

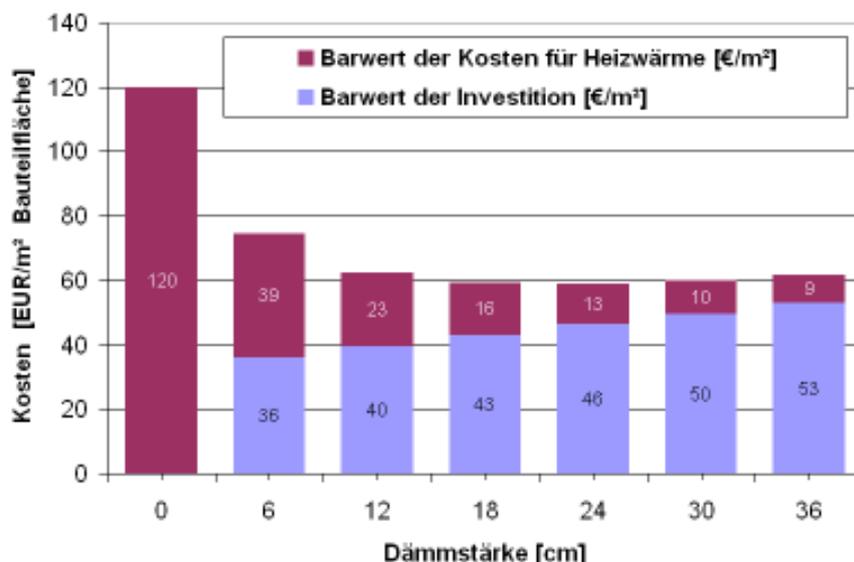


**PASSIV
HAUS
INSTITUT**

**Dr. Wolfgang Feist
Rheinstr. 44-46
D64283 Darmstadt**



Ökonomische Evaluierung zweier Sanierungsprojekte mit Dokumentation der abgerechneten Kosten: Hohelooogstraße und Schlesierstraße in Ludwigshafen



Forschungsvorhaben im Rahmen der nationalen Beteiligung an der Arbeitsgruppe 'Advanced Housing Renovation with Solar & Conservation' der Internationalen Energie Agentur IEA:

IEA SHC Task 37

Projekttitle: Energieeffiziente und solare Sanierung von Wohngebäuden

Gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie BMWi vertreten durch den Projektträger BEO Forschungszentrum Jülich GmbH

Darmstadt; 2010

Ökonomische Evaluierung zweier Sanierungsprojekte mit Dokumentation der abgerechneten Kosten: Hoheloostraße und Schlesierstraße in Ludwigshafen

Endbericht IEA SHC TASK 37 Subtask B

<p>Autoren: Dr. Berthold Kaufmann Dr. Witte Ebel Prof. Dr. Wolfgang Feist</p> <p>Unter Mitarbeit von: Katharina Stroh</p> <p>Herausgeber: PASSIVHAUS INSTITUT Dr. Wolfgang Feist Rheinstr. 44/46 D-64283 Darmstadt</p> <p>Tel: 06151 / 82699-0 Fax: 06151 / 82699-11 E-Mail: mail@passiv.de www.passiv.de</p> <p>Darmstadt, 2010</p>	<p>Dieser Bericht entstand im Unterauftrag des Fraunhofer Institutes für solare Energiesysteme ISE, Freiburg im Rahmen des Solar Heating and Cooling Programme der Internationalen Energie Agentur IEA, Task 37 'Advanced Housing Renovation with Solar and Conservation'.</p> <p>Der vorliegende Bericht bezieht sich auf die Forschungsarbeiten im Subtask B: Demonstration und Analyse</p> <p>Die nationale Beteiligung wurde gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie BMWi Vertreten durch den Projektträger BEO Forschungszentrum Jülich GmbH</p> <p>Förderkennzeichen 032 27271B</p> <p>Wir danken der GAG Ludwigshafen für die Erlaubnis die Abrechnungsdaten der Sanierungsprojekte Hoheloostraße und Schlesierstraße einzusehen und auszuwerten. Insbesondere Herrn Krämer und Herrn Zaman für Ihre große Hilfsbereitschaft und Unterstützung.</p>
<p>Haftungsausschluss: Die Informationen in dieser Schrift wurden nach bestem Wissen zusammengestellt. Eine Haftung für den Inhalt kann jedoch trotz sorgfältiger Bearbeitung und Korrektur nicht übernommen werden. Dies gilt insbesondere für Detailzeichnungen, die in jedem Fall als Prinzipskizzen zu verstehen sind, in denen nicht immer alle baulich relevanten Komponenten enthalten sein müssen.</p>	

Inhaltsverzeichnis

Einleitung, Ergebnisse und Schlussfolgerungen	4
Auswertung Baukosten Hoheloogstraße, Ludwigshafen	7
Vergleich der Baukosten PHiB – NEH	7
Auswertung Baukosten Schlesierstraße, Ludwigshafen	12
Vergleich der Baukosten Hoheloogstraße – Schlesierstraße	13
Kostenanalyse Schlesierstraße im Detail	15
Kostenanalyse Schlesierstraße im Detail: Kostenoptimierung	18
Ökonomische Bilanz der Kosten der Energiesparmaßnahmen	22
Barwert – Restwert – Kopplungsprinzip – Ohnehinkosten	22
Kostenberechnung im Detail	23
Schlesierstraße wie saniert	24
Szenario: Sanierung Schlesierstraße wirtschaftlich optimiert	29
Szenario: Sanierung Schlesierstraße als NEH	33
Zusammenfassung: Lebenszykluskostenanalyse Energie & Invest	36
Literatur	41

Ökonomische Evaluierung zweier Sanierungsprojekte mit Dokumentation der abgerechneten Kosten: Hoheloogstraße und Schlesierstraße in Ludwigshafen

Einleitung, Ergebnisse und Schlussfolgerungen

In den Jahren 2005 bis 2008 wurden zwei Wohngebäude der GAG Ludwigshafen mit hoch energieeffizienten Komponenten saniert. Ziel war es, dem Passivhausstandard so nahe wie möglich zu kommen. Das Pilotprojekt 'Passivhaus im Bestand' (PHiB) Hoheloogstraße wurde vom Passivhausinstitut begleitet und messtechnisch untersucht und ausgewertet [Peper/Feist 2009]. Im Rahmen der IEA Task 37 wurde von diesem Projekt und vom Nachfolgeprojekt PHiB-Schlesierstraße ex post eine detaillierte öko-nomische Untersuchung durchgeführt anhand der real abgerechneten Baukosten.

Die vorliegende Untersuchung baut auf den Publikationen [Kah/Feist 2008] und [Kaufmann/Ebel 2009] auf, die auf systematischen Kostenrecherchen für die einzelnen Komponenten (Wärmedämmung, Fenster, Lüftungsanlage, etc.) basieren.

Insbesondere wurden die beiden folgenden Fragestellungen anhand der Sanierungsprojekte untersucht:

1. Wie hoch sind die Mehrinvestitionen einer hocheffizienten Bauweise im Vergleich zu einem Niedrigenergiehaus im gegenwärtigen Marktgeschehen?
2. Ist durch Skalen- und Lerneffekte künftig eine noch weitere Kostendegression möglich?

Die erste Frage wird anhand des Projektes 'Hoheloogstraße' behandelt, bei dem gleichzeitig ein baugleiches Gebäude entsprechend einem guten Niedrigenergiestandard saniert wurde. Die zweite Frage wurde mit den detailliert bekannten Kosten der Maßnahmen aus dem Projekt 'Schlesierstraße' untersucht.

Bei dem ersten Pilotprojekt Hoheloogstraße (PHiB) betragen die Sanierungskosten für alle Maßnahmen mit Passivhauskomponenten (Wärmedämmung der Gebäudehülle, neue Fenster, verbesserte Luftdichtheit und kontrollierte Wohnungslüftung) 406 €/m² Wohnfläche (brutto, incl Umsatzsteuer, siehe Tabelle 1).

Werden von den genannten kompletten Maßnahmenkosten die sogenannten Ohnehinkosten für alle sowieso notwendige Teilmaßnahmen (z. B. neuer Außenputz) abgezogen, so stellt sich heraus, dass alle direkt der Energieeinsparung zuzuordnenden Kosten über die eingesparten Energiekosten refinanziert werden können. Dies gilt sogar mit konservativen Annahmen bzgl. der Zins- und der Energiepreisentwicklung (Tabelle 6). Es zeigt sich, dass die Lebenszykluskosten, d.h. die Summe aus den anrechenbaren Investitionskosten und den kapitalisierten Energiekosten um 100 €/m² geringer ist als für das nicht sanierte Gebäude (Abbildung 19); dies entspricht einer mittleren Kosteneinsparung von 7 € pro m² Wohnfläche und Jahr; dabei werden als Betrachtungszeitraum in dieser Studie immer 20 Jahre angesetzt. Das Nachbargebäude Hoheloogstraße (NEH) mit derselben Geometrie und identischer Südausrichtung wurde auf das Niveau eines Niedrigenergiehauses saniert, dort betragen die Kosten für dieselben Maßnahmen etwa 230 €/m² Wfl., damit ist ein direkter Vergleich möglich, Tabelle 1.

Betrachtet man die Lebenszykluskosten der Komplettsanierung Hoheloogstraße, so ergeben sich Mehrkosten für das PHiB von etwa 8 % gegenüber der Niedrigenergiehausvariante. Das ist ein hervorragendes Ergebnis für dieses Pilotprojekt, vgl. Abbildung 20.

Aufgrund dieser Erfahrung entschied sich der Bauherr, das Nachfolgeprojekt PHiB Schlesierstraße vollständig mit Passivhauskomponenten zu sanieren. Dieses Objekt war zuvor bereits einmal teilweise, aber unzureichend energetisch saniert worden; aus diesem Grunde waren die einzusparenden Energiekosten geringer und die Sanierung lag an der Grenze zur Wirtschaftlichkeit. Die Analyse der in diesem Projekt erhobenen Detailkosten zeigt:

- Die Investitionsmehrkosten für die energetische Sanierung lassen sich durch Skaleneffekte bei den Bauprodukten und optimierte Planung zukünftig weiter verringern.
- Die Kosten für die eingesparte Kilowattstunde für das Projekt PHiB Schlesierstraße liegen unter 0.06 €/kWh, Abbildung 12. Im Vergleich zu 0.07 €/kWh für die aus Brennstoffen bezogene Kilowattstunde Endenergie zeigt sich, dass auch dieses Projekt wirtschaftlich ist.

Um das Potential einer ökonomischen Optimierung auszuloten, wurde auf der Basis des Projektes PHiB Schlesierstraße untersucht, bei welchen Maßnahmen noch Kosteneinsparungen möglich sind. Aus der Analyse dieser Daten zeigt sich:

- Der durch die kostenoptimierte Sanierung mit PH-Komponenten erzielbare Gewinn gegenüber dem ursprünglichen Altbauzustand des Gebäudes würde bei diesem Bauprojekt bei 188 €/m² liegen (Abbildung 14). Kapitalisiert über

einen Kalkulationszeitraum von 20 Jahren entspricht das einem Gewinn von etwa 13 € pro m² Wohnfläche und Jahr.

- Die Lebenszykluskosten sind gemäß dieser Optimierung geringer als für eine Sanierung auf Niedrigenergiehausniveau, Abbildung 21.

Es stellt sich somit heraus, dass für zukünftige Sanierungen das Qualitätsniveau der die Passivhauskomponenten das ökonomische Optimum ist und damit eine in jeder Dimension nachhaltige Lösung des Energieproblems. Voraussetzung sind eine sorgfältige, auch kostenoptimierte Planung, die Induzierung von Lern- und Skaleneffekten durch die Nachfrage nach Passivhauskomponenten, und die konsequente Umsetzung des Kopplungsprinzips: Energetische Sanierungen müssen immer dann ausgeführt werden, wenn sie kostengünstig mit anderen ohnehin fälligen Maßnahmen (neuer Außenputz) gekoppelt werden können. Wenn eine Maßnahme durchgeführt wird, dann muss dies auf möglichst hohem energetischen Niveau geschehen: **Wenn schon – denn schon!** Das ist, wie gezeigt werden konnte, in jedem Falle ökonomischen vertretbar und meistens sogar ökonomisch geboten.

Es muss allerdings deutlich gemacht werden, dass die Baukosten wie sie in dieser Studie dokumentiert sind, nur für 'preisgünstige' Produkte und Komponenten gelten. Das heißt, dass z.B. Holz- oder gar Holz-Alu-Fenster für derartige Projekte nicht verbaut werden konnten, weil dafür kein Budget vorhanden war. Dies war jedoch die dezidierte Absicht des Bauherrn, GAG-Ludwigshafen, bei diesen Projekten: es sollten kostengünstige, aber dennoch hochwertige, langlebige und komfortable Wohnungen entstehen.

Genau dies macht diese Projekte für eine Studie zum 'kostengünstigen Passivhaus' aber so wertvoll: es konnte gezeigt werden, dass eine Grundausstattung mit Passivhauskomponenten auch für jede Altbausanierung zu erschwinglichen Kosten möglich ist. Wer darüber hinaus edlere Oberflächen und weitere architektonische Ansprüche wünscht, kann auch dies realisieren. Die daraus resultierenden Mehrkosten sollten dann jedoch nicht auf das Budget 'energetische Sanierung' geschrieben werden.

Mit den hier beschriebenen Projekten und Projektkosten wurde eine Basiskonfiguration für kostengünstige Altbausanierungen beschrieben, die als Maßstab für die nächsten Jahre gelten kann. Eine derartige Konfiguration sollte sich jede Wohnbau-gesellschaft leisten können. Die Mieter werden es schätzen lernen.

Auswertung Baukosten Hoheloogstraße, Ludwigshafen

An diesem Gebäude, bzw. dieser Sanierungsmaßnahme ist ein direkter Vergleich möglich zwischen einem auf nahezu Passivhausstandard sanierten Gebäudeteil mit Lüftungsanlage (Heizwärmebedarf 16 kWh/m²a), und einem zweiten Gebäudeteil, der als gutes Niedrigenergiehaus, dabei aber ohne Lüftungsanlage, saniert wurde [Peper/Feist 2009]. Das Gebäude besteht aus zwei geometrisch identischen Gebäudeteilen, Abbildung 1, welche beide Südorientierung haben. Der eine Teil wurde bei der Sanierung zum „Passivhaus im Bestand“ (PHiB) umgebaut, der andere wurde nur als Niedrigenergiehaus saniert mit manueller Fensterlüftung durch die Bewohner. Die technischen Details der Sanierung und die Ergebnisse des Monitorings, bei dem sowohl Temperaturen als auch Energieverbräuche aufgezeichnet und ausgewertet wurden, sind in [Peper/Feist 2009] dokumentiert.



Abbildung 1: Ursprünglicher Zustand der Gebäude Hoheloogstraße im Dezember 2004 (links) und die Gebäude nach der Sanierung 2006 (rechts) [Peper/Feist 2009].

Vergleich der Baukosten PHiB – NEH

Für die ökonomische Bewertung stellt diese zweigeteilte Sanierung einen herausragenden Glücksfall dar, weil damit die Mehrkosten zwischen einem Niedrigenergiehaus (NEH) gemäß den gesetzlichen Anforderungen (EnEV 2002) und einer Sanierung mit Passivhauskomponenten aus dem direkten Vergleich ermittelt werden konnten. Zusammengefasst lautet das Ergebnis: es ergaben sich Mehrkosten für das 'PHiB' (vom Bauherr als "Passivhaus im Bestand" bezeichnet) von etwa 175 €/m² Wohnfläche gegenüber dem NEH mit einer Unsicherheit von ± 20 €/m² (vgl. Tabelle 1).

Die gesamten Baukosten, die direkt einer für den Energieverbrauch relevanten Maßnahme zugeordnet werden konnten, betragen bei dem PHiB 406 €/m² Wohnfläche, und beim NEH 231 €/m² Wfl. Dabei wurden die vier relevanten Maßnahmen: Wärme-

dämmung Gebäudehülle, Fenster, Luftdichtheit und Lüftung und Heizkörper (Haustechnik) ausgewertet und im Detail aufgeschlüsselt, vgl. ebenfalls Tabelle 1.

