakterien wurden für insgesamt 6 Luftproben durchgeführt. Ort und Bezeichnungen der Probenahmestellen sind in Tabelle 9 aufgelistet.

Tabelle 9: Bezeichnungen der Probenahmestellen der Luftproben

Probe Nr.	Probenahmestelle der Luftprobe
L2	EG Wohnzimmer Süd
L4	OG 1 Kinderzimmer West
L5	DG2 Gästezimmer Ost
L6	DG2 Arbeitszimmer West
L9	Außenluft vor der Innenraummessung
L10	Außenluft nach der Innenraummessung

Im Folgenden sind die Ergebnisse der Untersuchungen aus [Kirchmair 2016] dargestellt:


Abbildung 153: Ergebnisse zu den koloniebildenden Einheiten (KBE/m³ Luft) Hefen und Pilzen

Bewertung Raumlufthproben Hefen und Pilze: „Die Keimdichten an Schimmelpilzen waren in allen Innenraumproben als gering einzustufen und deutlich niedriger als in den Außenluftproben (L9, L10). Das Keimspektrum war vergleichbar.“ [Kirchmair 2016].

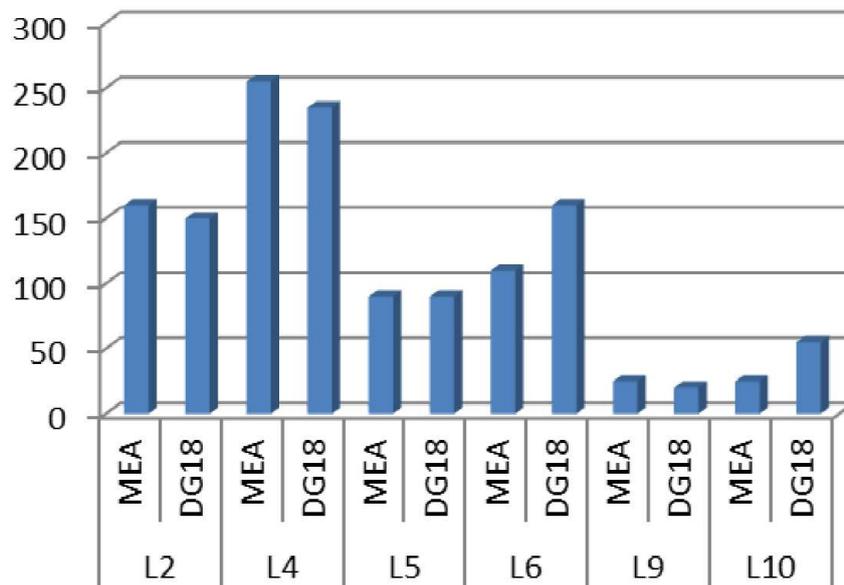


Abbildung 154: Ergebnisse zu den koloniebildenden Einheiten (KBE/m³ Luft) Bakterien gesamt

Bewertung Raumlufthproben Bateriaen: „Die Dichte an Bakterien war in den Innenraumproben etwas höher als in den Außenluftproben. Zum Zeitpunkt der Probenahme war es regnerisch. Dadurch war in den Außenluftproben eine deutlich niedrigere Keimdichte zu erwarten. Es gibt keinen Hinweis auf eine erhöhte Keimbelastung in den Innenräumen.“ [Kirchmair 2016]

6.4.4 Luftproben an den Zuluftauslässen und isokinetische Probenahme im Zuluftkanal

Es wurden an den Auslässen im EG (Esszimmer Nord), den Kinderzimmern (OG1 Ost und West, den Arbeitszimmern (OG2 Ost und West) sowie OG2 Nord-Ost Luftproben entnommen. Die Ergebnisse der isokinetischen Probenahme sind in Tabelle 10 dargestellt.

Tabelle 10: Ergebnisse der isokinetischen Probenahme.

Ort der Probenahme	Nährmedium Malzextraktagar	Nährmedium DG18
Außenluftkanal nach Filter	1 KBE <i>Aspergillus sp</i>	jeweils 1 KBE <i>Penicillium sp</i> und <i>Cladosphialophora sp</i>
Außenluftkanal nach dem Erdwärmeübertrager	3 KBE <i>Aspergillus sp.</i> sowie 2 KB sterile Myzelien	
Zuluft nach Karbonfilter	2 KBE <i>Aspergillus sp.</i> , 2 KBE <i>Aspergillus niger</i> sowie 2 KB sterile Myzelien	

Bewertung Zuluft: „Die bakterielle Keimdichte war als gering einzustufen“ [Kirchmair 2016].

6.4.5 Abklatschproben an der Zuluftkanalwandung

Die Probenahmestellen der Abklatschproben sowie deren Bezeichnung sind in Tabelle 11 mit den ausgewerteten Kontaktflächen aufgelistet. Die Proben haben jeweils zwei Kontaktflächen zur Probenahme. Nur auf einer Probe („G“) war auf der einen Seite kein Nährboden vorhanden. Tabelle 4 zeigt die Ergebnisse der Abklatschproben (KBE/Platte).

Tabelle 11: Bezeichnungen der Probenahmestellen der Abklatschproben sowie die ausgewerteten Kontaktflächen

Proben- bezeichnung	Raum	Kontaktflächen
H	Zuluftfilterkasten (Karbonfilter)	Jeweils Seite 1 und 2
I	Vor Grobfilter (vor WRG) im Außenluftkasten	Jeweils Seite 1 und 2
E	Zuluftrohr OG1 Kinderzimmer Ost	Jeweils Seite 1 und 2
G	Zuluftrohr OG2 Nord	Nur Seite 2

Tabelle 12: Ergebnisse der Abklatschproben (KBE/Platte), zur Erleichterung der Auszählung ist die Seite mit der Bezeichnung „dunkel“ mit Farbstoff TTC versehen.

	G2		E		Kran H		Kran I	
	hell	dunkel	hell	dunkel	hell	dunkel	hell	dunkel
<i>Aspergillus spp.</i>	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>A. versicolor</i>	0	0	0	0	0	1	0	0
<i>Cladosporium spp</i>	1	2	0	11	2	1	8	29
<i>Penicillium spp.</i>	0	0	0	0	0	1	0	1

Bewertung Abklatschproben: „Die Platten wiesen nur geringes Schimmelwachstum auf. Es gibt keinen Hinweis auf Schimmelbefall.“ [Kirchmair 2016]

6.4.6 Materialproben

Nachfolgende Tabelle zeigt die Auswertung der Materialproben, welche nach der Verdünnung durch Kochsalzlösung auf die Nährmedien aufgebracht wurden.

Tabelle 13: Ergebnisse der Materialprobenauswertung in [KBE/g]

	Karbonfilter		Staubprobe OG1 Kinderzimmer Ost.	
	MEA	DG18	MEA	DG18
<i>Aspergillus spp</i>	<50	<50	$<5,0 \times 10^3$	$<5,0 \times 10^3$
<i>A. versicolor</i>	<50	<50	$5,0 \times 10^3$	$<5,0 \times 10^3$
<i>A. glaucus-Gruppe</i>	<50	<50	$<5,0 \times 10^3$	$3,0 \times 10^4$
<i>Cladosporium spp.</i>	<50	<50	$5,0 \times 10^3$	$2,5 \times 10^4$
<i>Penicillium spp.</i>	<50	50	$4,0 \times 10^4$	$1,5 \times 10^4$
<i>Ulocladium spp.</i>	<50	<50	$<5,0 \times 10^3$	$5,0 \times 10^3$
Hefen			$8,0 \times 10^4$	$1,0 \times 10^5$
Pilze gesamt	<50	<50	$1,3 \times 10^5$	$1,7 \times 10^5$
Bakterien	<50	<50	$1,5 \times 10^4$	$1,1 \times 10^4$

Bewertung Materialproben: „Der Karbonfilter war unbelastet. Die Staubprobe wies eine übliche Keimdichte und Keimzusammensetzung auf. Es gibt keinen Hinweis auf eine erhöhte Schimmelbelastung.“ [Kirchmair 2016]

6.4.7 Fazit aus den Hygieneuntersuchungen

Zusammenfassung

Die Ergebnisse der Hygieneuntersuchung am Lüftungssystem sowie der Raumluft im Gebäude Passivhaus Darmstadt Kranichstein nach einer Betriebszeit von 25 Jahren zeigen keinerlei Hinweise auf erhöhte Keimdichte oder Schimmelbelastung. Obwohl die Anlage im gesamten Betriebszeitraum nie gereinigt wurde, weist sowohl der optische Befund (Augenschein und Kamerabefahrung) im Zuluftkanalnetz als auch der mikrobiologische Laborbefund einen einwandfreien Hygienezustand auf. Dies ist auf die hohe Wirksamkeit des frontständigen Feinfilters, der regelmäßig gewechselt wurde, zurückzuführen. Der Filterwechselzyklus beträgt hier ein Jahr.

Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Der Einsatz von F8-Filtern kann auch für künftige Anlagenplanungen uneingeschränkt empfohlen werden, ein jährlicher Filterwechsel ist ratsam. Dabei muss eine ausreichende Größe der Filterfläche realisiert werden um geringe Druckverluste sicherstellen zu können. Generell gilt: Filterwechsel ist günstiger als die Reinigung der Kanäle. Darüber hinaus sollte der korrekte Filtersitz (Dichtheit im Filterkasten) überprüft werden um Luftnebenwege zu vermeiden.

Aus heutiger Sicht ist der Einsatz von Weitwurfdüsen und damit insgesamt noch kürzeren Zuluftkanallängen zu empfehlen. Das ist neben dem niedrigeren Druckverlust auch von Vorteil, falls doch einmal eine Kanalreinigung erforderlich sein sollte. Ebenso ist die Demontierbarkeit des Wärmeübertragers zu Reinigungszwecken sinnvoll, was bei heutigen Geräten bereits Standard ist.

7 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

7.1 Hauptergebnisse

Das erste Passivhaus wurde 1991 im Darmstädter Stadtteil Kranichstein bezogen. Die Pioniere hatten sich weit vorgewagt: Ein Haus mit normaler Wohnnutzung, hohem thermischem Komfort sowie dauerhaft sehr guter Luftqualität bei gleichzeitig aber minimalem Energieverbrauch. Nun kann auf 25 Nutzungsjahre der Reihenhauszeile mit vier Wohneinheiten zurückgeblickt werden. Im Jahr 2016 war die Zeit gekommen, die Komponenten und die Gesamtfunktion ein weiteres Mal genau zu prüfen.

Das ursprüngliche, wegbereitende Forschungsprojekt zu dem Gebäude umfasste von 1988 bis 1995 die bauvorbereitende Forschung und Entwicklung, den Bau und ein umfangreiches Messprogramm im regulären Betrieb, das vom hessischen Umwelt- bzw. Wirtschaftsministerium und der Wüstenrot-Stiftung finanziert wurde. Dieses umfasste keinesfalls nur die Verbrauchswerte, sondern auch Temperaturverläufe im Außen- und Innenraum sowie in Bauteilen, Feuchtigkeitsentwicklung, Effizienz der Lüftungsanlagen, Energieversorgung (Erdgas und Strom), Vergleich mit den Ergebnissen der dynamischen Simulation, Luftdichtheitsmessungen, Luftqualitätsmessungen in Innenräumen und Lüftungsanlage sowie eine sozialwissenschaftliche Untersuchung, jeweils über einen Zeitraum von mehreren Jahren.

Ziel der hier vorliegenden Studie war es nun, die Funktionsfähigkeit und Performance des Gebäudes und der einzelnen Komponenten nach einem langen Zeitraum zu überprüfen. Im Zentrum standen Eigenschaften, bei denen die Langlebigkeit nicht selbstverständlich ist, oder bei denen in der wissenschaftlichen und öffentlichen Diskussion Fragen aufgekommen waren.

Die wichtigsten Ergebnisse der intensiven Untersuchungen sind:

Energieverbrauch

Die Verbrauchswerte sind dauerhaft, über die gesamte Nutzungszeit, gering.

Der Heizwärmebedarf ist der wesentliche Indikator für die thermische Qualität des Gesamtgebäudes und war das wichtigste Zielkriterium für das Projekt. Der Heizenergieverbrauch ist, von geringen klimabedingten Schwankungen abgesehen, über 25 Jahre unverändert gering. Der gemessene Gasverbrauch zur Beheizung beträgt im Durchschnitt



nur 8,4 kWh/(m²a) und damit etwa ein Sechzehntel des Durchschnittswerts für Wohngebäude in Deutschland. Dieser Energieverbrauch liegt sogar geringfügig unter dem prognostizierten Wert aus den dem Bau vorausgehenden Simulationen. Das Projekt bestätigt damit auch die Validität der anerkannten bauphysikalischen Berechnungsmethoden und die dauerhaft zuverlässige praktische Verwertbarkeit dieser Methoden.

Nach der Entwicklung des Energiebilanz-Tools PHPP lassen sich die Berechnungen in der Planungsphase heute zuverlässig auch mit einfacheren Werkzeugen durchführen, so dass jedes Planungsteam in die Lage versetzt ist, bauphysikalisch einwandfreie und hocheffiziente Gebäude zu planen und deren Verhalten vorherzubestimmen.

Konstruktion Dach

Der Dachaufbau ist begrünt und unbelüftet, daher war es interessant, den langfristigen Feuchtigkeitsverlauf zu kontrollieren.

- Die gemessenen Werte sind auch nach 25 Jahren unbedenklich. Hochwärmedämmte Dächer können daher in der im Pilotprojekt ausgeführten Form dauerhaft verwendet werden. Gleichwohl ist zu empfehlen, statt der im Pilotprojekt verwendeten konventionellen Dampfbremse besser feuchteadaptive Dampfbremsen zu verwenden. Mit diesen lassen sich noch niedrigere Feuchtigkeiten auch im Langzeitverhalten erreichen. Mitentscheidend für die langfristige Funktion einer unbelüfteten Dachkonstruktion ist eine dauerhaft sichergestellte Luftdichtheit. Die Nachuntersuchung hat gezeigt, dass sich diese auf dem hier

gewählten Weg zuverlässig realisieren lässt (durchgehende Luftdichtheitsbahnen, Einputzen der Bahnen in den Innenputz der angrenzenden Massivbauteile).

Außenwandkonstruktion

Eine sehr gute Wärmedämmung der opaken Flächen ist einer der zentralen Bestandteile beim energieeffizienten Bauen. Eine an der Westwand (Wetterseite) entnommene Probe des Wärmedämmverbundsystems wurde vom Arbeitsbereich Materialwissenschaften an der Universität Innsbruck untersucht. **Ergebnisse:**

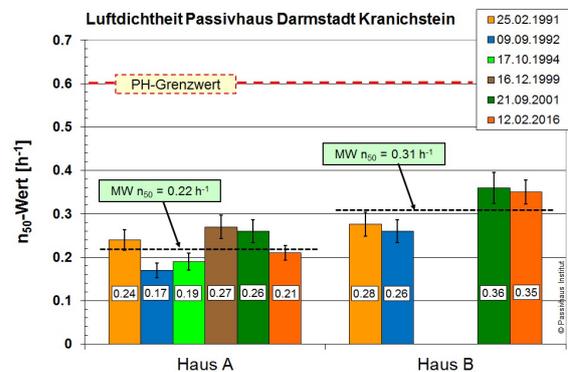
- Das Dämmmaterial EPS, das bereits äußerlich wie neu aussieht, wurde in Bezug auf die relevanten Materialeigenschaften untersucht – diese sind unverändert. Insbesondere blieb die Rohdichte konstant, es konnte keine Schrumpfung des Materials festgestellt werden. Diesbezügliche Vermutungen, die gelegentlich geäußert werden, erweisen sich als nicht haltbar. Auch die Wärmeleitfähigkeit entspricht nach 25 Jahren Nutzung dem Wert in Neuzustand.
- 
- Der Außenputz im Pilotprojekt hat die Konsistenz einer Gehwegplatte, die Festigkeitsprüfung der Fassade (Haftzugprüfung) entspricht der Kategorie „orkanfest“.
 - Für das System wird eine weitere Nutzung über mindestens noch einmal 25 Jahre prognostiziert.
 - Angesichts der Vorteile einer langen Haltbarkeit sollte am Putz nicht gespart werden. Ein mineralischer Dickputz weist entscheidende Vorteile bzgl. der Dauerhaftigkeit aus. Putzfassaden dieser Qualität sind immer noch eine ökonomisch sehr günstige Lösung im Verhältnis zu anderen Fassadenaufbauten.

Gebäudedichtheit

Es wurden nochmals Drucktests in zwei der vier Häuser durchgeführt, alle Messergebnisse liegen nach wie vor weit unter der Passivhaus-Anforderung. Während des Tests wurden in beiden Häusern die Fenster nachgestellt und die Lippendichtungen (erstmalig nach 25 Jahren) ausgewechselt. Das Ergebnis verbesserte sich in beiden Häusern nochmals signifikant und entsprach der ursprünglichen Dichtheit, wie sie kurz vor dem Einzug gemessen worden war. Damit ist gezeigt:

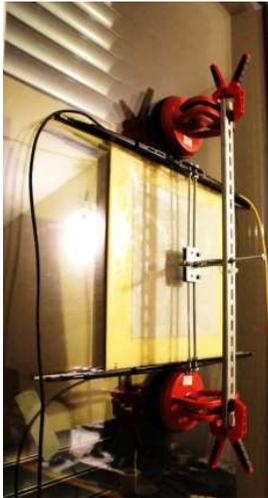


- Luftdichtheit ist planbar, die Passivhausanforderungen lassen sich mit vertretbarem Aufwand erfüllen und sogar deutlich unterschreiten.
- Der Innenputz erfüllt seine Funktion als luftdichte Ebene.
- Dies gilt auch für die Folien im Dachbereich.
- Die Anschlüsse, die durch Einputzen der Folie hergestellt wurden, erweisen sich ebenfalls als dauerhaft dicht. Das ist äußerlich nicht selbstverständlich erkennbar, weil die Tapete an einigen Stellen durch Setzungen gerissen ist. Genau dies war jedoch erwartet worden – und daher war die Methode des Einputzens der Dichtungsbahnen gewählt worden.
- Details wie der luftdichte Einbau der Steckdosen mit Putzüberschuss erweisen sich ebenfalls als dauerhaft.
- Die Fenster sind mit normalem Wartungsaufwand ebenfalls unverändert dicht.