Obwohl die Kostendaten sehr detailliert ermittelt wurden, bleibt trotzdem eine Unsicherheit in der Gesamtsumme der Kosten für die Energieeffizienzmaßnahmen von etwa $\pm 20 \text{ €/m}^2$. Diese resultiert z.B. in der Zuordnung einzelner Gewerke zu den verschiedenen untersuchten Maßnahmen: Dementsprechend ist natürlich auch die Differenz der Kosten für das PHiB und das NEH unsicher, siehe Tabelle 1 und Abbildung 3.

alle Angaben brutto (incl. Ust 19%)	PHiB	Zahl WE	Wohnfläche	Bauteilfläche		NEH	Zahl WE	Wohnfläche	Bauteilfläche	Differenz		
Kosten Hoheloostraße	Kosten	12	750 m ²			Kosten	12	750 m ²				
	€	€/WE	€/m ² Wfl	[m ²]	€/m ² Bt.f.	€	€/WE	€/m ² Wfl	[m ²]	€/m ² Wfl		
Dämmung Dach	10.358 €	863 €	14 €	346	30 €	0 €	0 €	0 €	346	0 €	14 €	
WB zur Dämmung Dach	8.344 €	695 €	11 €	346	24 €	0 €	0 €	0 €	346	0 €	11 €	
Summe	18.702 €	1.558 €	25 €	346	54 €	0 €	0 €	0 €	346	0 €	25 €	
Dämmung Kellendecke	11.358 €	946 €	15 €	346	33 €	5.078 €	423 €	7 €	346	15 €	8 €	124%
WB zur Dämmung KD	11.571 €	964 €	15 €	346	33 €	0 €	0 €	0 €	346	0 €	15 €	
Endarbeiten Perimeter	9.058 €	756 €	12 €	346	26 €	0 €	0 €	0 €	346	0 €	12 €	
Summe	31.996 €	2.666 €	43 €	346	92 €	5.078 €	423 €	7 €	346	15 €	36 €	
Dämmung Außenwand	26.284 €	2.190 €	36 €	638	41 €	13.012 €	1.084 €	17 €	638	20 €	18 €	102%
Dämmung Dübäl	7.795 €	650 €	10 €	638	12 €	7.795 €	650 €	10 €	638	12 €	0 €	0%
Dämmung Anschlüsse	20.024 €	1.668 €	27 €	638	31 €	16.479 €	1.373 €	22 €	638	26 €	5 €	22%
Außenputz	10.691 €	891 €	14 €	638	17 €	9.874 €	823 €	13 €	638	15 €	1 €	8%
Summe	64.796 €	5.400 €	86 €	638	102 €	47.162 €	3.930 €	63 €	638	74 €	24 €	
Fenster	84.001 €	7.000 €	112 €	180	467 €	59.424 €	4.952 €	79 €	180	330 €	33 €	41%
Türen Hauseingang	8.061 €	672 €	11 €	12	672 €	8.061 €	672 €	11 €	12	672 €	0 €	0%
Summe	92.062 €	7.672 €	123 €	192	479 €	67.486 €	5.624 €	90 €	12	5.624 €	33 €	
Lüftung	57.986 €	4.831 €	77 €			9.585 €	799 €	13 €			85 €	505%
Lüftung Trockenbau	3.046 €	254 €	4 €			0 €	0 €	0 €			4 €	#DIV/0!
Summe	61.013 €	5.084 €	81 €			9.585 €	799 €	13 €			89 €	
Heizkörper (incl. HR Lüftung)	22.617 €	1.885 €	30 €			36.995 €	3.083 €	49 €			-19 €	-39%
Luftdichtheit	3.582 €	298 €	5 €	1.510	2 €	0 €	0 €	0 €			5 €	#DIV/0!
Gerüst	7.660 €	654 €	10 €	638	12 €	6.789 €	566 €	9 €	638	11 €	1 €	16%
Elektro-Installation	2.012 €	168 €	3 €			0 €	0 €	0 €			3 €	#DIV/0!
Gesamtkosten der energetisch relevanten Maßnahmen	304.630 €	25.386 €	406 €			173.095 €	14.425 €	231 €			175 €	1 €
der Rest (energetisch nicht relevant)	615.689 €	51.307 €	821 €			616.976 €	51.415 €	823 €			-1,72 €	-0 €
Gesamte Sanierungskosten (abgerechnet, netto)	920.319 €	76.693 €	1.227 €			790.071 €	65.839 €	1.053 €			174 €	0 €

Tabelle 1: Gesamte Sanierungskosten Hoheloostraße für die energetisch relevanten Maßnahmen: Wärmedämmung, Fenster, Luftdichtheit und Lüftung und Heizkörper

In Abbildung 2 wurden die Kosten der einzelnen energetisch relevanten Maßnahmen für jedes Bauteil der Gebäudehülle und die relevanten Haustechnischen Installationen im Vergleich dargestellt: gelb jeweils die Kosten für das PHiB, türkis die Kosten für das NEH. Die Differenz ist jeweils als grauer Stapelbalken dargestellt. Bis auf die Heizkörper ergeben sich für alle Komponenten gewisse Mehrinvestitionen im Vergleich zum NEH. Heizkörper sind im NEH in größerer Anzahl notwendig, im PHiB nur im Badezimmer, daher die Mehrkosten für das NEH. Die Zuluftheizregister, eines pro Wohnung im PHiB, sind in den Kosten für die Heizkörper enthalten.

Alle hier genannten Zahlen sind tatsächlich abgerechnete Kosten. Die sogenannten 'Ohnehinkosten', die nicht direkt der Energieeinsparung zuzurechnen sind (z.B. ein neuer Außenputz auf dem Wärmedämmverbundsystem) wurden hier noch **nicht** ab-

gezogen. Wegen der Struktur der zur Verfügung stehenden Daten war dies für das Projekt Hohelooogstraße nicht möglich. Wie weiter unten im einzelnen ausgeführt wird, müssen diese Kosten, bei der zeitlichen Kopplung der Energiesparmaßnahme an die ohnehin notwendige Sanierungsmaßnahme nicht den Kosten der Maßnahme angerechnet werden, sondern müssen bei der Evaluation der Wirtschaftlichkeit abgezogen werden. Dies wird beim Projekt Schlesierstraße im Detail gezeigt.

Kostenvergleich: Hohelooogstraße PHiB / NEH

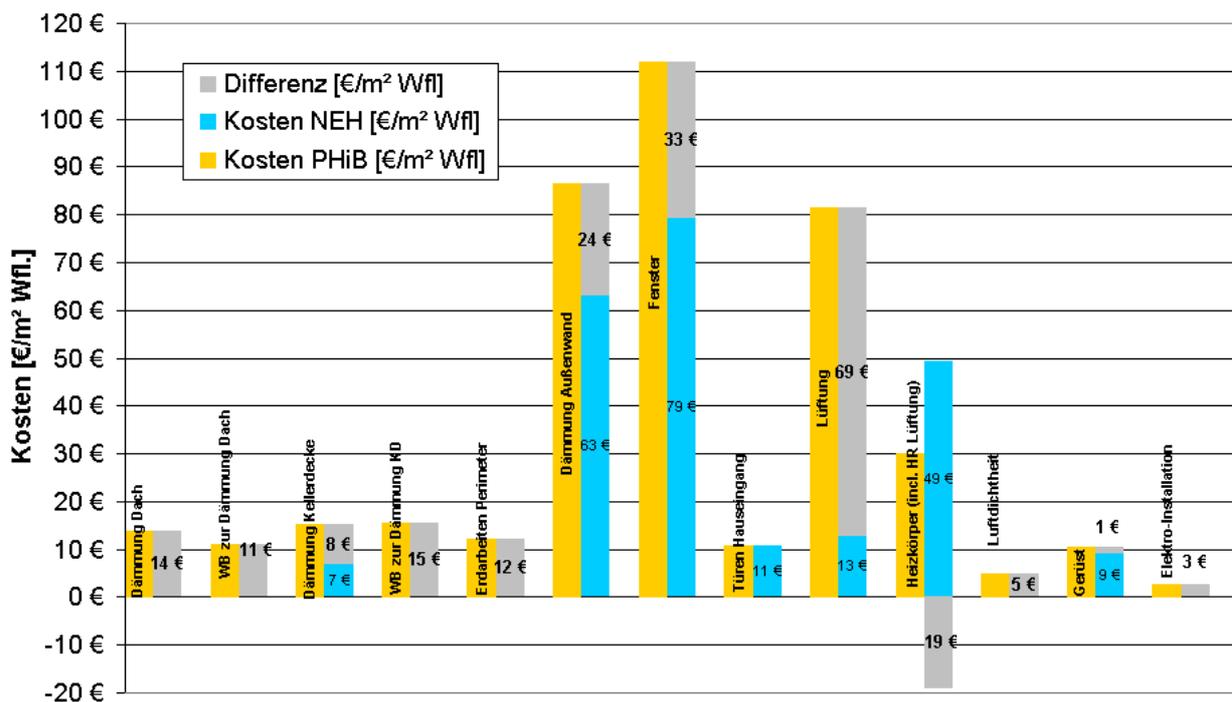


Abbildung 2: Baukosten Hohelooogstraße für die energetisch relevanten Maßnahmen. Vergleich zwischen der Variante 'PHiB' und dem direkt benachbarten 'NEH'.

Um die Kosten der einzelnen Komponenten untereinander vergleichen zu können, wurden alle absoluten Beträge auf die Wohnfläche des jeweiligen Gebäudes (750 m²) bezogen. Für die Maßnahmen an der Gebäudehülle sind zusätzlich die Kosten pro m² Bauteilfläche aufgeführt, so dass diese maßnahmenspezifisch mit anderen Bauprojekten verglichen werden können. Als Bauteilflächen wurden jedoch nur die Außenwand, das Dach und die Kellerdecke und die Fenster einzeln ausgewiesen. Die Kosten für die 'Verpackung' der Wärmebrücken am Dachrand und am Perimeter wurden jeweils dem Dach bzw. der Kellerdecke zugeschlagen. Alternativ könnten sie auch auf die Länge des Dachrandes bzw. des Perimeters bezogen werden, dies hätte jedoch die Komplexität der Aufstellung erhöht.

In Abbildung 3 wurden dementsprechend die Kosten der Maßnahmen 'Verpackung' bzw. Reduzierung der Wärmebrücken jeweils zusammen mit den Kosten der Dämmung auf der obersten Geschosdecke und der Kellerdecke dargestellt. Damit sind die einzelnen Kosten systematisch zugeordnet. Man erkennt jetzt, dass die Wärmebrückenreduktion im Vergleich zur Dämmung des flächigen Bauteils hier einen relativ großen Kostenanteil verursacht – nach Auffassung der wissenschaftlichen Nachuntersuchung wäre ein etwas geringerer Aufwand hier durchaus vertretbar gewesen, vgl. die Ausführungen zur Kostenoptimierung beim Projekt Schlesierstraße. Der Anteil Kostenanteil des Außenputzes, der Dübel und der Anschlüsse des WDVS wurden separat ausgewiesen. Dies wird später bei der Bestimmung der schon erwähnten 'Ohnehinkosten' wichtig.

Kostenanalyse im Detail: Hoheloogstraße PHiB / NEH

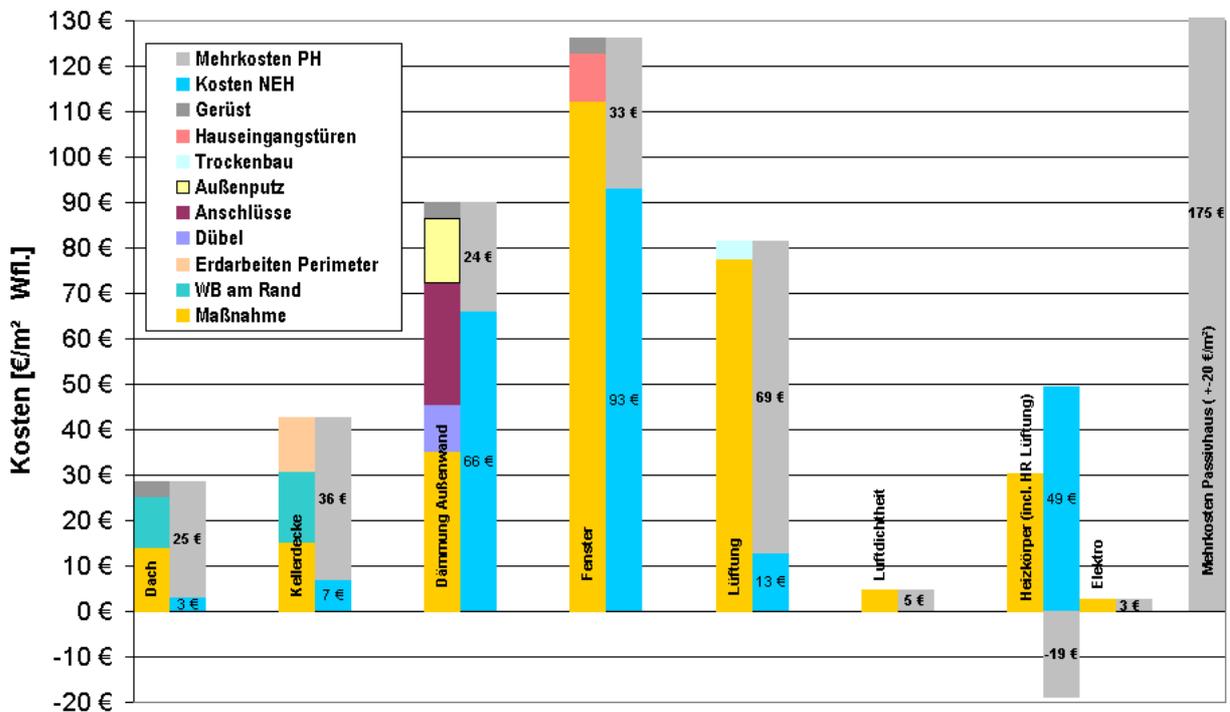


Abbildung 3: Baukosten Hoheloogstraße für die energetisch relevanten Maßnahmen. Vergleich zwischen der Variante 'PHiB' und dem direkt benachbarten 'NEH'. Die verschiedenen Kosten wurden detailliert aufgeschlüsselt. Dargestellt sind hier jeweils die gesamten Baukosten für die Maßnahmen umgerechnet in €/m² Wfl, siehe Legende und Tabelle 1.

Bei Dach und Kellerdecke wurden die Kosten für die Wärmebrückenreduktion am Dachrand bzw. Perimeter jeweils dort hinzugerechnet. Gerüstkosten wurden zu je einem Drittel Dach, Außenwand und Fenstern zugerechnet. Bei der Außenwanddämmung wurden Kosten für Putz, Anschlüsse und Kanten und Dübel separat aufgeschlüsselt, damit später Ohnehinkosten und Altbautypische Kosten isoliert werden können.

Neben der Wärmebrückenreduktion fällt beim WDVS auf, dass die Kosten für die zusätzliche mechanische Befestigung der Dämmblöcke (Dübel) sowie für die An-

schlüsse der Oberflächen (Putz) an benachbarte Bauteile (z.B. Fenster) einen relativ hohen Kostenanteil im Vergleich zu den Kosten des Dämmstoffes selbst ausmachen. Dies ist nicht außergewöhnlich. Wie man an der Liste in Tabelle 1 sieht, sind die Ausgaben für Dübel, Anschlüsse und den Außenputz im NEH fast genauso hoch. Man erkennt jedoch, dass es hier evtl. noch erhebliche Kosteneinsparpotentiale gibt. Die Kosten für das Gerüst wurden zu je einem Drittel dem Dach, der Außenwanddämmung und den Fenstern zugerechnet.

Die Kosten für die Fenster beinhalten auch die Verschattung (Rollladen). Für die Haustüren wurde in beiden Gebäudeteilen das identische Produkt verwendet, daher sind die Kosten gleich.