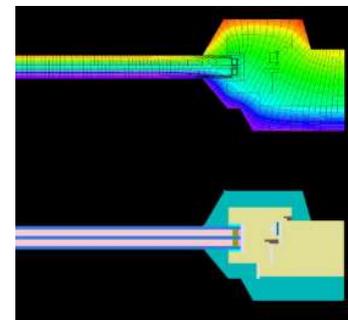
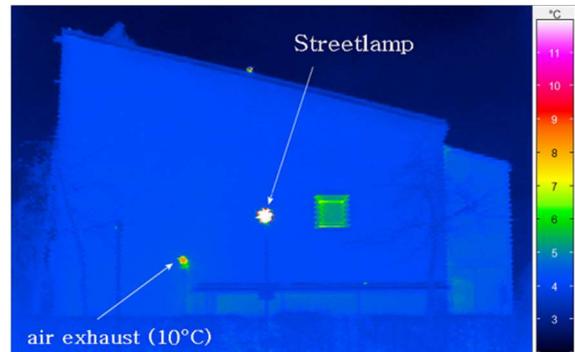


Thermografie

Die thermografischen Aufnahmen zeigen an den opaken Gebäudeflächen keine Veränderungen gegenüber dem ursprünglichen Zustand, der in früheren Thermografien dokumentiert wurde. Das ist mit den anderen



Ergebnissen bez. Verbrauch und Materialeigenschaften konsistent. Interessant waren die Fenster, insbesondere weil hier ein Verlust des Füllgases Krypton nicht ausgeschlossen werden konnte bzw. zu erwarten war – die Frage war, in welchem Umfang? **Ergebnis:**

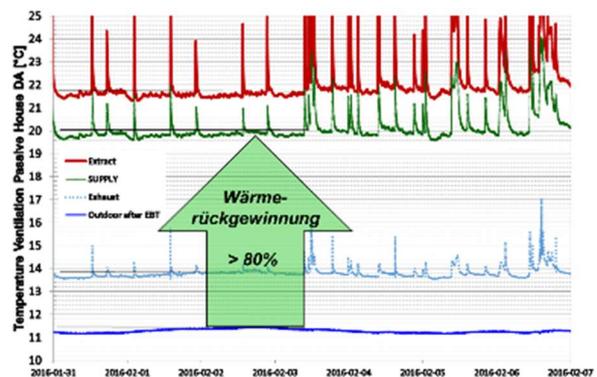


- Der Gasverlust ist unterschiedlich, aber sehr gering, was zusätzlich mit einer separaten U-Wert-Messung kontrolliert wurde.
- Der U-Wert der Scheiben stieg (außer bei einem Fenster mit etwas höherem Gasverlust) unkritisch von ca. 0,76 auf 0,78 W/(m²K) in 25 Jahren. Obwohl Dreischeibenverglasungen trotz erwiesener Wirtschaftlichkeit in Deutschland noch immer nicht verbindlich vorgeschrieben sind, hat sich deren Verwendung am Markt inzwischen durchgesetzt.
- Die Rahmendämmungen aus Polyurethan zeigen unveränderte thermische Eigenschaften; sie wurden nach dem Einbau weiß gestrichen und so vor Außeneinwirkungen, insbesondere durch UV-Strahlung, geschützt.
- Die mit der Thermografie gemessenen Oberflächen an der Gebäudeaußenhülle stimmen sehr gut mit der thermischen Simulation überein.

Lüftungsanlage

Die Anlage arbeitet auch nach 25 Jahren hygienisch einwandfrei.

- Saubere Lüftungsrohre wurden mit mehreren unabhängigen Messmethoden auf der Außenluft-/Zuluftseite bestätigt, auch noch nach 25 Jahren. Eine Reinigung ist auch nach dieser Zeit nicht erforderlich. Der verwendete Filter (F8) an der Ansaugstelle hat sich bewährt.
- Die Abluft-/Fortluftseite verstaubt hingegen sichtbar; für die Hygiene ist das belanglos, ein nennenswert erhöhter Druckverlust bestand ebenfalls nicht. Bei Bedarf kann der Staub mit einem gewöhnlichen Haushalts-Staubsauger ausgesaugt werden. Wir empfehlen heute, an jedem Abluftventil Vorlege-Grob-Filter (G3) einzubauen; diese lassen sich z.B. in der Spülmaschine reinigen. Eine Nachrüstung mit solchen Vorlegefiltern wurde in Haus 4 durchgeführt; die Zyklen für die Reinigung liegen nach ersten Erfahrungen bei ca. 6 Monaten.
- Die Effizienz der Lüftungsanlage ist unverändert, die WRG liegt durchschnittlich bei 82 %. Der Stromverbrauch konnte sogar verringert werden. Die Ventilatoren halten durchschnittlich länger als üblicherweise angenommen, die Mehrzahl wurde bisher (25 Jahre) noch nicht ersetzt.



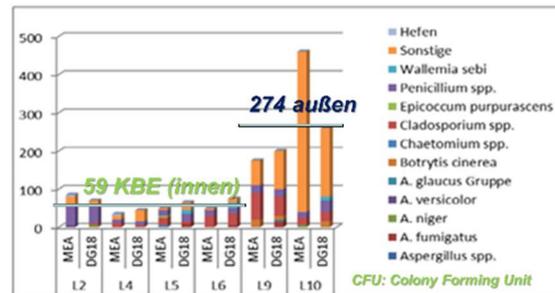
Luftqualität

Die **Innenraum-Luftqualität** wurde aktuell in 2 Häusern nachgemessen. Dafür wurde wie in den Anfangsjahren eine chemische und eine mikrobiologische Untersuchung durchgeführt:

- Die flüchtigen organischen Substanzen (VOC) sind im Vergleich zu früheren Messungen weiter zurückgegangen, mit Ausnahme der Terpene, vermutlich

weil letztere mittlerweile als Ersatzlösemittel stark im Einsatz sind. Die Tendenzen sind in beiden Häusern gleich, die Werte sind laut Expertenaussage unkritisch.

- Die mikrobiologische Untersuchung seitens der Universität Innsbruck (Schimmelpilze) zeigt, dass die Werte seit den ersten Messungen nach Bezug im Grundsatz unverändert sind. Sie liegen in allen Innenräumen weit unter den jeweiligen Außenluftkonzentrationen und niedriger als durchschnittliche Vergleichswerte.



Gemäß der Auswertung nach 25 Messjahren erfüllt das Haus weiterhin die Erwartungen in Bezug auf die Energieeffizienz, wie sie in [AkkP 5] und [Feist/Werner 1994] formuliert wurden, in vollem Umfang. Gegenüber dem aktuellen Durchschnitt deutscher Wohngebäude beträgt der gemessene Heizenergieverbrauch ungefähr **ein Sechzehntel**.

7.2 Diskussion und Empfehlungen

Aus den dargestellten Untersuchungsergebnissen lassen sich, zusammen mit den Gesamterfahrungen aus den Passivhäusern nicht nur in Darmstadt-Kranichstein, die folgenden generellen Analysen und Empfehlungen ableiten:

- Passivhäuser funktionieren, und das Konzept kommt den Nutzerwünschen entgegen. Sie bieten einen hohen thermischen Komfort und hohe Luftqualität. Passivhäuser erfordern keine besonderen Kenntnisse, keine besondere Bedienung und keine komplizierte Regelung oder aufwändige Energieversorgung.
- Passivhäuser haben einen planbaren, dauerhaft sehr geringen Energieverbrauch. Die zurzeit diskutierten Effekte wie „performance gap“ oder „rebound effect“ sind nicht zu beobachten. Die Energieeinsparung ist nachhaltig und lässt weder aufgrund von Verschleiß noch aufgrund von nutzerbedingter verringerter Aufmerksamkeit nach. Daher kann mit dieser massiven Einsparung dauerhaft gerechnet werden.

- Die in Passivhäusern typischerweise eingesetzten Konstruktionen und Materialien sind dauerhaft und sorgen so für eine langanhaltende Performance. Durch die lange Lebensdauer und den damit verbundenen Schutz der übrigen Bausubstanz leisten sie zusätzlich einen weiteren Beitrag zu Ressourcenschonung und Nachhaltigkeit. Insbesondere trifft dies zu für:
 - die Wärmedämmung, einschließlich der eliminierten Wärmebrücken
 - die Fenster: sowohl die Verglasungen (einschl. des – theoretischen – Schwachpunktes der flüchtigen Edelgase) als auch die wärmege-dämmten Rahmen
 - die Gebäudedichtheit mit korrekt ausgeführter Luftdichtheitsebene
 - die mit gutem Filter ausreichend geschützte Lüftungsanlage
- Auch ein Wärmedämmverbundsystem (WDVS) lässt sich mit hoher Dauerhaftigkeit ausführen, was vor allem aus Kostengründen interessant ist. Dazu ist es von Vorteil, einen hochwertigen mineralischen Putz zu wählen, was sich aufgrund der langen Lebensdauer bezahlt macht.
- Auch unbelüftete Konstruktionen wie das in Kranichstein realisierte Dach haben eine lange Lebensdauer ohne Bauschäden und weisen Feuchtigkeitswerte im unbedenklichen Bereich auf. Das kann aber nur dann garantiert werden, wenn eine lückenlose Luftdichtheitsebene auf der Innenseite gewährleistet ist. Heute empfehlen wir hierfür feuchteadaptive Dampfbremsen – im Projekt hat sich aber auch die konventionelle Dampfbremse bewährt.
- Die Lüftungsanlage versorgt die Bewohner mit guter, unverbrauchter Luft mit niedrigen Belastungen, dies dient der Gesundheit der Nutzer und ihrer Arbeitsproduktivität. Zu hohe Luftmengen im Winter sollten vermieden werden, damit die Feuchtigkeit nicht zu weit absinkt. Ein angepasster Luftwechsel spart nebenbei auch Energie und Kosten. Die im Passivhaus in Kranichstein eingestellten Außenluftmengen (ca. 30 m³ je Person und Stunde) erwiesen sich hierfür als optimal.
- Lüftungsanlagen sind für eine dauerhaft gute Luftqualität notwendig und erlauben es gleichzeitig, Energie einzusparen. Bei Lüftungsanlagen ist es zweckmäßig, nicht am Filter(material) zu sparen – die Schmutzfreiheit garantiert nicht nur gute Luft, sondern erspart auch die Notwendigkeit, die Lüftungsrohre und die Anlage zu reinigen. Allerdings gibt es keinen Grund, weshalb der Filterwechsel kompliziert und teuer sein sollte. Der Feinfilter mit

Qualität F8 unmittelbar an der Außenluftansaugstelle mit ausreichender Filterfläche hat sich bewährt.

- Wärmerückgewinnungsanlagen, vor Schmutz bereits aus Gründen der Luftqualität geschützt, behalten sehr viel länger als üblicherweise angenommen ihre Funktionsfähigkeit und Energieeffizienz. Auch die Ventilatoren halten länger als normalerweise angesetzt. Sie sollten dennoch so angebracht sein, dass sie leicht auszuwechseln sind. Die Kosten der Ventilatoren machen nur einen Bruchteil der Anlagenkosten aus, und insgesamt sind die Wartungskosten der Lüftungsanlage (einschl. eines eventuellen Austausches der Ventilatoren) sehr gering. Mit der erhöhten Nutzungsdauer ist die Wirtschaftlichkeit von Lüftungsanlagen deutlich besser als dies bisher – mit vorsichtigen Annahmen bzgl. der Nutzungsdauern - berechnet wurde.
- Eine zusätzliche Regelung der Anlage nach der Luftqualität hat bei einer hohen Effizienz der Lüftungsanlage nur noch einen geringen Einfluss auf den Energieverbrauch. Stattdessen sollten Hersteller sich vor allem um nicht nur effiziente, sondern auch kostengünstige Systeme bemühen und die Balance Außenluft/Fortluft sicherstellen.
- Mit der Lüftungsanlage ist eine komfortable Bereitstellung von Frischluft garantiert. Das Öffnen der Fenster unterbleibt nach kurzer Gewöhnungszeit bei unkomfortablen Außenbedingungen i.d.R. von selbst. Aufgrund der kurzen Heizperiode in Passivhäusern ist dies nur für einen kurzen Zeitraum im Jahr relevant.
- Die Maßnahmen zur Luftdichtheit sind einfach und kostengünstig – erfordern aber eine gute Planung und Ausführung. Dringend angeraten für jedes Gebäude ist die Überprüfung mit einem (ebenfalls nicht teuren) Drucktest. Vor allem wegen der großen Bedeutung für den Schutz der Bausubstanz ist eine sehr gute Wirtschaftlichkeit der Prüfmessung gegeben.
- Die Dichtheitskriterien für Passivhäuser (n_{50} -Wert von weniger als $0,6 \text{ h}^{-1}$) sind mit guter Planung leicht einzuhalten. Die Werte sind, bei Verwendung der vom PHI empfohlenen Methoden, reproduzierbar und dauerhaft stabil.
- Auch im Sommer hat das Passivhaus ein komfortables Innenklima – wenn passive Maßnahmen wie Sonnenschutz und Sommer(nacht)lüftung ergriffen werden. Wichtig ist die Begrenzung der inneren Wärmequellen, was eine hohe Elektroenergieeffizienz voraussetzt. Speichermasse erleichtert den täglichen

Ausgleich. Aktive Kühlung ist dann im mitteleuropäischen Klima in Wohngebäuden nicht nötig. Sollte dies doch gewünscht sein, ist der resultierende Stromverbrauch einer Wärmepumpe für die Kühlung sehr gering (entsprechende Messergebnisse liegen aus Pilotprojekten im Mittelmeerraum vor [Pallantzas/Roditi 2016]).

- Bereits im ersten Passivhaus wurde auf Komponenten gesetzt, die langfristig keine hohen Zusatzkosten verursachen. Also Komponenten, die ohnehin gebraucht werden, nur in jeweils verbesserter Qualität. Dieses Prinzip hat sich bewährt, tatsächlich sind inzwischen alle entscheidenden Komponenten nicht nur kostengünstiger, sondern auch in nochmals verbesserter Qualität verfügbar. Die Mehrinvestition für den Passivhausstandard wurde so von ca. 20 % beim Pilotprojekt auf heute 3-6 % der Baukosten gesenkt. Bei entsprechender Planung gibt es oft keinen messbaren Investitionskostenunterschied mehr zu „normalen“ Gebäuden. Daran ändern auch teure „Gegenbeispiele“ nichts – unnötige Kosten entstehen an ganz anderer Stelle aufgrund von Sonderwünschen oder schlicht durch Kompetenz- und Planungsmängel. Dies ist nicht mit dem Passivhaus verbunden, sondern gilt für jeden Gebäudestandard. Die Streuung bei den Baukosten ist gerade bei herkömmlichen Gebäuden heute extrem hoch. Eine Hilfe für alle energieeffizienten Konstruktionen ist die Komponentendatenbank für Produkte höchster Energieeffizienz, welche im Internet verfügbar ist [Komponenten 2016].
- Die passiven Maßnahmen haben sich durchweg als ausgesprochen dauerhaft erwiesen. Die passiven Komponenten verursachten über 25 Jahre keinen Erhaltungsaufwand. Bei den aktuellen, genauen Untersuchungen erwies sich, dass sie weiterhin einwandfrei funktionieren.
- Vor dem Hintergrund der festgestellten Langlebigkeit der Komponenten muss – sofern es Mehrinvestitionen gibt – die Wirtschaftlichkeit von passiven Energiesparmaßnahmen neu bewertet werden: Sie erweisen sich als deutlich günstiger, als es üblicherweise auf Grundlage zu kurz angesetzter Nutzungsdauern berechnet wird.
- Auch die hochwertige Dämmung von Speicher und Warmwasserleitungen ist für den Energieverbrauch wesentlich. Aus heutiger Sicht sollten, u.a. wegen der unverhältnismäßig hohen Verteilverluste, auch dezentrale Alternativen zu den zentralen Versorgungssystemen in Betracht gezogen werden.
- Bei der niedrigen Heizleistung im Passivhaus hat das Versorgungssystem – zumindest für die Raumwärmeversorgung – nicht mehr allzu viel zu leisten.

Wie jetzt gezeigt werden konnte, gilt diese Tatsache ebenfalls auf Dauer: Die zu deckenden Heizleistungen sind und bleiben niedrig. Daher sollte das Heizsystem vor allem kostengünstig realisiert werden können. Die Wärmeversorgung kann generell zentral oder dezentral organisiert werden. Bei zentralen Systemen ist entscheidend, dass die Wärmeverluste des Systems einschließlich der Leitungen konsequent reduziert werden – sowohl für die Energieeffizienz als auch für den Komfort. Die Wärmeverteilung kann sehr einfach realisiert werden, z.B. als Zuluftheizung über die vorhandene Lüftungsanlage. Aber auch Heizkörper wie noch im ersten Pilotprojekt sind möglich und kostengünstig umsetzbar. Die Regelung kann – bei entsprechend geringen Energieströmen – sehr einfach und damit wenig störanfällig sein. Bewährt hat sich eine auf die Wohnungskerntemperatur als Führungsgröße zurückgreifende Regelung. Außentemperaturabhängige Steuerungen funktionieren demgegenüber in Gebäuden mit geringem Heizwärmebedarf nicht, da andere Einflüsse, wie z.B. die Solarstrahlung, den der Außentemperatur überwiegen.

- Für die Senkung des Energieverbrauchs ist die Gebäudequalität die entscheidende Größe – die eingesparte Energie ist eine zuverlässige, störunanfällige und kostengünstige Energiequelle. Wenn der Energieverbrauch sehr niedrig ist, dann ist der Einsatz Erneuerbarer Energie technisch und wirtschaftlich sinnvoll. Mit der inzwischen kostengünstig verfügbaren Photovoltaik kann ein nennenswerter Teil des Energiebedarfs gedeckt werden. Eine angemessene Planungsgrundlage und Bewertung ist mit dem seit 2015 in das PHPP integrierten PER-System möglich [Grove-Smith et al. 2016].

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass Passivhäuser in jeder Hinsicht ihre Bewährungsprobe bestanden haben. Mit Passivhäusern lassen sich problemlos die „Nearly Zero Energy Buildings“ (NZEB) der Europäischen Gebäuderichtlinie umsetzen. Mit der nachgewiesenen Dauerhaftigkeit und langfristig garantierten Energieeffizienz befinden sich Passivhäuser im „Kostenoptimum“ – soll die Gebäuderichtlinie eingehalten werden, muss daher im Neubau die Effizienz von Passivhäusern gefordert werden. Unabhängig davon ist jeder Bauherr und Planer gut beraten, sich an diesem Standard zu orientieren und ihn konsequent umzusetzen.