Die Kosten für die Lüftungsanlage beinhalten alle Kosten: für das Zentralgerät in jeder Wohnung, die Kanäle zur Luftführung, Zuluftelemente, Kernbohrungen in den Außenwänden für die Außen- und Fortluft (11.20 €/m²), etc. Besonders zu erwähnen ist ein zusätzlicher Schrank, der um das Lüftungsgerät herum gebaut wurde, um dessen Schallemissionen zu dämpfen. Das wäre nicht unbedingt notwendig gewesen, wurde aber empfohlen, weil die Geräte zum Teil im Badezimmer und zum Teil in der Küche platziert sind – dort wird der Wohnwert durch den besseren akustischen Komfort verbessert. Dieser Schrank war mit etwa 490 €/WE bzw. 7.80 €/m² Wfl. relativ teuer, weil er als Nachtrag beauftragt worden war. Dasselbe gilt für die Überströmöffnungen an den Innentüren, die 45 €/Tür (200 €/WE) bzw. 3.14 €/m² Wfl gekostet haben. Im Folgeprojekt Schlesierstraße waren beide Komponenten wesentlich kostengünstiger, weil sie von vorneherein in den Leistungsverzeichnissen eingeplant waren. Die Kosten für das hydraulische Zuluft-Nachheizregister wurden bei den Heizkörpern verbucht, weil dies systematisch einfacher ist.

Beim NEH wurden als 'Lüftungsanlage' einfache Lüfter im Badezimmer eingebaut, welche nur während der Benutzung und kurz danach noch in Betrieb sind (Nachlaufrelais). Trotzdem war dafür eine Kernbohrung/WE für die Fortluftdurchlässe notwendig (6.90 €/m²), die wesentlich zu den genannten Kosten (13 €/m²) beitragen.

Auswertung Baukosten Schlesierstraße, Ludwigshafen

In dem zweiten Projekt 'Schlesierstraße' konnten die Kosten der einzelnen Maßnahmen im Detail aus den Unterlagen der Bauherrin, der GAG in Ludwigshafen recherchiert werden, so dass sich ein sehr genaues Bild der Aufwendungen ergibt.



Abbildung 4: Ursprünglicher Zustand der Gebäude Schlesierstraße 2005 (links) und die Gebäude nach der Sanierung 2008 (rechts).

Insgesamt konnte auch dieses Projekt ökonomisch sehr gut abgeschlossen werden, eine Investitionssumme von deutlich weniger als 1072 EUR/m² (brutto) für eine vollständige Sanierung mit Passivhauskomponenten ist ein sehr gutes Ergebnis. Wenn man die durchgeführten Maßnahmen und deren Kosten jedoch im Detail betrachtet, fällt auf, dass einige spezielle Randbedingungen zu beachten waren, die einige Maßnahmen, wenn man sie einzelwirtschaftlich betrachtet, wirtschaftlich unattraktiv machen.

Die oberste Geschossdecke hatte schon eine 15 cm starke Wärmedämmung, so dass die zusätzlich eingebrachte Dämmung und der Aufwand für die Wärmebrückenreduktion am Dachrand, die für das Gesamtkonzept 'Passivhaus' notwendig wird und eigentlich sinnvoll sind, die schon geringen Wärmeverluste nur wenig weiter verringern, trotzdem aber auf Grund der hohen abermaligen Rüstkosten relativ teuer sind.

Die Dämmung am Perimeter rund um das Gebäude wurde ganz bis an die Sole des Kellers heruntergezogen. Die dafür notwendigen Erdarbeiten und die zusätzliche Fläche an erdberührter Außenwanddämmung sind aus bauphysikalischer Sicht sinnvoll, sie erhöhen die Kosten für die Maßnahme 'Wärmebrücke Kellerdecke' jedoch erheblich. Es soll im Folgenden gezeigt werden, wie diese Maßnahme möglicherweise hätten modifiziert werden können, um zu geringeren Kosten zu kommen.

Kostenanalyse im Vergleich: Schlesierstraße / Hoheloogstraße

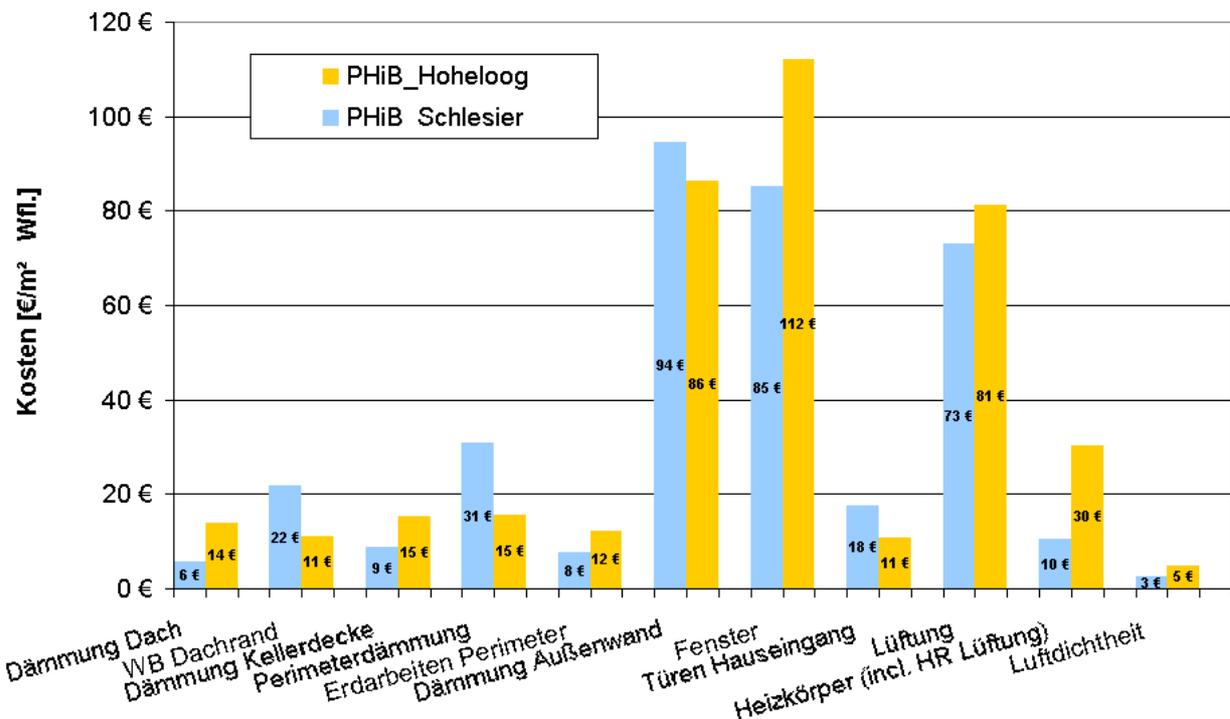


Abbildung 5: Baukosten Schlesierstraße für die energetisch relevanten Maßnahmen. Kosten wie abgerechnet im Vergleich zum Projekt Hoheloogstraße. Bei den Fenstern und der Lüftungsanlage ließen sich signifikante Kostenreduzierungen realisieren, siehe Text.

Vergleich der Baukosten Hoheloogstraße – Schlesierstraße

In Abbildung 5 sind die Kosten für das Projekt PHiB-Hoheloogstraße (PHiB-H) im direkten Vergleich zum Projekt PHiB-Schlesierstraße (PHiB-S) dargestellt. Die Dämmung für das Dach bzw. auf der obersten Geschossdecke konnte gegenüber der Hoheloogstraße noch einmal deutlich kostengünstiger realisiert werden. Die Wärmebrückenreduktion am Dachrand war andererseits deutlich teurer, weil das am Dachrand vorhandene Gesims nicht abgetrennt werden konnte; denn das vorhandene Schrägdach auf der obersten Geschossdecke (Beton) war noch weitgehend intakt und sollte erhalten bleiben. Die Sparren des Daches liegen jedoch auf dem Gesims auf.

Die Kellerdecke ist bei PHiB-S wieder günstiger, die Perimeterdämmung jedoch deutlich teurer als bei PHiB-H. Wie weiter unten ausgeführt, hätte die Perimeterdämmung nicht bis an die Unterkante des Kellerbodens heruntergezogen werden müssen. Damit wären auch die Erdarbeiten entfallen. Die höheren Kosten beim PHiB-S für die Außenwanddämmung dürften an der konjunkturbedingten allgemei-

nen Preissteigerung für WDV-Systeme bzw. Polystyrol-Dämmstoff während der Projekt-Ausschreibungs-Phase liegen.

alle Angaben brutto (incl. Ust 19%)		Kosten	Zahl WE	Wohnfläche	Bauteilfläche		
Kosten Schlesierstraße		€	€/WE	€/m² Wfl	[m²]	€/m² Bt.fl.	
Dämmung Dach		5 443 €	363 €	6 €	462	11,78 €	
WB Dachrand		21 525 €	1 435 €	22 €	462	46,59 €	
davon Ohnehinkosten (WB)	-83 €		-6 €	0 €	462	-0,18 €	Projektdaten
Altbautypische Kosten an der Maßnahme	21 803 €		1 454 €	22 €	462	47,19 €	Projektdaten
Dämmung Kellerdecke		23 576 €	1 572 €	24 €	332	71,01 €	
Perimeterdämmung		22 613 €	1 508 €	23 €	332	68,11 €	
Erdarbeiten Perimeter		7 649 €	510 €	8 €	332	23,04 €	
Ohnehinkosten (WB)	-18 075 €		-1 205 €	-18 €	332	-54,44 €	Projektdaten
Altbautypische Kosten an der Maßnahme	27 050 €		1 803 €	27 €	237	114,14 €	Projektdaten
Dämmung Außenwand		36 815 €	2 454 €	37 €	800	46,02 €	
Dämmung Dübel		11 880 €	792 €	12 €	800	14,85 €	
Dämmung Anschlüsse		29 900 €	1 993 €	30 €	800	37,38 €	
Außenputz		14 301 €	953 €	15 €	800	17,88 €	
Ohnehinkosten (Außenputz, Kanten, etc.)	-34 303 €		-2 287 €	-35 €	800	-42,88 €	Projektdaten
Altbautypische Kosten an der Maßnahme	11 880 €		792 €	12 €	800	14,85 €	Projektdaten
Fenster		83 931 €	5 595 €	85 €	202	415,50 €	
Türen Hauseingang		17 265 €	1 151 €	18 €	15	1 150,97 €	
Ohnehinkosten (Grundkosten)	-30 000 €		-2 000 €	-30 €	202	-148,51 €	Annahme (nur Ersatz)
Altbautypische Kosten an der Maßnahme	10 000 €		667 €	10 €	202	49,50 €	Annahme
Lüftung		71 853 €	4 790 €	73 €			
Lüftung Trockenbau		5 730 €	382 €	6 €			
Ohnehinkosten (Abluftanlage)	-30 000 €		-2 000 €	-30 €			Annahme
Altbautypische Kosten an der Maßnahme	6 944 €		463 €	7 €			Projektdaten
Heizkörper (incl. HR Lüftung)		10 317 €	688 €	10 €			
Ohnehinkosten	-40 000 €		-2 667 €	-41 €			aus Vergleich Hoheloog NEH
Luftdichtheit		2 596 €	173 €	3 €	1 798	1,44 €	
Altbautypische Kosten an der Maßnahme	2 000 €		133 €	2 €			
Gerüst		8 330 €	555 €	8 €	800	10,41 €	
Elektro-Installation		0 €	0 €	0 €			
Gesamtkosten der energetisch relevanten Maßnahmen		373 723 €	24 915 €	380 €			
der Rest (energetisch nicht relevant)		681 312 €	45 421 €	692 €			
Gesamte Sanierungskosten (abgerechnet, netto)		1 055 035 €	70 336 €	1 072 €			

Tabelle 2: Baukosten Schlesierstraße für die energetisch relevanten Maßnahmen. Kosten wie dokumentiert und abgerechnet. Die Ohnehinkosten für jede Maßnahme sind hier nur informativ genannt, für die Summe der Ohnehinkosten siehe Tabelle 3 und Abbildung 6.

Gesamtkosten der energetisch relevanten Maßnahmen	373 723 €	24 915 €	380 €			
Summe Ohnehinkosten	-152 461 €	-10 164 €	-155 €			
Kostenanteil an den Maßnahmen, die direkt der Energieeinsparung zugeordnet werden müssen	221 261 €	14 751 €	225 €	Maßnahmenkosten abzüglich Ohnehinkosten		

Tabelle 3: Summe Ohnehinkosten aus Tabelle 2. Zur Evaluierung der Wirtschaftlichkeit müssen von den dort genannten Baukosten der einzelnen Maßnahmen jeweils die genannten Ohnehinkosten abgezogen werden. Das Ergebnis sind die direkt der Energieeinsparung zuzuordnenden Kosten der gesamten Sanierung, siehe Abbildung 6.

Bei den Fenstern konnte eine deutliche Kostenreduzierung bei verbesserter Produktqualität erreicht werden. Hier konnten außerdem Rationalisierungseffekte aufgrund der planerischen Erfahrung aus dem Vorgängerprojekt kostensenkend wirksam ge-

macht werden. Die höhere Investition bei den Haustüren ist ein reiner Skaleneffekt: beim Gebäude Schlesierstraße gibt es drei Hauseingänge für 15 Wohnungen in der Hoheloogstraße zwei Hauseingänge für 12 Wohnungen. Bei der Lüftungsanlage konnten wiederum planerische Erfahrungen kostensenkend umgesetzt werden.

Kostenanalyse Schlesierstraße im Detail

Aus dem Projekt Schlesierstraße konnten im Rahmen des Projektes IEA Task37 Kostendaten in höherer Detaillierung ausgewertet werden. Daher war es möglich die verschiedenen Investitionskosten besser zuzuordnen. In Tabelle 2 konnten deshalb neben den tatsächlichen Baukosten die sogenannten 'Ohnehinkosten' für jede Maßnahme ausgewiesen werden. In Abbildung 6 sind in der jeweils ersten Säule einer Gruppe aus drei Säulen neben der Kostenaufschlüsselung nach Komponenten (analog zu Abbildung 3) die Ohnehinkosten aufgetragen. Für die Lebenszykluskostenanalyse bzw. den Vergleich der Investitionskosten mit den eingesparten Energieverbrauskosten müssen die Ohnehinkosten wie in Abbildung 6 angedeutet von den gesamten Baukosten einer Maßnahme abgezogen werden. In Tabelle 3 wurde die Summe der Ohnehinkosten von den gesamten Maßnahmenkosten abgezogen. Das Ergebnis sind die direkt der Energieeinsparung zuzuordnenden Kosten der gesamten Sanierung, die in Summe auch in Abbildung 6 rechts. Siehe dazu die Ausführungen im nächsten Abschnitt auf Seite 22.

Bei der Kellerdecke sind es die Kosten für die ohnehin notwendige Sanierung des Fußbodenaufbaus über der Kellerdecke. Bei der Außenwanddämmung sind dies die Kosten für den Außenputz und dessen Anschlüsse an angrenzende Bauteile.

Bei den Fenstern wurden als Ohnehinkosten der Ersatz der alten Fenster durch ein in der Funktion gleichwertiges neues Fenster angesetzt: Kunststoff-Fenster mit Zweifach-Verglasung, Kostenansatz 150 €/m² Fensterfläche. Insofern ist dieses Referenzfenster rein fiktiv. Diese Annahme hat jedoch die Konsequenz, dass sowohl für das PHiB als auch für ein NEH im Vergleich Basiskosten für die Fenster als Ohnehinkosten für den reinen Ersatz des Fensters ohne eine Energieeinsparung angesetzt werden können. Erst die darüber hinaus anfallenden Zusatzkosten für das PH-Fenster bzw. die Fenster für das NEH müssen mit der jeweiligen Energieeinsparung verglichen werden. Denn, wie der Vergleich im folgenden Abschnitt zeigen wird: auch ein Fenster nach der EnEV kann nicht komplett aus der Energieeinsparung alleine refinanziert werden. Wird jedoch über den ohnehin erforderlichen Ersatz hinaus nur die zusätzliche Qualität: 'besserer U-Wert' zugeordnet, dann ergibt sich ein korrektes Bild.

Bei der Lüftungsanlage mit WRG ergeben sich die Ohnehinkosten aus den Investitionskosten für eine reine Abluftanlage. Eine solche Abluftanlage bzw. vergleichbare Maßnahmen, die einen hygienisch notwendigen Luftwechsel dauernd gewährleisten,

unterscheidet sich jedoch grundlegend von den einfachen Badezimmer-Lüftern, die im Projekt Hohelooogstraße (NEH) eingebaut wurden (14 €/m² Wfl.) und die nur während und kurz nach der Benutzung des Badezimmers laufen. Nach der gültigen E-nEV ist für Neubau und Sanierung ein Lüftungskonzept zu erstellen und zu realisieren, welches einen hygienisch notwendigen Luftwechsel dauernd gewährleisten kann. Die Kosten für eine entsprechende Abluftanlage im NEH (Außenluftdurchlässe, Abluft-Kanalsystem, hochwertiger Lüfter, ggf. Schalldämpfer, Fortluftdurchführung) wurden mit 2000 €/WE bzw. 30 €/m² angesetzt.