8 Literatur

- [AkkP 3]** „Superfenster im Passivhaus“; Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser Phase II, Protokollband Nr. 3. Passivhaus Institut, Darmstadt, 1996.
- [AkkP 4]** „Lüftung im Passivhaus“; Protokollband Nr. 4 des Arbeitskreises kostengünstige Passivhäuser, 1. Auflage, Passivhaus Institut, Darmstadt 1997
- [AkkP 5]** „Energiebilanz und Temperaturverhalten – mit Messergebnissen aus dem Passivhaus Darmstadt Kranichstein“. Protokollband Nr. 5 des Arbeitskreises kostengünstige Passivhäuser, 1. Auflage, Passivhaus Institut, Darmstadt 1997
- [AkkP 6]** „Messung und Messergebnisse“. Protokollband Nr. 5 des Arbeitskreises kostengünstige Passivhäuser, 1. Auflage, Passivhaus Institut, Darmstadt 1997
- [AkkP 8]** „Materialwohl, Ökologie und Raumlufthygiene“. Protokollband Nr. 8 des Arbeitskreises kostengünstige Passivhäuser, 1. Auflage, Passivhaus Institut, Darmstadt 1997
- [AkkP 9]** „Nutzerverhalten“; Protokollband Nr. 5 des Arbeitskreises kostengünstige Passivhäuser, 1. Auflage, Passivhaus Institut, Darmstadt 1997
- [AkkP 10]** „Messtechnik und Messergebnisse“. Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser 10, PHI, Darmstadt 1997, 3. Auflage 2009
- [AkkP 13]** „Energiebilanzen mit dem Passivhaus Projektierungs Paket“; Protokollband Nr. 13 des Arbeitskreises kostengünstige Passivhäuser, 1. Auflage, Passivhaus Institut, Darmstadt 1998
- [AkkP 14]** „Passivhaus-Fenster“; Protokollband Nr. 14 des Arbeitskreises kostengünstige Passivhäuser, 1. Auflage, Passivhaus Institut, Darmstadt 1998
- [AkkP 16]** „Wärmebrückenfreies Konstruieren“; Protokollband Nr. 16 des Arbeitskreises kostengünstige Passivhäuser. Passivhaus Institut, Darmstadt, 1999
- [AkkP 22]** „Lüftungsstrategien für den Sommer“. Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser 22, PHI, Darmstadt 2003, 2. Auflage 2011
- [AkkP 45]** „Richtig messen in Energiesparhäusern“. Protokollband Nr 45 des Arbeitskreises kostengünstige Passivhäuser, Darmstadt 2012
- [BGA 1986]** B. Seifert et al.: „Flüchtige organische Verbindungen in der Innenraumluft“; Bundesgesundheitsblatt 29 (1986) 417
- [CEPHEUS 2001]** J. Schnieders, W. Feist, R. Pfluger, O. Kah: „CEPHEUS - cost efficient passive houses as european standards – Wissenschaftliche Begleitung und Auswertung Endbericht“. Passivhaus Institut, Darmstadt 2001; 2. Auflage 2007
- [Component Award 2014]** Wettbewerb Passivhausfenster, auf der 18. Internationalen Passivhaus-tagung in Aachen, 2014.
- [designPH]** Passivhaus Institut, DesignPH: 3-D Eingabetool für das PHPP basierend auf Trimble SketchUp, Darmstadt/Innsbruck, 2016
- [Ebel/Feist 1997]** W. Ebel und W. Feist: "Ergebnisse zum Stromverbrauch im Passivhaus Darmstadt Kranichstein" in "Stromsparen im Passivhaus"; Protokollband Nr. 7 zum Arbeitskreis Kostengünstige Passivhäuser; PHI; Darmstadt, 1997.

[ETAG 2013] European Organisation for Technical Approvals: ETAG 004, Edition 2000, Amended August 2011, Amended February 2013. "GUIDELINE FOR EUROPEAN TECHNICAL APPROVAL of EXTERNAL THERMAL INSULATION COMPOSITE SYSTEMS (ETICS) WITH RENDERING", Brussels 2013

[Fanger 1970] P.O. Fanger: "Thermal Comfort. Analysis and Applications in Environmental Engineering"; USA: New York 1972, © P.O. Fanger 1970

[Feist 1988a] W. Feist et al: „Das Niedrigenergiehaus“. C.F.Müller Verlag, 1. Auflage Heidelberg 1988, 5. Auflage Karlsruhe 1998

[Feist 1988b] W. Feist: „Forschungsprojekt Passive Häuser, Projektziele - mit einem Kommentar des Autors“ zur 2. Auflage 1995, Institut Wohnen und Umwelt, Darmstadt, 1. Aufl. 1988, 2. Aufl. 1995

[Feist 1992] W. Feist: „Passivhaus Darmstadt Kranichstein“. In: Bundesbaublatt, Februar 1992

[Feist 1993] W. Feist: „Passivhäuser in Mitteleuropa“; Dissertation, Universität Kassel, 1993

[Feist 1994a] W. Feist, M. Bially, W. Eicke-Hennig, T. Loga, M. Lüneburg, J. Militzer: „Wirtschaftlichkeit von Niedrigenergiehäusern“. In Sonnenenergie und Wärmetechnik, 4/1994

[Feist 1994b] W. Feist: „Thermische Gebäudesimulation“. C.F.Müller Verlag, Heidelberg 1994

[Feist 1995] W. Feist (Hrsg.): „Luftqualität im Passivhaus“. Institut Wohnen und Umwelt, Darmstadt 1995

[Feist 1995a] W. Feist: „Die Luftdichtheit im Passivhaus“, Passivhaus-Bericht Nr. 6, Institut Wohnen und Umwelt GmbH, Darmstadt 1995.

[Feist 1995b] Hrsg.: W. Feist. Autoren: J. Battenberg, W. Feist, A. Fingerling, K.-H. Fingerling, J. Werner, P. Kühnle, U. Rochard, J. Zeller. „Gedämmte Fensterläden im Passivhaus“ Passivhaus-Bericht Nr. 9, Institut Wohnen und Umwelt, Darmstadt 1995

[Feist 1997a] W. Feist, T. Loga: "Vergleich von Messung und Simulation" in "Energiebilanz und Temperaturverhalten"; [AkkP 5]; PHI; Darmstadt, Januar 1997.

[Feist 1997b] W. Feist: "Der Härtestest: Passivhäuser im strengen Winter 1996/97"; GRE-Inform, 12/1997.

[Feist 1997c] W. Feist: "Passivhaus Darmstadt Kranichstein - Planung, Bau, Ergebnisse", Fachinformation PHI 1997/4, 1. Auflage, 16 Seiten, Darmstadt 1997

[Feist 1997e] W. Feist: „Ergebnisse der Luftqualitätsmessungen im Passivhaus Darmstadt Kranichstein“. In: Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser, Protokollband Nr. 8: Materialwahl und Raumluft-hygiene. Passivhaus Institut, Darmstadt 1997

[Feist 2000] W. Feist: "Erfahrungen objektiv: Messergebnisse aus bewohnten Passivhäusern"; in: Tagungsband zur 4. Passivhaus Tagung in Kassel. Passivhaus Dienstleistung GmbH, 1. Auflage, Darmstadt 2000

[Feist 2005] W. Feist: „Heizlast in Passivhäusern – Validierung durch Messungen“; Endbericht IEA SHC TASK 28 / ECBCS ANNEX 38, Forschungsvorhaben im Rahmen der nationalen Beteiligung an der Arbeitsgruppe ‚Sustainable Solar Housing‘ der Internationalen Energie Agentur IEA, Subtask B: Design und Analyse, Darmstadt, 2005.

- [Feist et al. 2016]** W. Feist, W. Ebel, S. Peper, W. Hasper: „Langzeiterfahrungen und Messergebnisse aus dem ersten Passivhaus in Darmstadt-Kranichstein“. In: Tagungsband zur 20. Internationale Passivhaustagung 2016, Passivhaus Institut Darmstadt, 2016
- [Feist/Holtmann 1998]** W. Feist; K. Holtmann: „Erhöhter Glaseinstand kann Gefahr von thermisch induzierten Scheibensprüngen reduzieren“. In: gff 5/98, Zeitschrift für Glas, Fenster, Fassade. Verlag Karl Hofmann, Schorndorf, 1998
- [Feist/Werner 1993]** W. Feist; J. Werner: Erste Meßergebnisse aus dem Passivhaus Darmstadt Kranichstein; gi Heft 5, Oktober 1993
- [Feist/Werner 1994]** W. Feist und J. Werner: "Gesamtenergiekennwert < 32 kWh/(m²a)"; Bundesbau-
blatt 2/1994
- [Fingerling 1992]** K.-H. Fingerling: „Entwicklung, Entwurf und Bau von Prototypen für hochgedämmte Fensterrahmen und hochdämmende Fensterläden“ In: Bauvorbereitendes Forschungsprojekt Passive Häuser, Passivhaus Bericht Nr. 2, Institut Wohnen und Umwelt, Darmstadt 1992
- [Grove-Smith et al. 2016]** J. Grove-Smith; W. Feist; B. Krick: "Balancing Energy Efficiency and Renewables". In: Paolo Bertoldi (ed.): Proceedings of the 9th International Conference Improving Energy Efficiency in Commercial Buildings and Smart Communities, EUR 27993 EN. European Union, 2016, p. 894-902. (doi:10.2790/290244)
- [Grün 1995]** L. Grün: „Untersuchungen zur Bewertung der Luftqualität im Passivhaus Darmstadt-Kranichstein“. In: [Feist 1995]
- [Grün 1998]** L. Grün: „Luftqualität im Passivhaus“; in: Tagungsband 2. Passivhaustagung Passivhaus Institut, Darmstadt 1998
- [Kirchmair 2016]** M. Kirchmair: Laborbericht Nr. A-2015/6127, Universität Innsbruck, Institut für Mikrobiologie, Innsbruck 18.04.2016
- [Kirtschig 1998]** T. Kirtschig; J. Werner, W. Feist: „Thermische Behaglichkeit im Passivhaus Kranichstein“. IWU, Darmstadt 1998
- [Komponenten 2016]** Zertifizierte Passivhauskomponenten im Internet. www.componentdatabase.org
- [Pallantzas/Roditi 2016]** S. Palantzas, Athanasia Roditi: "Passivistas: The House Project", in Tagungsband zur 20. Passivhaus Tagung. Passivhaus Institut, Darmstadt 2016
- [Passipedia]** Passipedia; Die Online-Wissensdatenbank für energieeffiziente Gebäude. PHI, Darmstadt 2010 – 2016. www.passipedia.de
- [Peper et al. 2005]** S. Peper; O. Kah; W. Feist: „Zur Dauerhaftigkeit von Luftdichtheitskonzepten bei Passivhäusern“, Feldmessungen. Forschungsbericht im Rahmen vom IEA SHC TASK 28 / ECBCS ANNEX 38. Passivhaus Institut, Darmstadt, Juni, 2005.
- [Peper/Feist 1999]** S. Peper; W. Feist: „Luftdichte Projektierung von Passivhäusern“, Fachinformation PHI-1999/6, Passivhaus Institut, Darmstadt 1999, 10. Auflage 2009
- [PHPP]** Passivhaus Projektierungs-Paket. Berechnung von Energiebilanzen und Planungstool für energieeffiziente Gebäude. Passivhaus Institut Darmstadt, Darmstadt 1998 -2016. Aktuelle Version: PHPP 9.6 (2016)
- [PHT 1996]** Tagungsband der 1. Passivhaustagung in Darmstadt, 22./23. November 1996. Passivhaus Institut, Darmstadt, 1996

[RMI 2016] Dr. Robert Murjahn Institut, Prüfbericht_Q-02016-050-029 Bestimmung der Haftzugfestigkeit zwischen Putzschicht und EPS-Dämmung an dem Objekt Carsonweg 82, 64289 Darmstadt-Kranichstein, Ober-Ramstadt 2016 (unveröffentlicht)

[Rohrmann 1994] B. Rohrmann: "Sozialwissenschaftliche Evaluation des Passivhauses in Darmstadt"; Passivhaus-Bericht Nr. 11; Institut Wohnen und Umwelt; Darmstadt, September 1994.

[Schnieders 2012] J. Schnieders: „Messgenauigkeiten und Fehlergrößen“. In: Protokollband Nr. 45 „Richtig Messen in Energiesparhäusern“ des Arbeitskreises kostengünstige Passivhäuser, Passivhaus Institut, Darmstadt 2012

[UBA 2008] H. Hofmann, P. Plieninger: „Bereitstellung einer Datenbank zum Vorkommen von flüchtigen organischen Verbindungen in der Raumluft“. Umweltbundesamt, Dessau 2008

[Varioscan] Kamerasystem VARIOSCAN high resolution 3021 ST, Hersteller: JENOPTIK / InfraTec

[Wörner, Bomhard 2014] D. Wörner, T. v. Bomhard et al: "Look Twice: Uncover Hidden Information in Room Climate Sensor Data"; DOI: 10.1109/IOT.2014.7030110

[Zertifizierungskriterien Lüftung] Prüfreglement Lüftungsgeräte zentral, Stand 24.09.2009. Anforderungen und Prüfverfahren zur energetischen und schalltechnischen Beurteilung von Passivhaus-Lüftungsgeräten < 600 m³/h für die Zertifizierung als „Passivhaus geeignete Komponente“

**Weitere Informationen zum Projekt Passivhaus Darmstadt Kranichstein
im Internet unter:
www.passivhaustagung.de/Kran/Passivhaus_Kranichstein.htm**

**sowie in der Wissensdatenbank:
www.passipedia.de**

9 Anhang

9.1 Gutachten des RMI zur Haftzugprüfung des Außenputzes



Dr. Robert-Murjahn-Institut

RMI

Forschungsinstitut für
Beschichtungsstoffe,
Fassadensysteme und
gesundes Wohnen

Prüfbericht-Nr. Q-02016-050-029

**Prüfauftrag Bestimmung der Haftzugfestigkeit zwischen Putzschicht
und EPS-Dämmung an dem Objekt:**

**Carsonweg 82
64289 Darmstadt/Kranichstein**

Auftraggeber Passivhaus Institut
Dr. Wolfgang Feist
Rheinstraße 44/46
64283 Darmstadt

Datum 07.06.2016

Seitenanzahl 10



1	Allgemeines.....	2
2	Durchführung.....	3
3	Ergebnisse	4
4	Zusammenfassung	5
5	Anlagen	6

1 Allgemeines

1.1 Aufgabenstellung

Am 24.05.2016 wurde das Dr. Robert-Murjahn-Institut (RMI) von dem Passiv Haus Institut beauftragt, die Haftzugfestigkeit in Anlehnung (siehe Erläuterungen Abschnitt 2) an DIN EN 1542:1999-07 zwischen Putzschicht und EPS-Dämmung an dem Objekt:

Carsonweg 82
64289 Darmstadt/Kranichstein

zu bestimmen.

1.2 Angaben zum Objekt

Vom Auftraggeber wurden folgende Angaben zum Objekt gemacht:

Applikation des WDVS:	ca. 1991
Dicke des EPS Dämmung	ca. 240 mm
Putzschicht	armierter mineralischer Unterputz (ca. 7 mm) mit Strukturoberputz

Die Oberfläche der EPS-Dämmplatten war mit einer „Waffelstruktur“ versehen. Siehe hierzu die Abbildungen 4 bis 9.

Die Prüfung der Haftzugfestigkeit erfolgte an der Westseite. Sichtbare Schäden wie Hohllagen der Putzschicht oder Risse waren an der Westseite nicht vorhanden.

Weitere Angaben zu dem Objekt lagen nicht vor.



Dr. Robert-Murjahn-Institut

RMI

2 Durchführung

2.1 Probenpräparation

Alle Proben wurden mit einer Säge durch die Putzschicht bis auf die EPS-Dämmung eingesägt.

Die EPS-Dämmung wurde in der Sägenut zusätzlich mit einem Messer nochmals ca. 10 mm tief eingeschnitten.

2.2 Haftzugfestigkeit in Anlehnung an ETAG 004

Diese Prüfung ist nach DIN EN ISO/IEC 17025 akkreditiert.

Die Bestimmung der Haftzugfestigkeit erfolgte in Anlehnung an ETAG 004, Abschnitt 5.1.4.1.1.

Prüffläche:	60 mm x 60 mm (3.600 mm ²), versteifte Metallplatten
Prüfgeschwindigkeit:	(0,05 ± 0,01) N/(mm ² s) (abweichend zu 10 mm/min)
Prüfgerät:	Freundl Haftzugprüfgerät F2D EASY MLC (Nennkraft 2 kN)
Klebstoff:	2 K-PU-Klebstoff (lösemittelfrei)
Anzahl der Proben:	7
Prüfungsdatum:	24.05.2016

Die Prüfungen erfolgten bei ca. 14 °C Lufttemperatur und 100 % relative Luftfeuchte.



3 Ergebnisse

Tabelle 1: Haftzugfestigkeit

Prüfkörper-Nr.	Bruchkraft [N]	Prüffläche [mm ²]	Haftzugfestig-keit [MPa]	Bruchbild
90042005				
a	107,2	57 x 55	0,034	25 % Kohäsionsbruch EPS 75 % Adhäsionsbruch EPS / Putzschicht
b	197,9	59 x 57	0,059	60 % Kohäsionsbruch EPS 5 % Adhäsionsbruch EPS / Putzschicht 30 % Kohäsionsbruch Putzschicht 5 % Kohäsionsbruch Mineralwolle
c	218,1	54 x 57	0,071	10 % Kohäsionsbruch EPS 85 % Adhäsionsbruch EPS / Putzschicht 5 % Kohäsionsbruch Putzschicht
d	251,7	57 x 59	0,075	75 % Kohäsionsbruch EPS 25 % Kohäsionsbruch Putzschicht
e	252,8	56 x 57	0,079	5 % Kohäsionsbruch EPS 85 % Adhäsionsbruch EPS / Putzschicht 10 % Kohäsionsbruch Putzschicht
f	243,4	57 x 58	0,074	10 % Kohäsionsbruch EPS 70 % Adhäsionsbruch EPS / Putzschicht 20 % Kohäsionsbruch Putzschicht
g	237,4	59 x 59	0,079	5 % Kohäsionsbruch EPS 90 % Adhäsionsbruch EPS / Putzschicht 5 % Kohäsionsbruch Putzschicht
Mittelwert			0,07	-
Standardabweichung			0,02	-

Die Bruchbilder sind in der Anlage in den Abbildungen 4 bis 10 dargestellt.



Dr. Robert-Murjahn-Institut

RMI

4 Zusammenfassung

An dem untersuchten WDVS-Aufbau wurde eine Haftzugfestigkeit zwischen EPS-Dämmstoff und Putzschicht im Mittel von 0,07 MPa bestimmt.

Die Prüfergebnisse beziehen sich ausschließlich auf die untersuchten Proben. Eine auszugsweise Veröffentlichung dieses Prüfberichtes ist nur mit schriftlicher Genehmigung des Dr. Robert-Murjahn-Institutes gestattet.

Ober-Ramstadt, den 07.06.2016

Dr. Robert-Murjahn-Institut GmbH





i. V. Dipl.-Ing. (FH) Markus Meyer

Technischer Leiter
Prüf- und Anwendungstechnik

i. A. Philipp Kröber, MSc.

Sachbearbeiter
Prüf- und Anwendungstechnik



i. A. Dipl.-Ing. (FH) Michael Vorrhein

Sachbearbeiter
Prüf- und Anwendungstechnik

Dieser Prüfbericht wird ausschließlich elektronisch erstellt und ist daher mit den elektronischen Signaturen gültig.