Bei den Heizkörpern wurden die geringere Anzahl im PHiB bzw. die höhere Zahl im NEH und mithin die Kosten als Vergleich angesetzt, wie sie aus dem Projekt Hohelooogstraße bekannt sind. In der Summe der Kosten für die Heizkörper ist das hydraulische Zuluft-Heizregister der Lüftungsanlage mit enthalten.

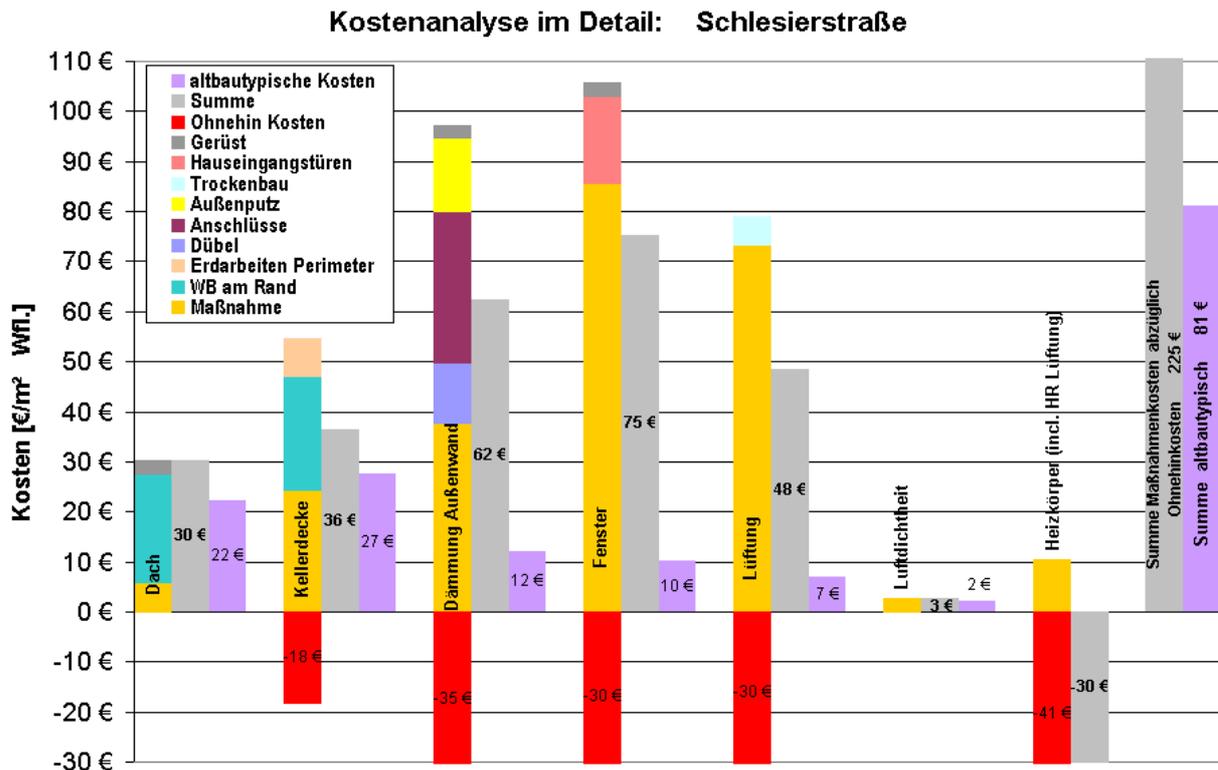


Abbildung 6: Baukosten Schlesierstraße im Detail, vgl. Tabelle 2 und Tabelle 3.

Erste Säule: Kosten wie abgerechnet, teilweise aufgeschlüsselt
Negative rote Beiträge: Ohnehinkosten, z.B. Außenputz
Zweite Säule (hellgrau): abgerechnete Kosten abzüglich Ohnehinkosten.
Dritte Säule: Anteil der altbautypischen Kosten, z.B. Wärmebrücken-Reduktion.

Die tatsächlich für die Energieeinsparung der jeweiligen Maßnahme anzurechnenden Kosten sind in der zweiten Säule (hellgrau) der jeweiligen Gruppe ausgewiesen. In

Summe sind das für die Altbausanierung noch 225 €/m² Wfl. gegenüber 380 €/m² Gesamtkosten aller Maßnahmen, Tabelle 3.

In der dritten Säule in Abbildung 6 (violett) ist der Anteil an den Baukosten ausgewiesen bzw. abgeschätzt worden, der nur bei einer Altbausanierung anfällt. Diese Zahlen sind rein zur Information und werden im Folgenden für die Gesamtkostenanalyse auch nur als Zusatzinformation verwendet. Mit dieser Information lässt sich jedoch die Systematik auch einfach für die ökonomische Analyse bei einem Neubau anwenden.

Altbautypische Kosten sind die Wärmebrücken-Reduktion am Dachrand und am Perimeter sowie die zusätzliche Verdübelung der Blöcke des WDV-Systems. Bei den Fenstern sind das Kosten für die Modifikation der Fensterlaibung, d.h. ggf. das Abschlagen eines vorhandenen Anschlags. Bei der Lüftungsanlage sind es die Herstellung von Mauerdurchbrüchen bzw. Kernbohrungen für die Außenluft- und Fortluftdurchlässe. Diese Öffnungen können im Neubau wesentlich kostengünstiger realisiert werden.

Kostenanalyse Schlesierstraße im Detail: Kostenoptimierung

Die bisher genannten Zahlen entsprechen den tatsächlich abgerechneten Kosten, die sich aus der Durchsicht der Unterlagen beim Bauherrn ergeben haben. Aus Gesprächen mit Mitgliedern des Bauteams ergaben sich jedoch nach Abschluss des Projektes verschiedene Ansätze für eine zukünftig mögliche weitere Kostenoptimierung, die im folgenden kurz referiert werden sollen, siehe auch Tabelle 4.

alle Angaben brutto (incl. Ust 19%)			Zahl WE	Wohnfläche	Bauteilfläche		
Kosten Schlesierstraße		Kosten	15	984 m²			
		€	€/WE	€/m² Wfl	[m²]	€/m² Bt.fl.	
Dämmung Dach		5 443 €	363 €	6 €	462	11,78 €	
WB Dachrand		10 733 €	716 €	11 €	462	23,23 €	Annahme
davon Ohnehinkosten (WB)	-83 €		-6 €	0 €	462	-0,18 €	Projektdaten
Altbautypische Kosten an der Maßnahme	10 000 €		667 €	10 €	462	21,65 €	Annahme
Dämmung Kellerdecke		23 576 €	1 572 €	24 €	332	71,01 €	
Perimeterdämmung		11 900 €	793 €	12 €	332	36,84 €	Fläche verringert
Erdarbeiten Perimeter		0 €	0 €	0 €	332	0,00 €	kann ganz entfallen
Ohnehinkosten (WB)	-18 075 €		-1 205 €	-18 €	332	-54,44 €	Projektdaten
Altbautypische Kosten an der Maßnahme	10 000 €		667 €	10 €	237	42,19 €	ohne Erdarbeiten ohne Dübel
Dämmung Außenwand		36 815 €	2 454 €	37 €	800	46,02 €	
Dämmung Dübel		0 €	0 €	0 €	800	0,00 €	ohne Dübel
Dämmung Anschlüsse		29 900 €	1 993 €	30 €	800	37,38 €	
Außenputz		14 301 €	953 €	15 €	800	17,88 €	
Ohnehinkosten (Außenputz, Kanten, etc.)	-34 303 €		-2 287 €	-35 €	800	-42,88 €	Projektdaten
Altbautypische Kosten an der Maßnahme	0 €		0 €	0 €	800	0,00 €	Projektdaten
Fenster		77 350 €	5 157 €	79 €	202	382,92 €	Annahme
Türen Hauseingang		17 265 €	1 151 €	18 €	15	1 150,97 €	
Ohnehinkosten (Grundkosten)	-30 000 €		-2 000 €	-30 €	202	-148,51 €	Annahme (nur Ersatz)
Altbautypische Kosten an der Maßnahme	5 000 €		333 €	5 €	202	24,75 €	Annahme
Lüftung		71 853 €	4 790 €	73 €			
Lüftung Trockenbau		5 730 €	382 €	6 €			
Ohnehinkosten (Abluftanlage)	-30 000 €		-2 000 €	-30 €			Annahme
Altbautypische Kosten an der Maßnahme	6 944 €		463 €	7 €			Projektdaten
Heizkörper (incl. HR Lüftung)		10 317 €	688 €	10 €			
Ohnehinkosten	-40 000 €		-2 667 €	-41 €			aus Vergleich Hoheloog NEH
Luftdichtheit		2 596 €	173 €	3 €	462	5,62 €	
Altbautypische Kosten an der Maßnahme	2 000 €		133 €	2 €			
Gerüst		8 330 €	555 €	8 €	800	10,41 €	
Elektro-Installation		0 €	0 €	0 €			
Gesamtkosten der energetisch relevanten Maßnahmen (optimiert)		326 107 €	21 740 €	331 €			
der Rest (energetisch nicht relevant)		681 312 €	45 421 €	692 €			
Gesamte Sanierungskosten (abgerechnet, netto)		1 007 420 €	67 161 €	1 024 €			

Tabelle 4: Kostenoptimierungspotentiale für die Baukosten Schlesierstraße unter der Annahme, dass die entsprechenden Details vereinfacht werden. Die 'Rest'kosten wurden als unverändert angenommen, so dass die gesamten Sanierungskosten entsprechend geringer ausfallen.

Gesamtkosten der energetisch relevanten Maßnahmen (optimiert)	326 107 €	21 740 €	331 €		
Summe Ohnehinkosten	-152 461 €	-10 164 €	-155 €		
Kostenanteil an den Maßnahmen, die direkt der Energieeinsparung zugeordnet werden müssen	173 646 €	11 576 €	176 €	Maßnahmenkosten abzüglich Ohnehinkosten	

Tabelle 5: Summe Ohnehinkosten. Die abziehenden Ohnehinkosten aus Tabelle 4 sind hier dieselben wie in Tabelle 3. Das Ergebnis ist jedoch entsprechend der Kostenoptimierung der einzelnen Maßnahmen auch in Summe geringer, siehe Abbildung 8.

Diese Überlegungen führen zu einem standardisierten Sanierungsprojekt mit einem Paket von kostenoptimierten Sanierungsmaßnahmen, das prinzipiell auf jedes Bestandsgebäude angewandt werden könnte. Andererseits ist auch klar, dass jede Altbausanierung sich mit den spezifischen Gegebenheiten des jeweiligen bestehenden Gebäudes auseinandersetzen muss, seien dies besondere architektonische oder auch nur bautechnische bzw. geometrische 'Komplikationen'. Betrachtet man jedoch den Gebäudebestand in Deutschland [Ebel/Eicke/Feist/Groscurth 2000] so erkennt man schnell, dass ein sehr großer Anteil an 'Typengebäuden' aus der Nachkriegszeit mit einem kostenoptimierten Standardpaket an Maßnahmen, wie sie hier vorgeschlagen werden, sehr wohl adäquat saniert werden könnten. Auf diese Weise können die vorgenannten Altbautypischen Kosten deutlich weiter reduziert werden, ohne dass die Qualität der Sanierung insgesamt darunter leidet.

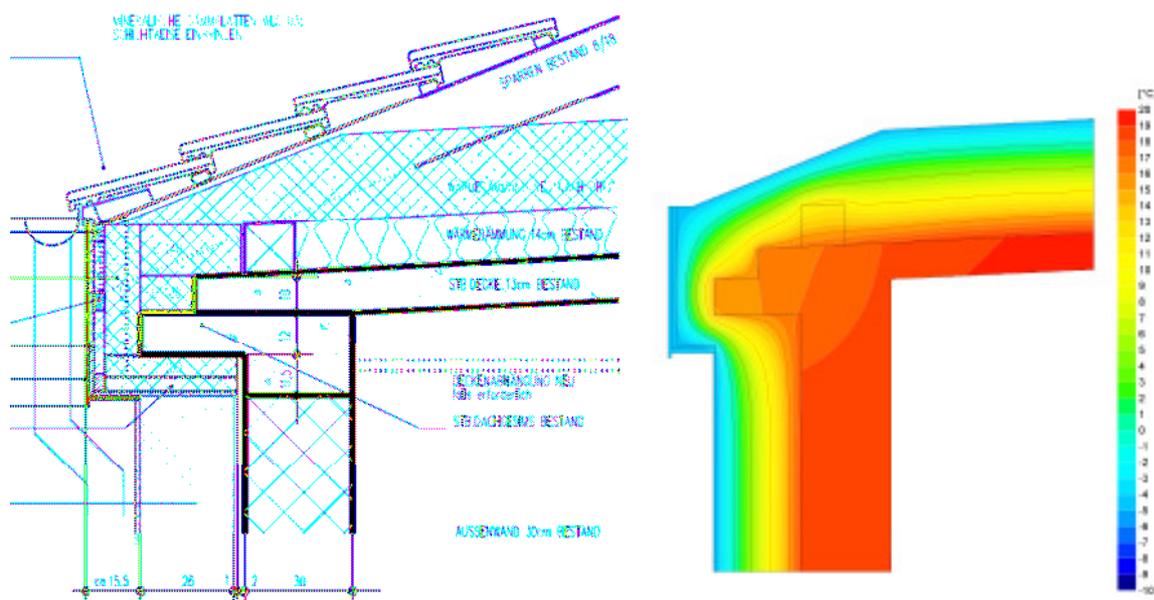


Abbildung 7: Wärmebrückenreduktion am Dachrand beim Gebäude Schlesierstraße. Links: Das Gesims konnte nicht entfernt werden und musste deshalb mit Wärmedämmung eingepackt werden. Rechts: zweidimensionale Wärmeströmberechnung zur Bestimmung der minimal zu erwartenden Oberflächentemperaturen an den Innenoberflächen.

Als erstes müssen für eine Kostenreduktion beim Projekt Schlesierstraße die Wärmebrückenreduktion am Dachrand genannt werden. Hier wurde wegen der spezifischen weiter oben beschriebenen Gegebenheiten ein besonders hoher Aufwand betrieben. Nimmt man an, dass dieses Gesims am Dachrand (Abbildung 8) bei einer Vielzahl von Gebäuden nicht vorhanden ist, kommt man zu dem Kostenansatz in Tabelle 4.

Am Perimeter kann man die Dämmung unterhalb der Geländeoberkante bis hinunter zum Kellerboden entbehren, Abbildung 9. Bei beiden Projekten wurde dies so realisiert in der Absicht, für diese Altbausanierung unbedingt das Passivhausniveau zu

erreichen (Heizwärmebedarf $\leq 15 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$). Nach allgemein akzeptierter Auffassung ist das aber für Gebäude im Bestand nicht unbedingt in jedem Fall zu erzwingen und nicht um jeden Preis sinnvoll. Außerdem war die Dämmstärke auf und unter der Kellerdecke wegen der begrenzten Geschosshöhen sehr eingeschränkt.

Endet die Wärmedämmung schon knapp über der Geländeoberkante, Abbildung 9 rechts, so sind die erzielbaren Energieeinsparungen nur unwesentlich kleiner, die Kosten lassen sich jedoch deutlich reduzieren. Insbesondere entfallen für die vereinfachte Wärmebrückenreduktion am Perimeter die Erdarbeiten für das abgraben bis zur Gebäudesole und die Kosten für etwa 1 m^2 gedämmte Außenwand pro Laufmeter Perimeter. Damit reduzieren sich diese Kosten von $(68 + 23) \text{ €/m}^2$ bezogen auf die Fläche der Kellerdecke auf etwa $(36 + 0) \text{ €/m}^2$ Kellerdecke. Die entsprechenden Zahlen mit Bezug auf die gesamte Wohnfläche des Gebäudes finden sich in, Tabelle 2 bzw. Tabelle 4.