5 Anlagen



Abbildung 1: Westseite des Objektes Carsonweg 82 in Darmstadt

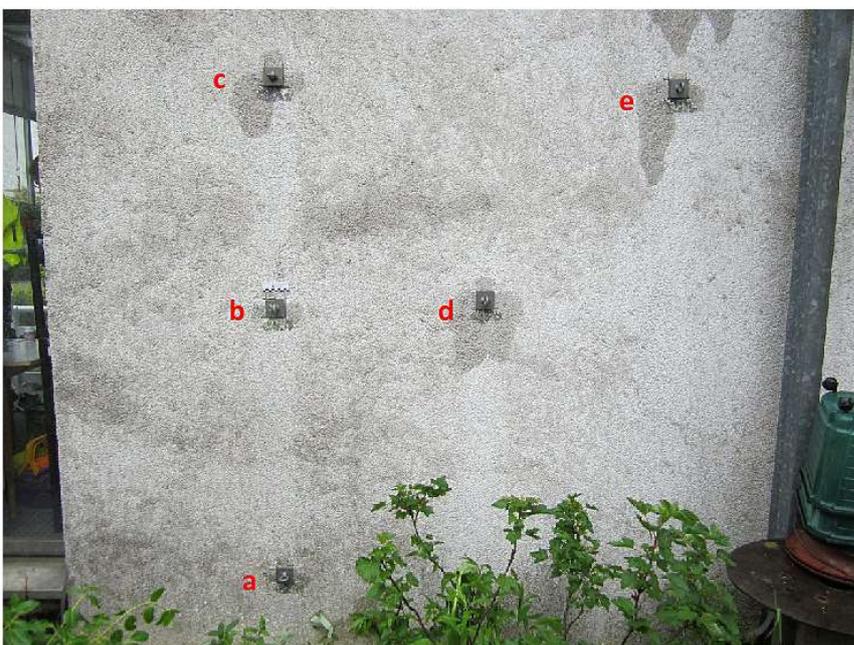


Abbildung 2: Verteilung der Prüfstellen a bis e



Dr. Robert-Murjahn-Institut

RMI

Abbildung 3: Verteilung der Prüfstellen f und g



Abbildung 4: Bruchbild Probe 90042005 a



Dr. Robert-Murjahn-Institut

RMI



Abbildung 5: Bruchbild Probe 90042005 b



Abbildung 6: Bruchbild Probe 90042005 c



Dr. Robert-Murjahn-Institut

RMI



Abbildung 7: Bruchbild Probe 90042005 d



Abbildung 8: Bruchbild Probe 90042005 e



Abbildung 9: Bruchbild Probe 90042005 f



Abbildung 10: Bruchbild Probe 90042005 g

9.2 Blower Door Messprotokolle

9.2.1 Prüfbericht und Messkurve der Blower Door Messung in Haus A nach dem Austausch der Fenster- und Tüрдichtungen.

BlowerDoor-Prüfbericht Berechnungsgrundlage EN 13829, Verfahren A Minneapolis BlowerDoor Modell 4 - Tectite Express 3.6.7.0

Objekt : PH Kranichstein Haus A Nach der Nachstellung der Fenster	Prüfer/in: S. Peper Datum: 12.2.2016 FLIB-Nr.: 24400
--	---

Klimadaten

Innentemperatur: 22 °C	Luftgeschwin. Anemom.: 0.5 m/s	Referenzdruckmessstellen: 1
Außentemperatur: 5 °C	Windstärke: 1	Gebäudestandort: B
Luftdruck (Standard): 101325 Pa	Zusätzliche Messunsicherheit infolge Wind: 0 %	

Unterdruck

Natürliche Druckdiff.	Δp_{01+}	Δp_{01-}	Δp_{02+}	Δp_{02-}
	-	-2.1 Pa	-	-2.8 Pa

Überdruck

Natürliche Druckdiff.	Δp_{01+}	Δp_{01-}	Δp_{02+}	Δp_{02-}
	0.1 Pa	-0.8 Pa	0.1 Pa	-0.2 Pa

Messreihen

Reduzierblende	Gebäude-druckdiff.	Gebläse-druckdiff.	Volumen-strom V_r	Abwei-chung	Reduzierblende	Gebäude-druckdiff.	Gebläse-druckdiff.	Volumen-strom V_r	Abwei-chung
OABCDE	[Pa]	[Pa]	[m³/h]	[%]	OABCDE	[Pa]	[Pa]	[m³/h]	[%]
Δp_{01}	-2.1	---	---	---	Δp_{01}	-0.7	---	---	---
D	-69	103	127	-0.34	D	66	107	129	-1.52
D	-63	90	119	0.25	D	58	88	117	0.05
D	-59	83	114	0.66	D	54	77	110	0.40
D	-51	66	102	0.46	D	49	67	102	0.11
D	-41	47	86	-0.02	D	38	46	84	3.89
D	-32	30	68	-2.27	D	30	27	64	-2.81
D	-21	17	51	1.29					
Δp_{02}	-2.8	---	---	---	Δp_{02}	0.0	---	---	---
Korrelationskoef. r: 0.999 Vertrauensintervall (95%)					Korrelationskoef. r: 0.996 Vertrauensintervall (95%)				
C_{env} [m³/(h Paⁿ)]	5	max. 6	min. 5		C_{env} [m³/(h Paⁿ)]	3	max. 5	min. 2	
C_L [m³/(h Paⁿ)]	6	max. 6	min. 5		C_L [m³/(h Paⁿ)]	3	max. 5	min. 2	
n [-]	0.74	max. 0.76	min. 0.71		n [-]	0.89	max. 0.99	min. 0.78	

Ergebnis, Kenngrößen

V =	494 m³	A _F =	156 m²	A _E =	393 m²			
V₅₀	Unsicher-heit	n₅₀	Unsicher-heit	w₅₀	Unsicher-heit	q₅₀	Unsicher-heit	
m³/h	%	h ⁻¹	%	m³/(m²h)	%	m³/(m²h)	%	
Unterdruck	99	+/- 7 %	0.20	+/- 8 %	0.63	+/- 8 %	0.25	+/- 8 %
Überdruck	106	+/- 7 %	0.21	+/- 8 %	0.68	+/- 8 %	0.27	+/- 8 %
Mittelwert	102	+/- 7 %	0.21	+/- 8 %	0.66	+/- 8 %	0.26	+/- 8 %
Anforderungen nach: PHI	0.6	1/h	***	0.6	m³/m²h			

Die Anforderungen der Vorschrift werden erfüllt.

Bemerkung: Das Messergebnis schließt (verdeckte) Mängel in der Konstruktion nicht aus.