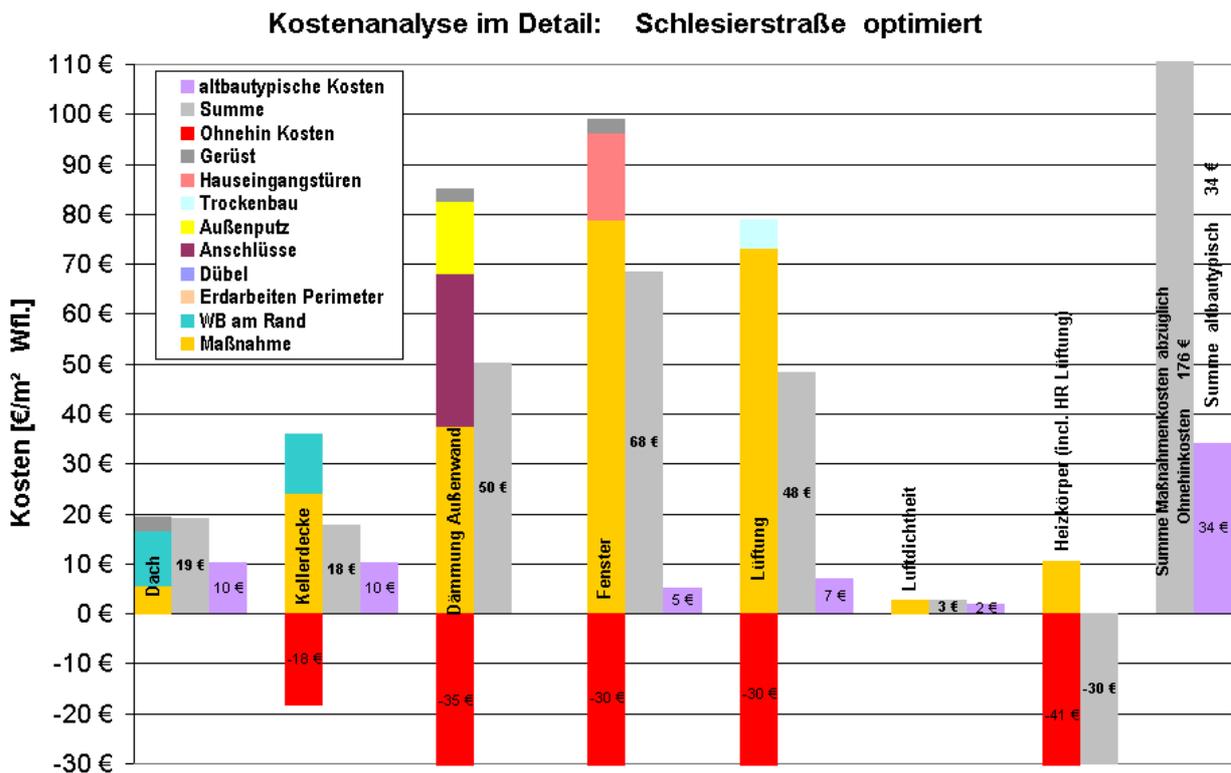


Abbildung 8: Sanierungskosten Schlesierstraße für die Energetisch relevanten Maßnahmen. Annahmen für eine kostenoptimierte Altbausanierung.
Erste Säule: Kosten teilweise aufgeschlüsselt, siehe Legende und Tabelle 4, negative rote Beiträge: Ohnehinkosten, z.B. Außenputz
Zweite Säule: abgerechnete Kosten abzüglich Ohnehinkosten.
Dritte Säule: Anteil der altbautypischen Kosten, z.B. WB-Reduktion.

Fazit: die Wärmebrückenreduktion am Dachrand und Perimeter kosten jetzt immer noch nicht 'nichts', diese Kosten sind aber mehr als halbiert gegenüber der im Projekt realisierten Variante. Damit sinken die altbautypischen Kosten für diese beiden Maßnahmen auf jeweils etwa 10 €/m² Wfl., (Abbildung 8) gegenüber 22 bzw. 27 €/m² Wfl. (Abbildung 6).



Abbildung 9: Wärmebrückenreduktion am Perimeter. Links: realisierte Situation bei den Gebäuden Hoheloog und Schlesierstraße mit der Dämmung am Perimeter bis hinunter zur Gebäudesole. Rechts: Vereinfachte Ausführung am Gebäude Tevesstraße. Perimeterdämmung endet knapp über der Geländeoberkante [Kaufmann/Peper/Pfluger/Feist 2009]. Damit lassen sich die Kosten erheblich reduzieren.

Ökonomische Bilanz der Kosten der Energiesparmaßnahmen

Auf der Basis der vorgenannten Baukosten für die energetisch relevanten Maßnahmen kann nun eine Analyse der Kostenbilanz gemacht werden. Dazu muss allerdings geklärt werden, welcher Anteil der zuvor ermittelten Baukosten der einzelnen Maßnahmen direkt der Energieeinsparung der jeweiligen Maßnahme zugeordnet werden muss. Der Barwert dieser 'bedingten' Investitionskosten jeder Maßnahme wird verglichen mit dem Barwert der eingesparten Energiekosten über einen Zeitraum von 20 Jahren (Betrachtungszeitraum) [Kah/Feist 2008].

Barwert – Restwert – Kopplungsprinzip – Ohneinkosten

Als erstes muss der **Restwert** den die jeweilige Maßnahme nach 20 Jahren noch hat, vom Barwert noch abgezogen werden, um direkt vergleichbare Zahlen zu erhalten. Dazu muss die Lebensdauer der einzelnen Komponenten (Annahmen: 50 Jahre für Wärmedämmung, 30 Jahre für Fenster und Haustechnik, Tabelle 6) bekannt sein. Die in den folgenden Abbildungen (Abbildung 11, Abbildung 14, Abbildung 17) genannten Werte für die **Barwerte der Maßnahmen sind daher deutlich geringer als die oben aufgeführten Baukosten**. Aufgrund der unterschiedlichen Lebensdauern der verschiedenen Komponenten (Tabelle 6) sind die Restwertabzüge nicht für alle Komponenten gleich.

Zinssatz	3.0 %	Realzins (Zins inflationsbereinigt)
Betrachtungszeitraum	20 a	mit konstantem Zinssatz
Lebensdauer der Komponenten	30 a	Haustechnik: Lüftung mit WRG, Heizkörper (Mittelwert)
"	30 a	Fenster
"	50 a	Wärmedämmung in Wand, Dach und Kellerdecke
Restwert nach 20 Jahren a	23.3 %	(bei 30 Jahren Lebensdauer)
Restwert nach 20 Jahren a	42.2%	(bei 50 Jahren Lebensdauer)
Preis für Endenergie	0.070 €/kWh	brutto, Öl und Gas, nicht Elektrizität
Gesamtkosten für Heizwärme	0.084 €/kWh	enthält die Aufwandszahl zur Bereitstellung der Heizwärme, und Kosten für elektrische Hilfsenergie der Heizung. Stromkosten der Lüftung werden separat bilanziert, s. Tabelle 7 u.a.
Preis für Elektrizität	0.220 €/kWh	Endenergie
Heizgradstunden	74 kWh/a	Klimaregion Mannheim und Standardklima Deutschland

Tabelle 6: Grundlegende Annahmen für die dynamische Kapitalwertberechnung.

Die angenommene Lebensdauer der Komponenten ist länger als der Betrachtungszeitraum, daher muss am Ende des Kalkulationszeitraums der Restwert als Einnahme berücksichtigt werden, siehe Text und [Kah/Feist 2008]

Außerdem werden gemäß dem **Kopplungsprinzip** nur solche Kosten hier bilanziert, welche direkt der Energieeinsparung der jeweiligen Maßnahme zuzurechnen sind,

z.B. nur der Dämmstoff und der Kleber eines WDVS, nicht jedoch der ohnehin erforderliche neue Außenputz. Denn es wird davon ausgegangen, dass der Außenputz zum Zeitpunkt der Sanierung ohnehin hätte erneuert werden müssen. Daher die Bezeichnung **'Ohnehinkosten'** [Kah/Feist 2008]. Eine Auflistung der weiteren zugrundegelegten Annahmen findet sich in Tabelle 6. Siehe auch die Erläuterungen zu Tabelle 2 und Tabelle 4, in denen die Ohnehinkosten und Maßnahmenbezogenen Kosten explizit genannt sind. Diese direkt der jeweiligen Maßnahme zuzurechnenden Kosten sind in Abbildung 6 und Abbildung 8 als hellgraue Säulen dargestellt.

Kostenberechnung im Detail

Für die Bilanzierung der Kosten wurde eine Tabellenkalkulation aufgebaut, mit welcher sich die verschiedenen Varianten und deren einzelne Maßnahmen übersichtlich organisieren lassen. Es lassen sich damit die Baukosten jeder Maßnahme, die jeweils damit verbundene und die Energieeinsparung und die daraus resultierenden Energiekosteneinsparungen miteinander vergleichen.

Die Energiebilanz wird dabei für jede Varianten und jede Maßnahme im PHPP berechnet. Das Ergebnis ist der spezifische Heizwärmebedarf des gesamten Gebäudes, der mit jeder zusätzlichen Maßnahme sukzessive immer geringer wird, wie in Abbildung 10 dargestellt. Die Differenz des Heizwärmebedarfs (HWB) mit und ohne Maßnahme, d.h. die Differenz zweier aufeinanderfolgender HWB-Werte in Abbildung 10 ergibt dann direkt die Energieeinsparung dieser Maßnahme für das gesamte Gebäude, sie ist in den Abbildungen als dunkelroter Stapelbalken dargestellt.

Die Kosten werden nun wie vorher beschrieben für alle Maßnahmen im einzelnen berechnet, d.h. es werden die eingesparten Energiekosten und die auf die jeweilige Maßnahme anzurechnenden Baukosten berechnet und dann wie in Abbildung 11 dargestellt. Die Tabellenkalkulation wurde so aufgebaut, dass bis zu sieben Maßnahmen für jedes Gebäude bzw. Sanierungsvariante im einzelnen berechnet und deren verschiedene Kostenarten übersichtlich dargestellt werden können. Die jährlich anfallenden Energiekosten werden diskontiert und der Barwert für den Betrachtungszeitraum von 20 Jahren gebildet. Für Maßnahmen, die länger als 20 Jahre halten, wird der Restwert nach 20 Jahren berechnet. Von den abgerechneten Investitionskosten der Maßnahmen werden Ohnehinkosten und der Restwert abgezogen. Nur die verbleibenden direkt der Energiesparmaßnahme zuzurechnenden Kosten abzüglich Restwert werden in Abbildung 11 ff dann dargestellt.

Schlesierstraße wie saniert

In Abbildung 10 ist die Energiebilanz bzw. der Heizwärmebedarf des Gebäudes ausgehend vom Originalzustand 'Altbau' dargestellt. Die Auswirkungen der einzelnen Maßnahmen auf den Heizwärmebedarf des Gebäudes sind in aufeinanderfolgenden Säule dargestellt (blau, unten), nachdem jeweils die genannte Maßnahme (zusätzlich) realisiert ist. Darüber (rot) ist die Einsparung der jeweiligen Maßnahme gegenüber dem Zustand ohne diese Maßnahme dargestellt. Links der Originalzustand (Altbau), ganz rechts der sanierte Endzustand, darüber die kumulierte Einsparung aller Maßnahmen.

Nachrüstung der schon vorhandenen Dämmlage der obersten Geschossdecke

Bei der Maßnahme 'Dämmung Dach + Wärmebrückenreduktion Traufe' fällt auf, dass die Einsparung an Heizwärme vergleichsweise gering ausfällt. Dies resultiert aus der Tatsache, dass das Gebäude vor der aktuellen Sanierung schon eine Lage Wärmedämmung auf der obersten Geschossdecke mit einer Stärke von 140 mm hatte. Die zusätzlich aufgebrachte Dämmlage mit 240 mm Stärke (Endzustand 380 mm) war zwar sehr kostengünstig, weil nur der Dämmstoff und darüber Verlegeplatten finanziert werden mussten. Die zusätzlich realisierte Dämmwirkung und damit die für den ökonomischen Vergleich anzusetzende Energieeinsparung ist jedoch auch deutlich geringer als bei einem ungedämmten Ausgangszustand, denn der U-Wert vermindert sich nicht linear mit der Dämmstärke.

Dieser Effekt ist seit langem bekannt und führt in der Konsequenz zu folgender Empfehlung: Wird eine Wärmedämm-Maßnahme durchgeführt, so ist **dringend** darauf zu achten, dass nicht an der falschen Stelle gespart wird. Wärmedämmungen mit einem U-Wert von etwa $0.3 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ und damit Dämmstärken von etwa 140 mm, wie sie auch nach der aktuellen EnEV 2009 noch zulässig sind, sind bei den derzeitigen Energiepreisen als suboptimal einzustufen. Schlimmer noch: Ein derartiger Ausgangszustand ist für eine spätere Nachrüstung wie im vorliegenden Fall 'zu gut', so dass die spätere Maßnahme 'Nachrüstung' auf eigentlich insgesamt technisch und energetisch sinnvolle Dämmstärken mit U-Werten von 0.1 bis $0.15 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ wegen der abermals anfallenden Rüstkosten wirtschaftlich unattraktiv wird. In [Kah/Feist 2008] wurde im Detail herausgearbeitet welche Qualität (U-Wert) ein Bauteil haben darf, so dass eine Nachrüstung noch wirtschaftlich realisiert werden kann.

Fazit: Maßnahmen zum Wärmeschutz sollten heute auf jeden Fall mit U-Werten bzw. Qualitäten realisiert werden, wie sie beim Passivhaus heute üblich sind. Halbherzig durchgeführte Maßnahmen mit nur mittelmäßigen U-Werten sind als suboptimal zu bezeichnen. Denn die lange Lebensdauer ($\gg 30$ Jahre) dieser Maßnahmen verbietet eine Nachrüstung aus rein ökonomischen Gründen, auch wenn dann ein U-Wert

von 0.1...0.15 W/(m²K) mit einer in einem Schritt durchgeführten Maßnahme regelmäßig wirtschaftlich erreichbar wäre. [Kah/Feist 2008]

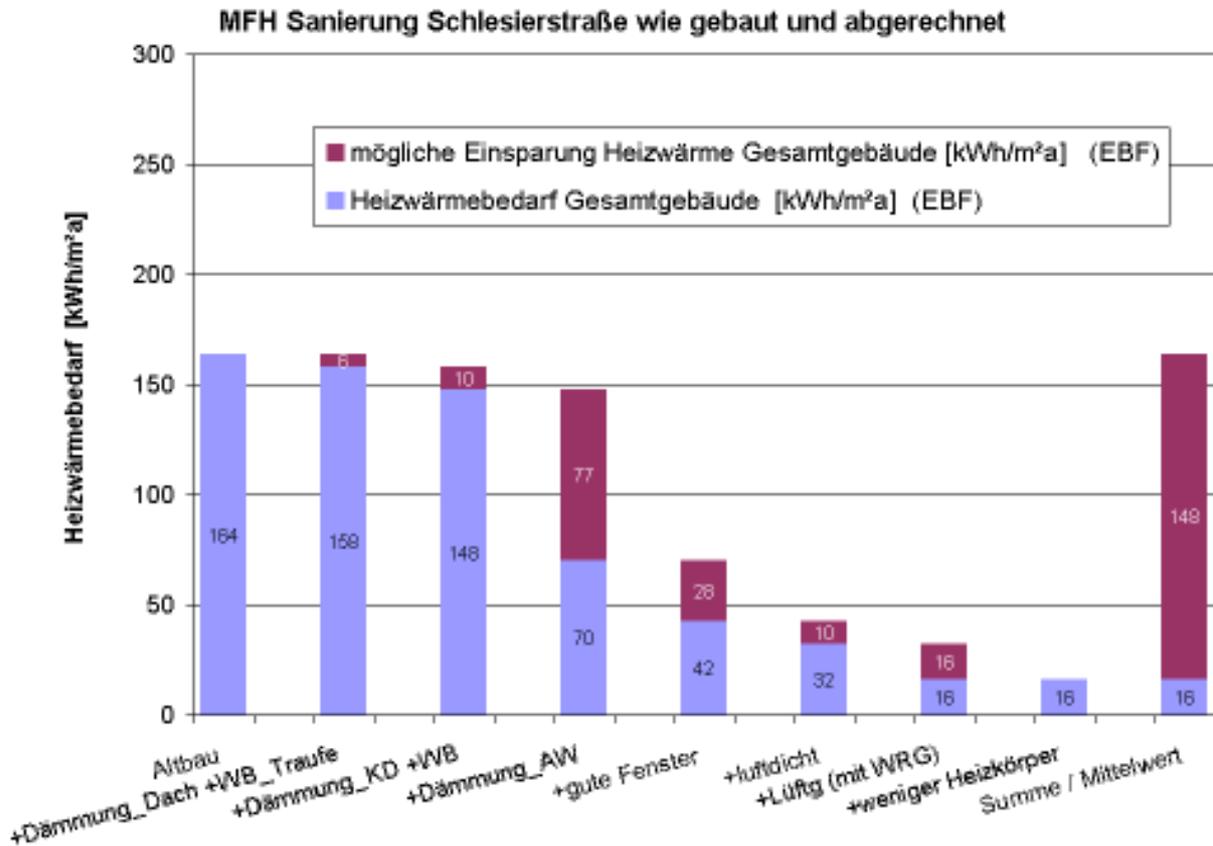


Abbildung 10: Sanierung Schlesierstraße wie durchgeführt. Energetische Auswirkungen der einzelnen Maßnahmen. In jeder Säule sind der Heizwärmebedarf des Gebäudes dargestellt (unten), nachdem jeweils die genannte Maßnahme (zusätzlich) realisiert ist. Darüber (rot) die Einsparung der Maßnahme gegenüber dem Zustand ohne diese. Links der Originalzustand (Altbau), ganz rechts der sanierte Endzustand, darüber die kumulierte Einsparung.