Auftragnehmer : S. Peper

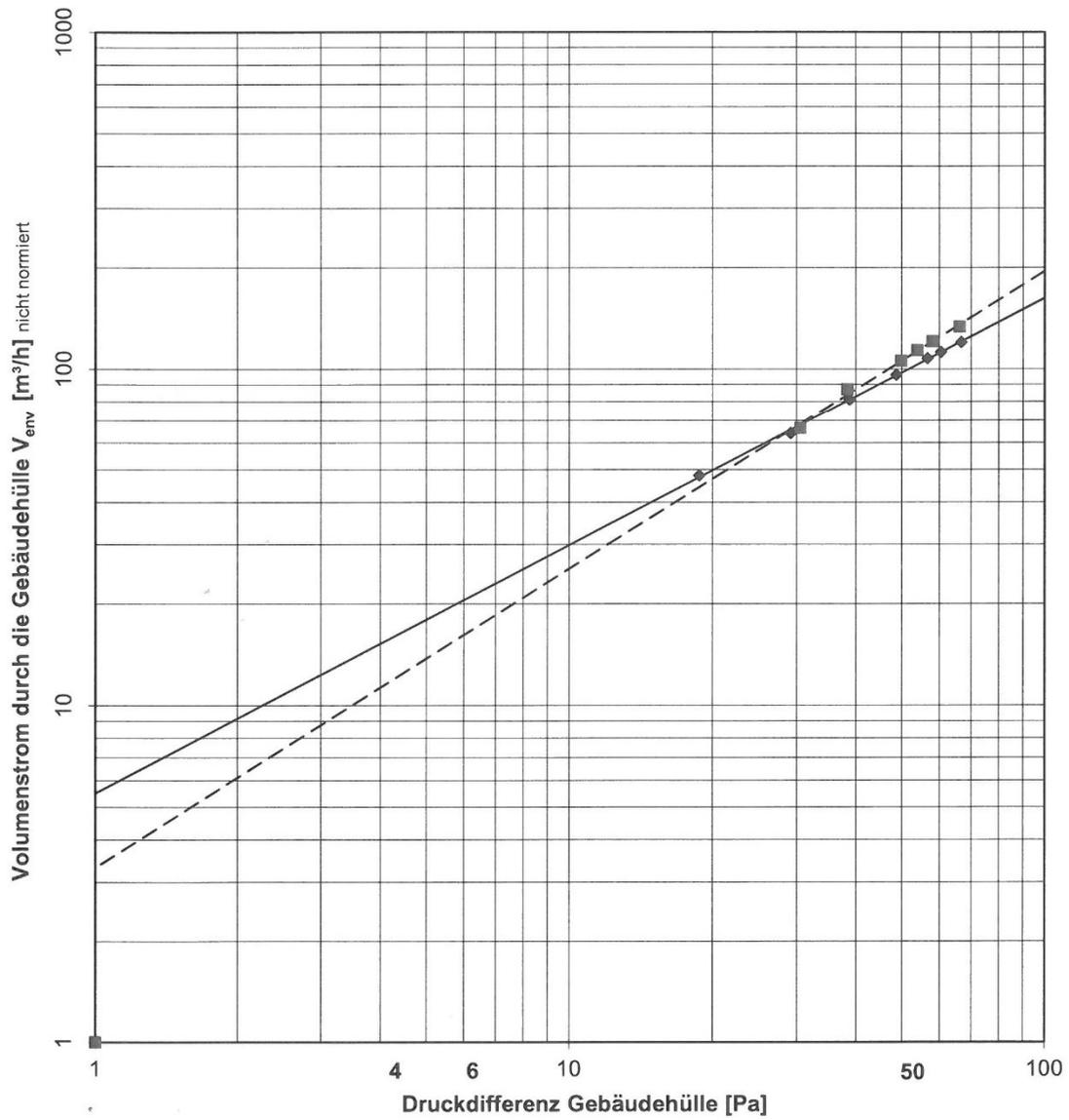
Passivhaus Institut Dr. W. Feist

64283 Darmstadt

Datum, Unterschrift

Stempel

BlowerDoor-Leckagekurve
Objekt: PH Kranichstein Haus A



- ◆ Volumenstrom Unterdruck [m^3/h]
- Volumenstrom Überdruck [m^3/h]
- Regressionsgerade Unterdruck [m^3/h]
- - - Regressionsgerade Überdruck [m^3/h]

9.2.2 Prüfbericht und Messkurve der Blower Door Messung in Haus B nach dem Austausch der Fenster- und Tüрдichtungen.

BlowerDoor-Prüfbericht

Berechnungsgrundlage EN 13829, Verfahren A

Minneapolis BlowerDoor Modell 4 - Tectite Express 3.6.7.0

Objekt : PH Kranichstein Haus B Nach der Nachstellung der Fenster	Prüfer/in: Søren Peper Datum: 12.2.16 FLIB-Nr: 24400
--	---

Klimadaten

Innentemperatur: 21 °C	Luftgeschwin. Anemom.: 0.4 m/s	Referenzdruckmessstellen: 1
Außentemperatur: 6 °C	Windstärke: 1	Gebäudestandort: B
Luftdruck (Standard): 101325 Pa	Zusätzliche Messunsicherheit infolge Wind: 0 %	

Unterdruck

Natürliche Druckdiff.	Δp_{01+}	Δp_{01-}	Δp_{02+}	Δp_{02-}
	-	-2.0 Pa	-	-2.4 Pa

Überdruck

Natürliche Druckdiff.	Δp_{01+}	Δp_{01-}	Δp_{02+}	Δp_{02-}
	-	-1.9 Pa	0.2 Pa	-2.3 Pa

Messreihen

Reduzierblende	Gebäude-druckdiff.	Gebälse-druckdiff.	Volumen-strom V_f	Abwei-chung	Reduzierblende	Gebäude-druckdiff.	Gebälse-druckdiff.	Volumen-strom V_f	Abwei-chung
O ABCDE	[Pa]	[Pa]	[m³/h]	[%]	O ABCDE	[Pa]	[Pa]	[m³/h]	[%]
Δp_{01}	-2.0	—	—	—	Δp_{01}	-1.9	—	—	—
C	-73	127	235	-0.02	C	68	109	217	-0.19
C	-67	116	224	0.90	C	65	101	209	-0.99
C	-61	97	204	-1.07	C	59	92	198	0.62
C	-58	93	200	0.92	C	52	82	187	4.78
C	-52	78	182	-0.31	C	50	72	176	0.08
C	-43	58	156	0.50	C	37	45	137	-2.74
C	-31	34	118	-2.25	C	30	32	115	-4.43
C	-22	20	91	1.38	C	18	19	88	3.16
Δp_{02}	-2.4	—	—	—	Δp_{02}	-2.0	—	—	—

Korrelationskoef. r:	0.999	Vertrauensintervall (95%)		Korrelationskoef. r:	0.996	Vertrauensintervall (95%)	
C_{env} [m³/(h Paⁿ)]	9	max. 10	min. 8	C_{env} [m³/(h Paⁿ)]	9	max. 12	min. 7
C_L [m³/(h Paⁿ)]	9	max. 10	min. 8	C_L [m³/(h Paⁿ)]	9	max. 12	min. 7
n [-]	0.75	max. 0.78	min. 0.73	n [-]	0.75	max. 0.81	min. 0.68

Ergebnis, Kenngrößen

	V =	494 m³	A _F =		A _E =			
	V₅₀	Unsicher-heit	n₅₀	Unsicher-heit	w₅₀	Unsicher-heit	q₅₀	Unsicher-heit
	m³/h	%	h ⁻¹	%	m³/(m²h)	%	m³/(m²h)	%
Unterdruck	175	+/- 7 %	0.35	+/- 8 %				
Überdruck	174	+/- 7 %	0.35	+/- 8 %				
Mittelwert	174	+/- 7 %	0.35	+/- 8 %				
Anforderungen nach:	PHI		0.6	1/h	***		0.6	m³/m²h

Die Anforderungen der Vorschrift werden erfüllt.

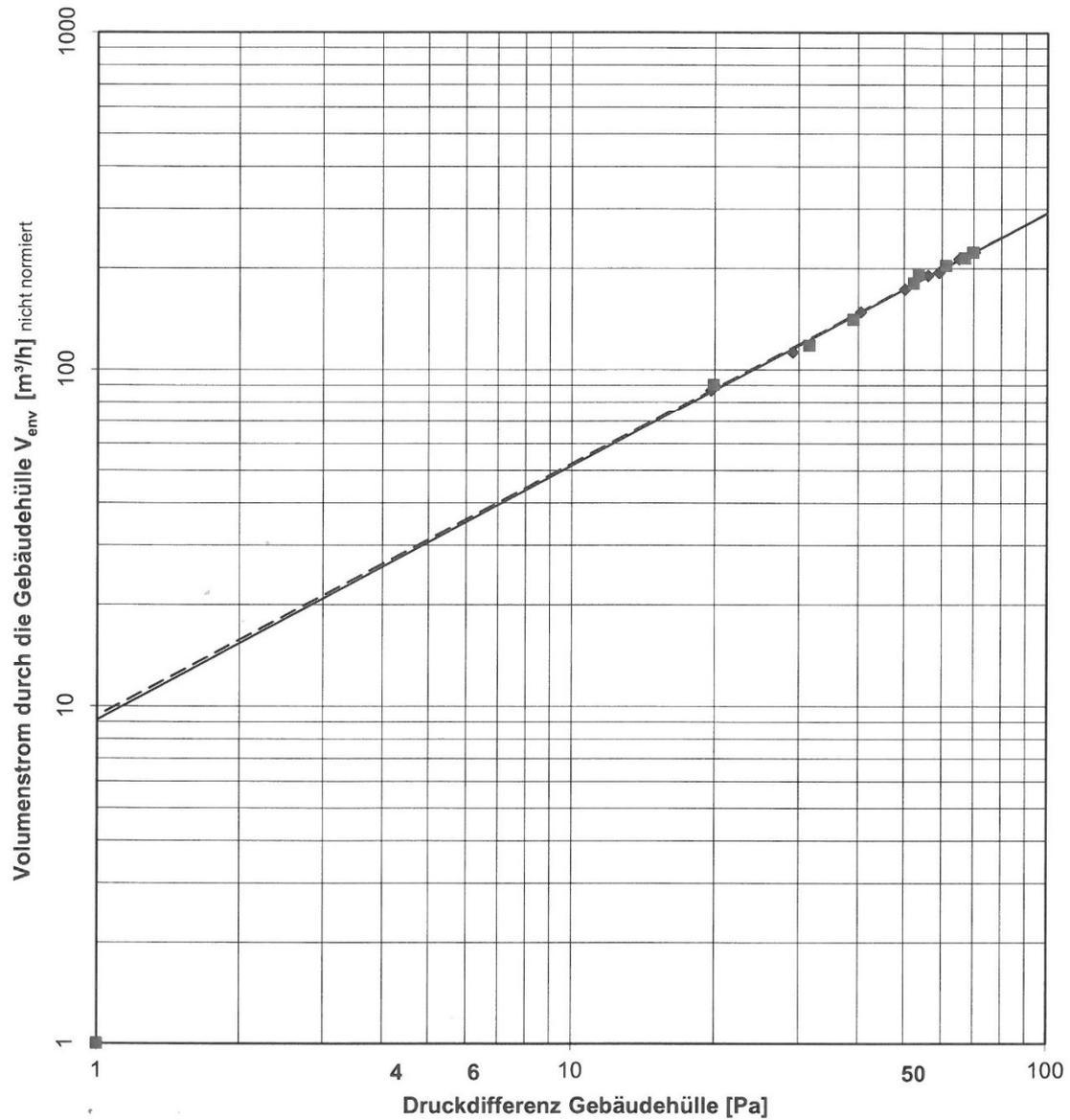
Bemerkung: Das Messergebnis schließt (verdeckte) Mängel in der Konstruktion nicht aus.

Auftragnehmer : S. Peper
Passivhaus Institut Dr. W. Feist
64283 Darmstadt

Datum, Unterschrift

Stempel

BlowerDoor-Leckagekurve
Objekt: PH Kranichstein Haus B



- ◆ Volumenstrom Unterdruck [m^3/h]
- Volumenstrom Überdruck [m^3/h]
- Regressionsgerade Unterdruck [m^3/h]
- - - Regressionsgerade Überdruck [m^3/h]