In Abbildung 11 sind die ökonomischen Bilanzen bzw. die Kosten für Investition (Barwert abzüglich der Ohnehinkosten und abzüglich Restwert nach 20 Jahren) und die eingesparten Energiekosten (dunkelrot, Barwert über 20 Jahre) im Vergleich dargestellt. Alle Angaben brutto in €/m² Wfl. Die Investitionskosten sind hier, wie oben schon erläutert, untergliedert in typische Baukosten (blau), die für die jeweilige Maßnahme auch bei einem Neubau anfallen würden (Dämmstoff oder das Lüftungsgerät) und in altbautypische Kosten (orange), die bei dieser Altbausanierung den Gegebenheiten des Bestandsgebäudes geschuldet waren.

Die Differenz aus Baukosten und den eingesparten Energiekosten (hellgrauer Stapelbalken) verbleibt als netto Einsparung oder 'Gewinn', wenn die Einsparung größer ist als die Baukosten.

Man erkennt, dass für die Wärmedämmung der Kellerdecke und der obersten Geschossdecke die Bilanz deutlich negativ ist, weil neben dem oben beschriebenen Effekt des 'zu guten' Ausgangszustandes die Kosten der Wärmebrückenreduktion am Dachrand und Perimeter hier stark beitragen. Die Fenster werden dagegen fast für sich alleine gegenfinanziert. Die Mehrkosten für die Lüftung mit Wärmerückgewinnung wird fast gegenfinanziert von den Einsparungen, welche die geringere Anzahl an Heizkörpern bringt.

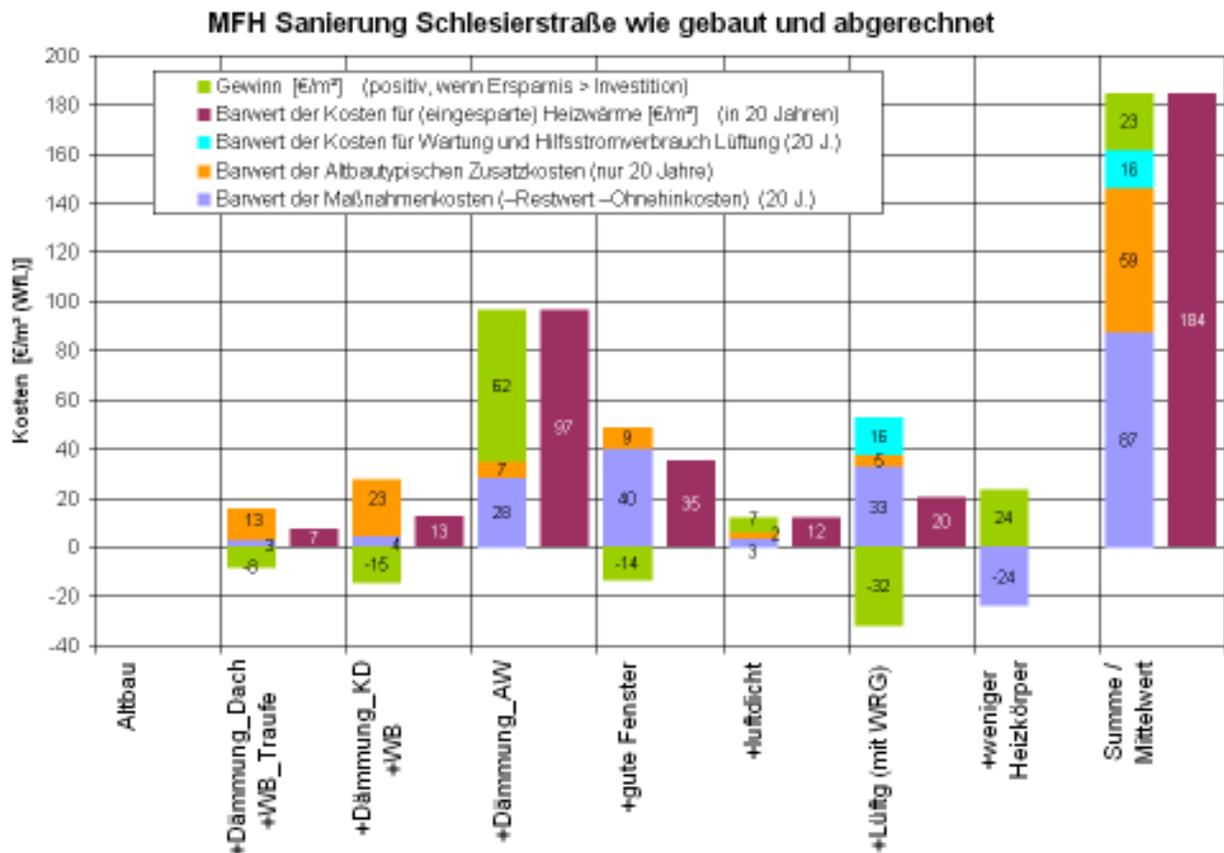


Abbildung 11: Sanierung Schlesierstraße wie durchgeführt und abgerechnet. Ökonomische Auswirkungen der einzelnen Maßnahmen. Dargestellt sind jeweils links in der Doppelsäule der Barwert der Kosten abzüglich Restwert nach 20 Jahren der einzelnen Maßnahmen (blau). Darüber (orange) sind die altbautypischen Zusatzkosten separat aufgeschlüsselt. Rechts die Kosten für die in 20 Jahren erzielbare Energieeinsparung (rot). Die Differenz (grau) zwischen Energiekosteneinsparung und Barwert der Investition ergibt für die Summe der Maßnahmen einen Gewinn, d.h. die Gesamtkosten nach der Sanierung sind geringer als für den unsanierten Altbau. Alle Angaben brutto (incl. MWSt) in €/m² Wohnfläche.

Bei der Lüftungsanlage wurden neben den Investitionskosten auch noch die Kosten für Hilfsstrombedarf und Wartung berücksichtigt. Das sind etwa 2 kWh/m²a zu 0.22 €/kWh, Tabelle 7. Das führt zu einem Barwert (20 Jahre) für den Stromverbrauch von

etwa 6.6 €/m². Für die Wartung (Filterwechsel) wurden etwa 40 €/a pro Wohnung angenommen, das führt zu einem Barwert für die Wartung von etwa 9.1 €/m². Zusammen sind das etwa 16 €/m² über 20 Jahre, die zusätzlich als Ausgaben für die Lüftungsanlage angesetzt werden müssen [Kah/Feist 2008].

Die Außenwanddämmung kostet viel weniger als was die durch sie erzielte Energiekosteneinsparung. Damit finanziert sie im Wesentlichen die anderen Maßnahmen, welche aus den erwähnten Gründen einzeln betrachtet nicht wirtschaftlich sein könnten – diese sind aber für das Gesamtergebnis wichtig. Ganz rechts sind die Summe der Baukosten und die Summe der eingesparten Energiekosten für alle Maßnahmen der Sanierung noch einmal zusammengefasst. Es verbleibt netto eine Einsparung an Kosten gegenüber dem Originalzustand des Gebäudes. Das heisst obwohl einzelne der Maßnahmen noch ökonomisch optimiert werden können, führt die hier dokumentierte gesamte Sanierung einzelwirtschaftlich – ohne finanzielle Berücksichtigung der verringerten Umwelteinwirkungen oder der Komforterhöhung der Bewohner – zu einem Gewinn.

Lüftung	Zu- und Abluftanlage mit WRG
Wärmebereitstellungsgrad	84 %
Stromeffizienz	0.44 kWh/m ³
resultierender Hilfsstrombedarf Lüftung (PHPP)	2 kWh/m ² a Endenergie elektrisch
Luftdichtheit	n ₅₀ = 0.5 /h
U _{Dach} (oberste Geschossdecke)	0.09 W/(m ² K)
U _{Wand}	0.11 W/(m ² K)
U _{Kelledecke}	0.28 W/(m ² K)
U _{Fenster} (Mittelwert)	0.85 W/(m ² K)

Tabelle 7: Die wichtigsten Bauteilkennwerte für die Sanierung Hoheloog- / Schlesierstraße als PHiB ('wie gebaut'):

In Abbildung 12 wurde für alle der oben geschilderten Maßnahmen ein Preis für die eingesparte kWh Endenergie ausgerechnet. Teilt man die in Abbildung 11 dargestellten Barwerte durch die in 20 Jahren eingesparte Energie, oder die Annuitäten der Baukosten durch die jährlich eingesparten Energiemengen so ergibt sich für jede Maßnahme ein Preis für die eingesparte Energie in €/kWh.

Diese Darstellung liefert eine sinnvolle Zusatzinformation, weil damit ein sehr transparenter Vergleich zwischen den Kosten für eine einzukaufende und damit später verbrauchte kWh Energie und den Investitionen für die Energieeinsparung möglich wird. D.h. wenn z.B. der Energiepreis für Erdgas oder Erdöl derzeit (2010) bei etwa 0.07 €/kWh liegt oder später z.B. bei 0.09 €/kWh, dann kann man sofort erkennen, dass jede Maßnahme, deren Einsparkosten kleiner als dieser Wert sind, bereits für

sich genommen wirtschaftlich ist, weil sie Energie kostengünstiger einspart, als die alternativ eingekaufte (fossile oder erneuerbare) Energie wäre. Die kostengünstigste Einzelmaßnahme ist die Wärmedämmung der Außenwand mit einem Preis von 0,026 €/kWh. Der Preis für die Summe aller durchgeführten Maßnahmen (0,058 €/kWh) zeigt, dass die gesamte Sanierung mit allen energetischen Maßnahmen wirtschaftlich erfolgreich ist.

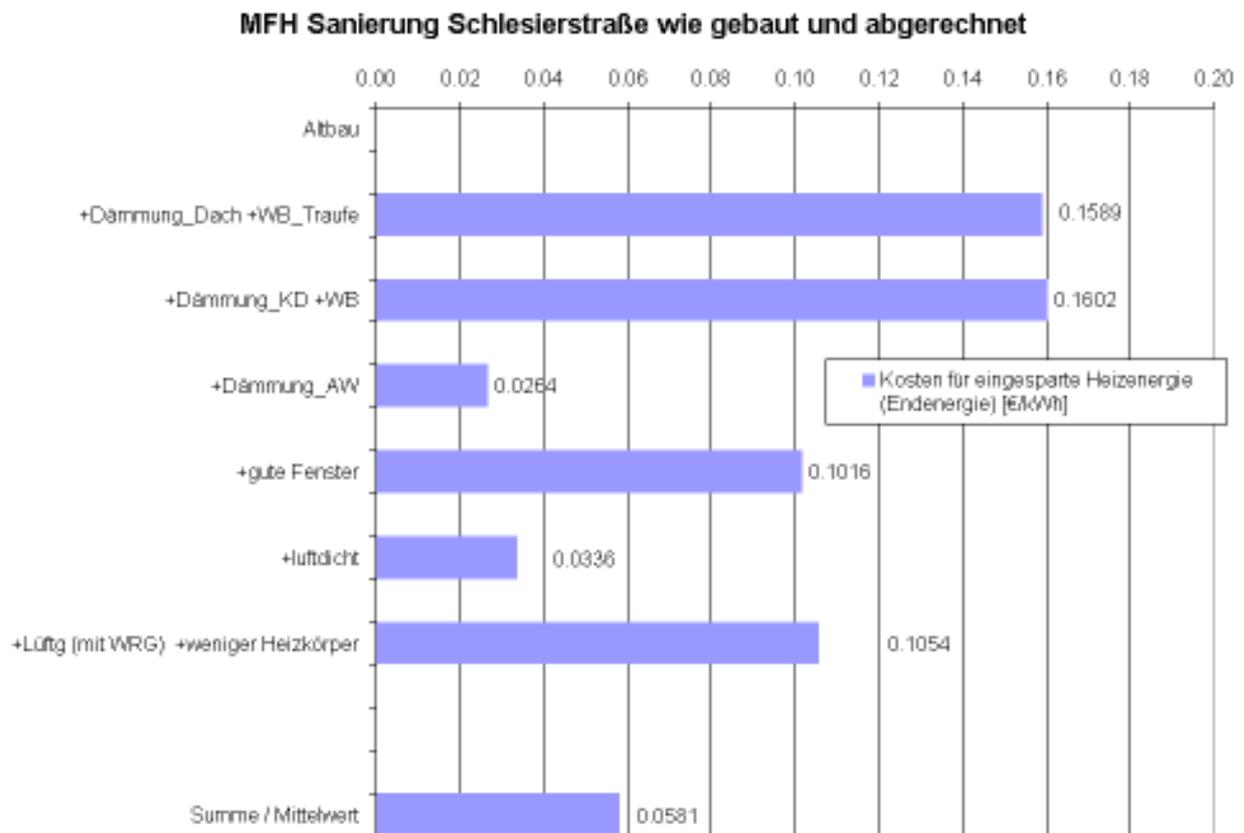


Abbildung 12: Sanierung Schlesierstraße wie realisiert. Preis pro eingesparter kWh je Maßnahme. Die Kosten für das Maßnahmenpaket liegen unter 0,06 €/kWh und sind damit günstiger als der derzeitige (2010) Bezugspreis für Heizenergie (Endenergie).

Szenario: Sanierung Schlesierstraße wirtschaftlich optimiert

Einzelne Maßnahmen im Projekt Schlesierstraße waren zum Teil relativ teuer und können somit für sich alleine nicht als wirtschaftlich angesehen und empfohlen werden. Um das weiter zu diskutieren wurde ein weiteres Sanierungsszenario erarbeitet, für das die Kosten der einzelnen Maßnahmen optimiert wurden. Die Baukosten dieses optimierten Szenarios wurde schon in Abbildung 8 und Tabelle 4 aufgelistet und beschrieben.

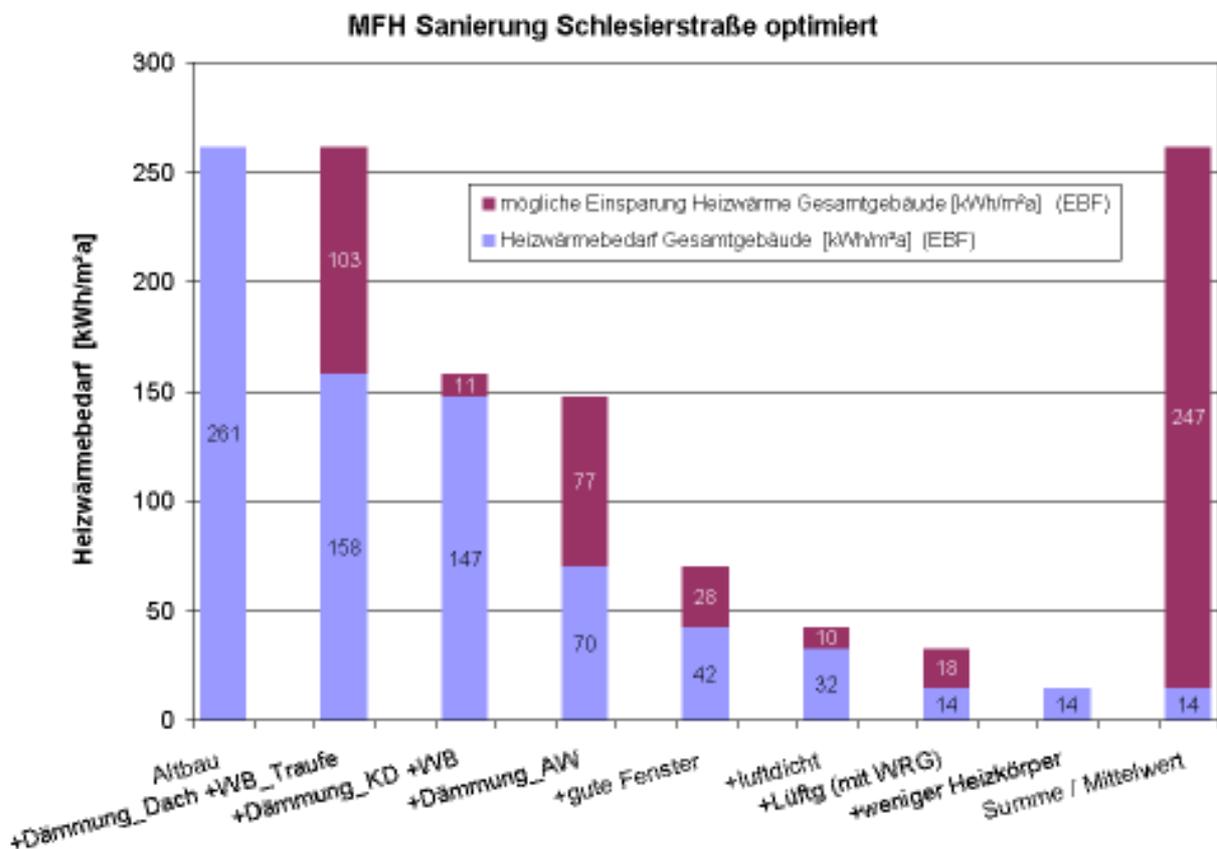


Abbildung 13: Sanierung Schlesierstraße optimiert. Energetische Auswirkungen der einzelnen Maßnahmen analog zu Abbildung 10. Der wichtigste Unterschied betrifft den Ausgangszustand der obersten Geschossdecke: diese ist hier im Ursprung nicht gedämmt, daher führt die Dämmung mit 380 mm Dicke (gleicher Endzustand wie in Abbildung 10) zu einer erheblich größeren Einsparung. Das verbessert die Wirtschaftlichkeit der Maßnahme stark, siehe Text und Abbildung 14. [Kah/Feist 2008].

Wie man am Heizwärmebedarf des Originalzustandes 'Altbau' in Abbildung 13 sieht, wurde nun davon ausgegangen, dass dort noch keine Wärmedämmung auf der obersten Geschossdecke vorhanden ist. Dementsprechend fällt die Energieeinsparung der Maßnahme 'Dämmung Dach' bei nur wenig höheren Kosten – nur der zusätzliche Dämmstoff muss bezahlt werden – erheblich größer aus. Folglich ist auch die Wirtschaftlichkeit dieser Maßnahme bei weitem besser, die Gründe wurden im

vorigen Abschnitt diskutiert. Dieses Ergebnis demonstriert, wie wichtig es ist, Maßnahmen nicht suboptimal auszuführen.

Weiterhin wurden die Maßnahmen zur Wärmebrückenreduktion stark optimiert und deren Kosten auf weniger als die Hälfte reduziert. Damit sind alle Maßnahmen zur Wärmedämmung in Abbildung 14 entweder gerade gegenfinanziert (Kellerdecke) oder ergeben eine deutliche Kosteneinsparung gegenüber der Bestandsgebäude, weil die Kosten der Wärmedämm-Maßnahme im Dach und an der Außenwand deutlich geringer sind als die Kosteneinsparungen über den Betrachtungszeitraum von 20 Jahren. Bei der Außenwanddämmung wurden die Dübel 'weggelassen' – dies geht natürlich nur, wenn der alte Außenputz noch tragfähig genug ist, um die geklebten Dämmblöcke dauerhaft zu tragen. Entsprechende Abreißversuche sind vor allem bei größeren Projekten in jedem Fall anzuraten, um zu testen, ob die relativ teuren Dübel wirklich benötigt werden. Beim Projekt Tevesstraße ergaben Abreißversuche, dass auf Dübel verzichtet werden konnte [Kaufmann/Pfluger/Feist 2009].

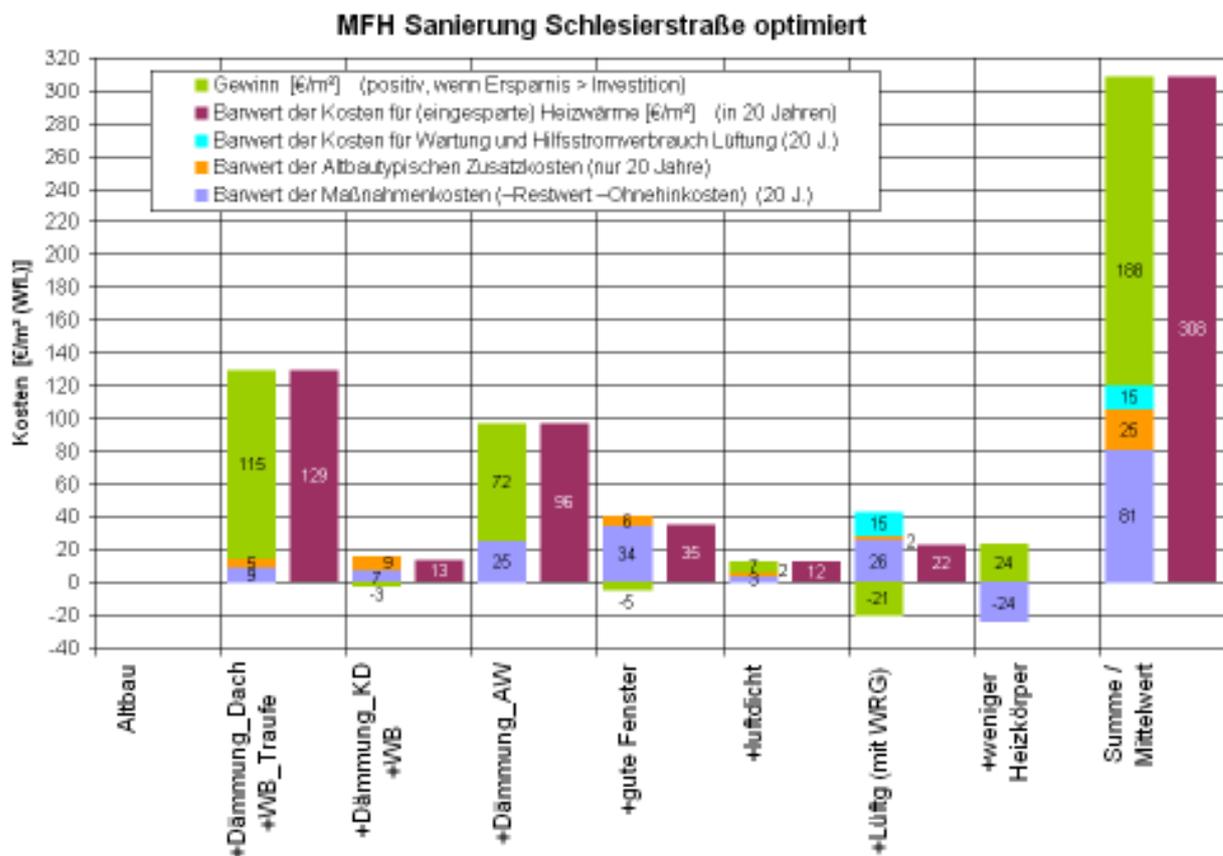


Abbildung 14: Sanierung Schlesierstraße optimiert. Ökonomische Auswirkungen der einzelnen Maßnahmen. Die Kosten der WB-Reduktion am Dachrand und am Perimeter wurden stark reduziert, siehe auch Tabelle 4. Außerdem wurde auf mechanische Befestigung des Wärmedämmverbundsystems (Dübel) verzichtet. Bei den Fenstern wurden weitere Kostenreduktionen angenommen. Ob dies alles möglich ist hängt jedoch von den Gegebenheiten des jeweiligen Gebäudes ab. Alle Angaben brutto (incl. MWSt) in €/m² Wohnfläche.

Bei den Fenstern wurde eine weitere Kostensenkung aufgrund von stärkerer Marktdurchdringung und durch Rationalisierungsmaßnahmen beim Einbau antizipiert. Spätere Gespräche mit dem Bauteam und verschiedene gegenwärtig angebotene Produkte bestätigen dies: Inzwischen (2010) werden hochwertige Rahmenprofile aus Kunststoff, mit Rahmen-U-Werten $U_f \leq 0.9 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, die für derartige Sanierungsmaßnahmen gut verwendbar sind, schon zu Preisen angeboten, für welche vor einigen Jahren nur ein NEH-Fenster erhältlich war, Tabelle 1. Es verbleiben damit für das hochwertige Fenster fast nur noch Mehrkosten für die 3fach Wärmeschutzverglasung von etwa 40 €/m^2 Fensterfläche.

Lüftung	Zu- und Abluftanlage mit WRG
Wärmebereitstellungsgrad	92 %
Stromeffizienz	0.38 kWh/m ³
resultierender Hilfsstrombedarf Lüftung (PHPP)	1.75 kWh/m ² a Endenergie elektrisch
Luftdichtheit	$n_{50} = 0.5 / \text{h}$
U_{Dach} (oberste Geschossdecke)	0.09 W/(m ² K)
U_{Wand}	0.11 W/(m ² K)
$U_{\text{Kelledecke}}$	0.28 W/(m ² K)
U_{Fenster} (Mittelwert)	0.85 W/(m ² K)

Tabelle 8: Die wichtigsten Bauteilkennwerte für die Sanierung Schlesierstraße als PHiB ('optimiert'):

Bei der Lüftungsanlage wurde angenommen, dass die Einhausung des Lüftungsgerätes entweder entfallen kann, wenn ein separater Technikraum zur Verfügung steht, oder dass diese Einhausung günstiger hergestellt werden kann. Entsprechende Weiterentwicklungen von besonders gut schallgedämmten Gehäusekonstruktionen für die Aufstellung in gemischt genutzten Räumen (Wohnküche o.ä.) sind anzuregen und erlauben die beste künftige Lösung. Denn auch die Aufstellung in einem separaten Technikraum kostet den verwendeten Platz. Außerdem wurde eine weitere technische Verbesserung der Geräte (Tabelle 8) angenommen: verbesserte Stromeffizienz und ein besserer Wärmebereitstellungsgrad führen zu einer weiteren Verringerung des Energiebedarfs und damit zu einer weiteren Energiekosteneinsparung, Abbildung 15.

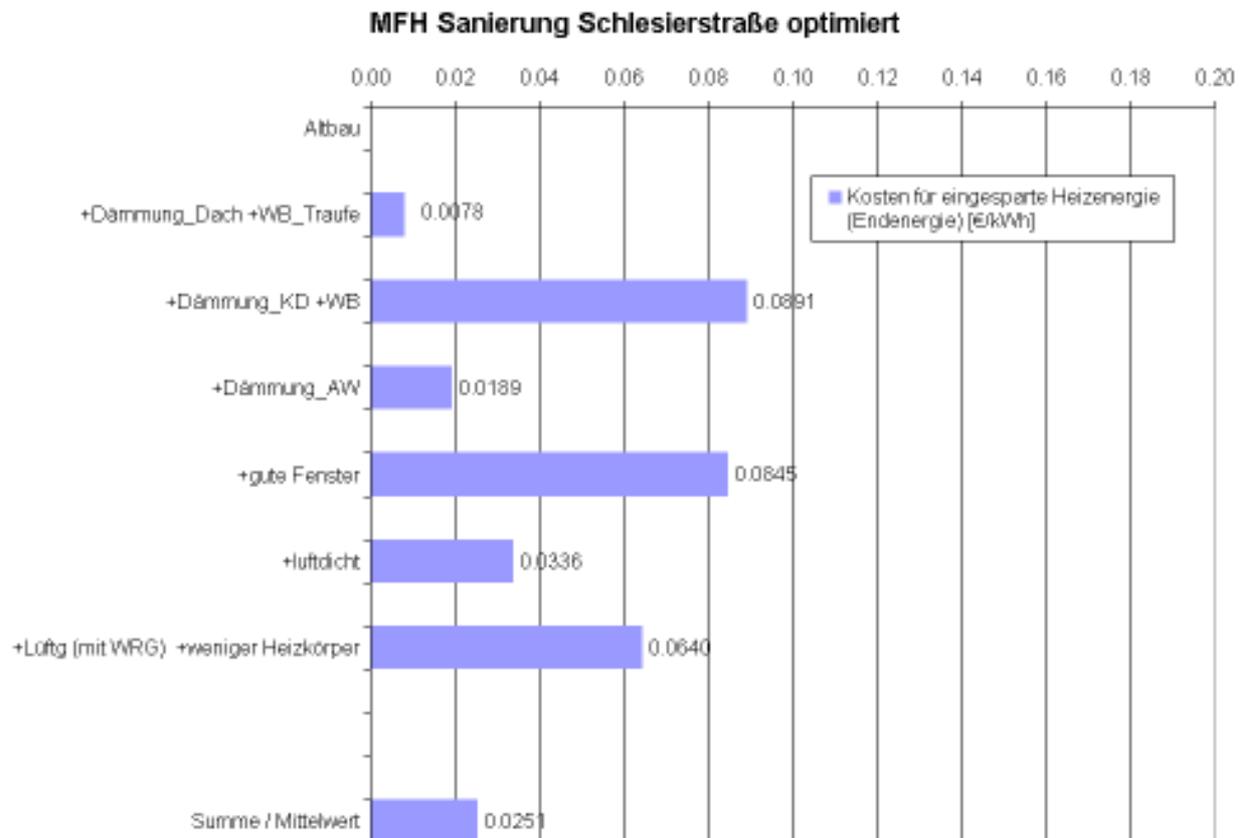


Abbildung 15: Sanierung Schlesierstraße optimiert. Preis pro eingesparter kWh je Maßnahme. Lüftung und Heizkörper wurden unter Haustechnik zusammengefasst, die Energieeinsparung der Wärmerückgewinnung daher als Referenz für beide angesetzt. Die gesamte Haustechnik führt also nur auf Kosten der eingesparten Energie von 0.064 €/kWh.

Für den Preis der eingesparten kWh ergeben sich gemäß dem bisher gesagten die Zahlen in Abbildung 15. Man erkennt, dass fast alle Maßnahmen sehr nahe an die Grenze von 0.08 €/kWh herankommen bzw. diese Grenze deutlich unterbieten. Bei der Haustechnik sind wieder die Mehrkosten der Lüftungsanlage teilweise durch die Mindermenge an Heizkörpern gegenfinanziert.

Szenario: Sanierung Schlesierstraße als NEH

Bleibt die Frage zu beantworten, welchen finanziellen bzw. wirtschaftlichen Vorteil eine Sanierung nach der EnEV gehabt hätte. Zum Zeitpunkt des Bauantrags war noch die EnEV 2002 gültig. Da diese jedoch für die Zukunft keine Relevanz mehr hat und andererseits die EnEV keine besonders scharf definierte Anforderung an den Heizwärmebedarf bzw. den Endenergiebedarf hat, wurde für die folgenden Überlegungen ein 'gutes NEH' herangezogen, das ähnlich wie das Gebäude NEH-Hoheloogstraße deutlich besser sein dürfte als manches Gebäude, das derzeit die EnEV-Anforderungen erfüllt. Das NEH-Gebäude soll eine Abluftanlage ohne WRG haben, Luftdichtheit mit $n_{50} = 1.5/h$. Wärmedämmung mit U-Werten zwischen 0.2 bis 0.35 W/(m²K), Fenster-U-Werte $U_w = 1.6$ W/(m²K), siehe Tabelle 9.

Lüftung	Abluftanlage
Wärmebereitstellungsgrad	–
Stromeffizienz	0.12 kWh/m ³
resultierender Hilfsstrombedarf Lüftung (PHPP)	0.55 kWh/m ² a Endenergie elektrisch
Luftdichtheit	$n_{50} = 1.5 /h$
U_{Dach} (oberste Geschossdecke)	0.2 W/(m ² K)
U_{Wand}	0.27 W/(m ² K)
$U_{Kelledecke}$	0.35 W/(m ² K)
$U_{Fenster}$ (Mittelwert)	1.6 W/(m ² K)

Tabelle 9: Sanierung Hoheloog/ Schlesierstraße als NEH: die wichtigsten Bauteilkennwerte

Der Heizwärmebedarf dieses NEH liegt bei 65 kWh/(m²a), die weiteren Zwischenzustände und die Einsparungen der einzelnen Maßnahmen sind in Abbildung 16 dargestellt. In Abbildung 17 sind wieder die Kosten der einzelnen Maßnahmen (Investitionskosten abzüglich Ohnehinkosten und abzüglich Restwert nach 20 Jahren) im Vergleich zu den eingesparten Energiekosten dargestellt. Man erkennt, dass die einzelnen Maßnahmen zwar alle billiger sind als für das PHiB, dass aber andererseits der Einspareffekt fast proportional dazu zurückgeht. In Summe sind die Energiekosten-Einsparungen ('Gewinn') in 20 Jahren mit 163 €/m² Wfl. deutlich geringer als die Einsparungen, welche die optimierte Sanierung mit PH-Komponenten bietet: 188 €/m² Wfl.

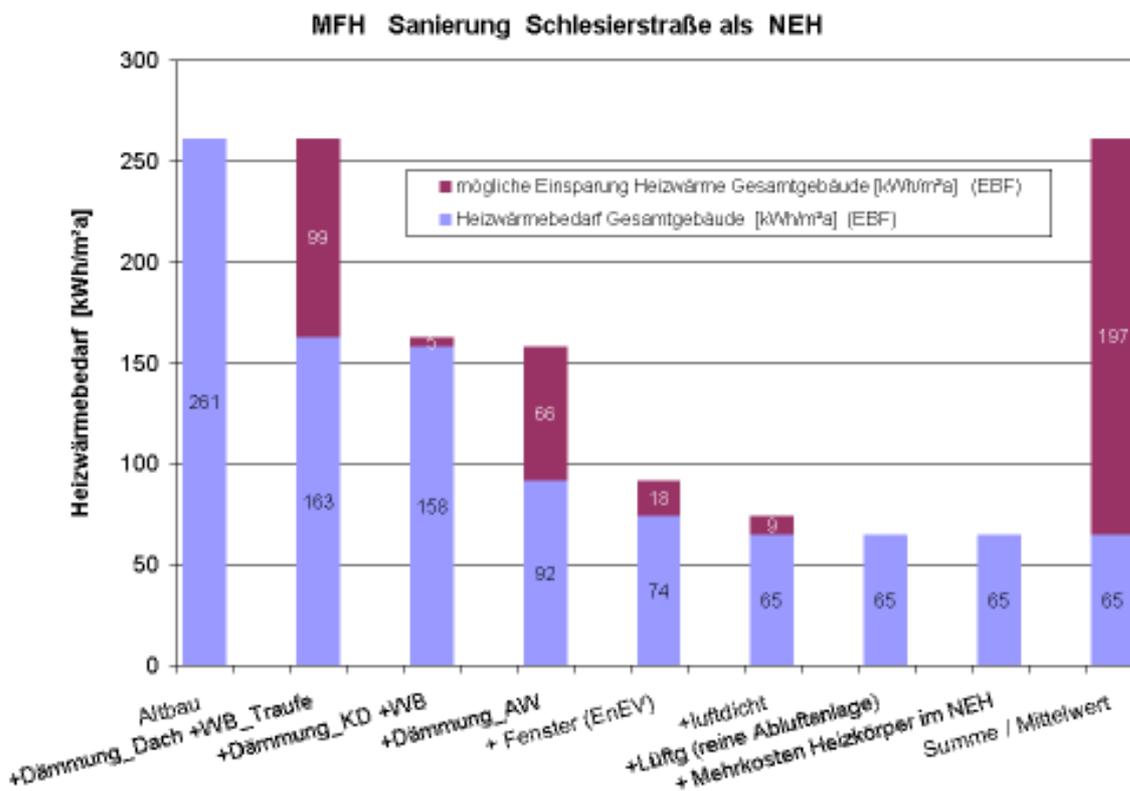


Abbildung 16: Sanierung Schlesierstraße als NEH. Energetische Auswirkungen

Der Preis pro eingesparter kWh (Abbildung 18) ist für alle Maßnahmen kleiner, da die Investitionskosten für das EnEV-Szenario jeweils geringer sind als für die Sanierung mit PH-Komponenten. Es zeigt sich allerdings, dass diese Darstellung ihre Grenzen hat, wenn es darum geht, Maßnahmen zu optimieren. Denn in den Preis pro kWh gehen nur die Investitionskosten bzw. deren Annuität und die pro Jahr eingesparte Energiemenge ein, welche über die 20 Jahre Betrachtungszeitraum konstant bleibt. In den Gewinn bzw. die finanzielle Einsparung, welche den tatsächlichen Vorteil einer Maßnahme gegenüber einer anderen beschreibt, gehen zusätzlich die diskontierten Zahlungen bzw. finanziellen Einsparungen d.h. die EnergieKOSTEN-Einsparung über den Betrachtungszeitraum ein. D.h. die Differenz der Barwerte (Investitionskosten und Energiekosten) ist zahlenmäßig anders verteilt als der Quotient aus Investitionskosten und Energiemenge. Aus diesem Grund gibt die Darstellung der diskontierten Kosten in Abbildung 17 immer korrekt den kleineren Gewinn der NEH-Variante gegenüber der optimierten PHiB-Variante in Abbildung 15 wieder. Bei der Darstellung wie in Abbildung 18 können sich Verschiebungen ergeben. Solange die eingesparten kWh billiger kommen als der Preis des Energiebezugs, bleiben die Maßnahmen wirtschaftlich – und der Gewinn wird mit der Ausführung der jeweiligen Sanierungsmaßnahme erhöht.

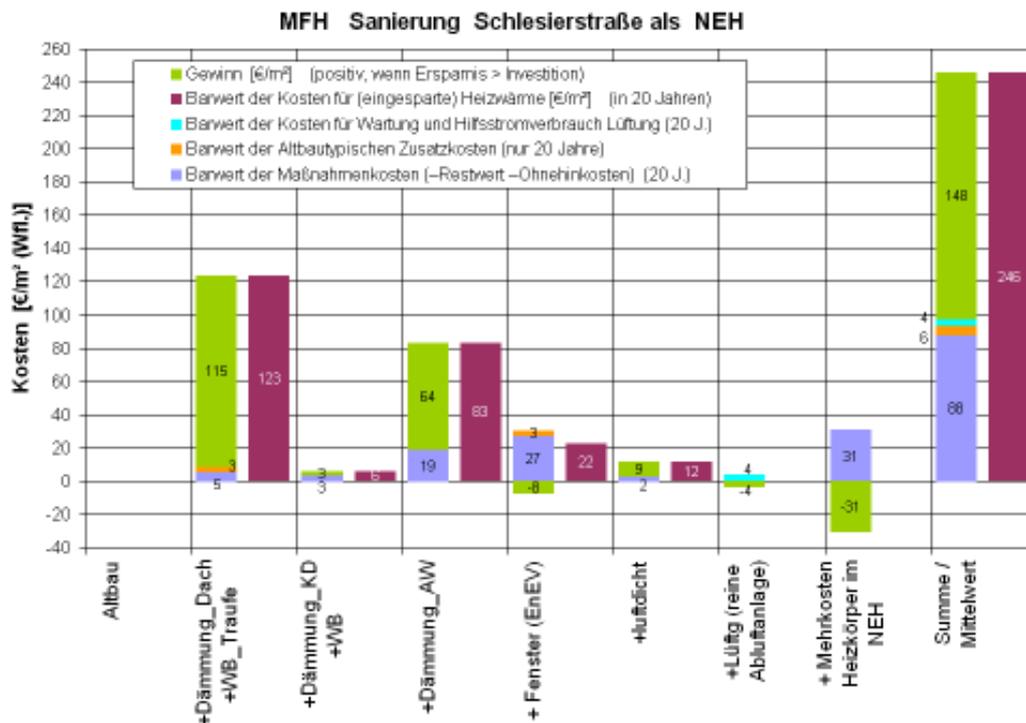


Abbildung 17: Sanierung Schlesierstraße als NEH. Ökonomische Bilanz. Die im Vergleich zum PHiB notwendigen zusätzlichen (neuen) Heizkörper tragen erheblich zu den Sanierungskosten.

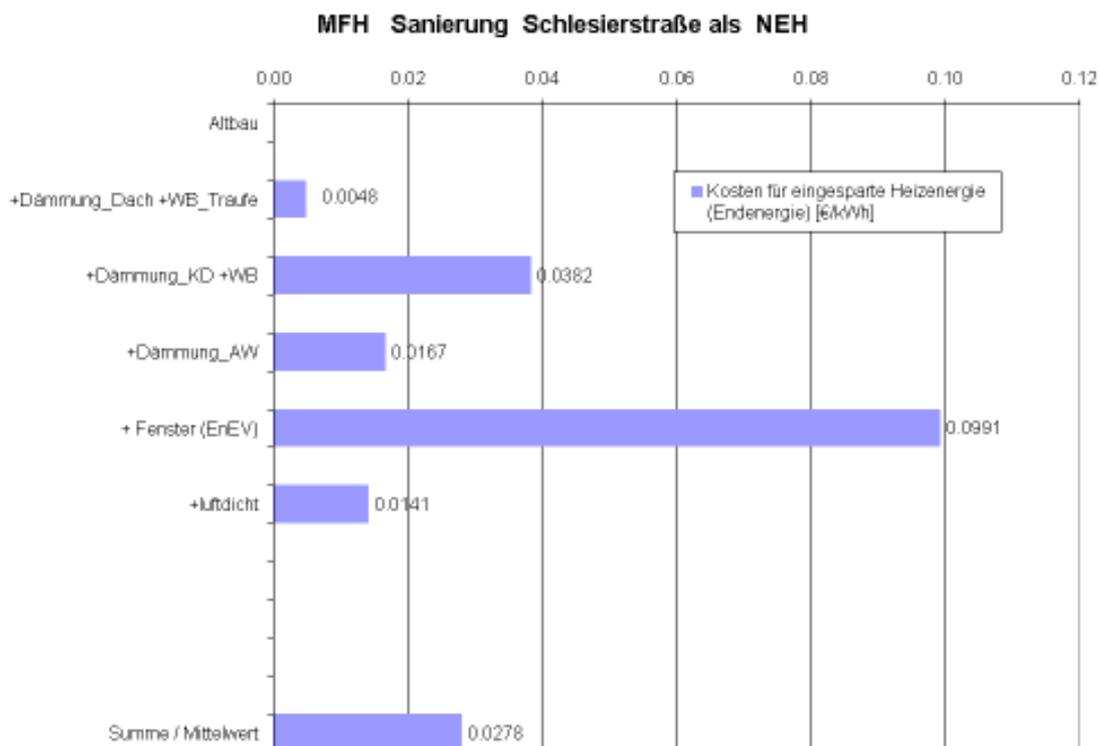


Abbildung 18: Sanierung Schlesierstraße als NEH. Preis pro eingesparter kWh je Maßnahme. Abluftanlage und Heizkörper bringen keine Energieeinsparung, daher hier keine Angabe.

Zusammenfassung: Lebenszykluskostenanalyse Energie & Invest

Die Summe aus den kapitalisierten laufenden Kosten (hier: Energiekosten) und den Investitionskosten, bezeichnet man auch als die 'Lebenszykluskosten' ('total lifecycle costs') für das Gebäude. Diese Summe gibt die gesamte finanzielle Belastung wieder, die der Betreiber bzw. der Nutzer des Gebäudes zu tragen hat. Daher ist diese Darstellung als Zusammenfassung der Ergebnisse sehr gut geeignet. Die Betrachtung wird auf einen Kalkulationszeitraum von 20 Jahren beschränkt, an dessen Ende die Restwerte von Gebäude bzw. Bauteil als Einnahme berücksichtigt werden. Bei einer Kostenbetrachtung werden sie daher von den Investitionskosten abgezogen.

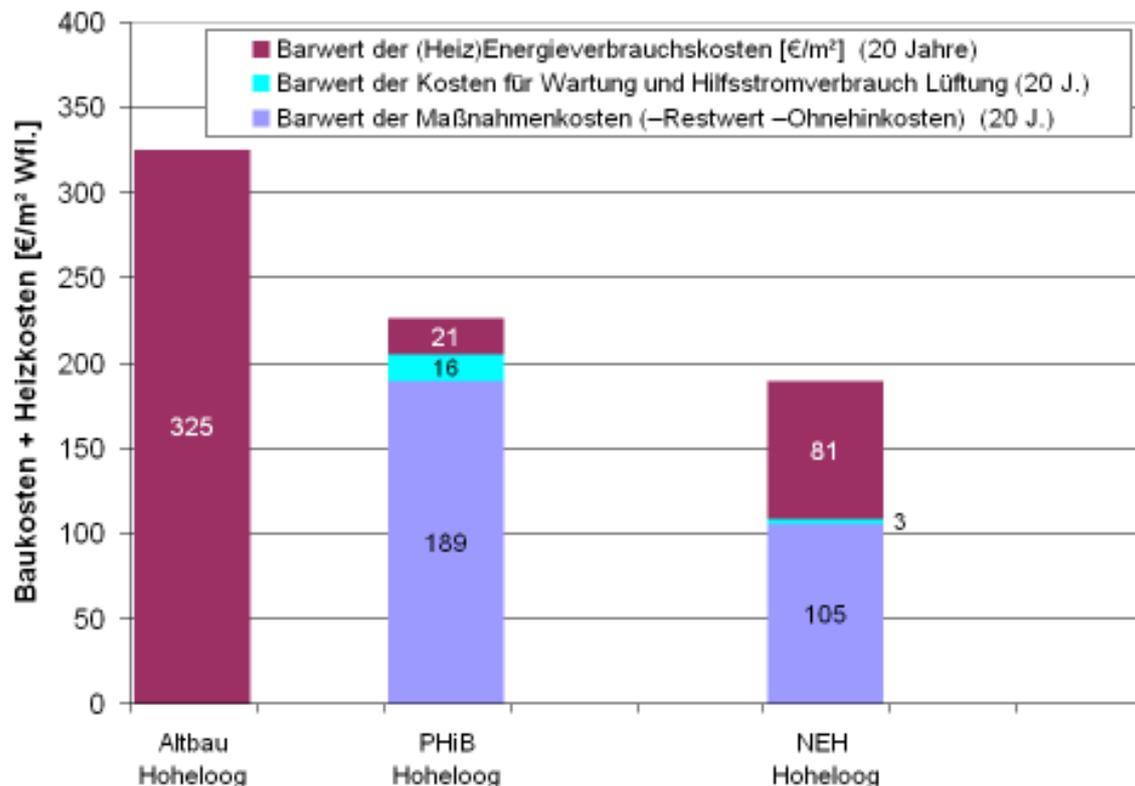


Abbildung 19: Zusammenfassung: Lebenszykluskostenanalyse
Vergleich der Sanierungsvarianten PHiB und NEH beim Projekt Hoheloogstraße.

Dargestellte Kosten = Energierrelevante Investitionskosten (abzüglich Restwert)
+ Wartungs- und Stromkosten Lüftung (20 Jahre)
+ kapitalisierte Energiekosten über 20 Jahre

Beim Projekt Hoheloogstraße gibt es einen direkten Vergleich der abgerechneten Kosten der Sanierungsvariante 'PHiB' und der Variante NEH. Damit lassen sich die Sanierungskosten dieser beiden Gebäude mit identischer Geometrie am gleichen

Standort direkt miteinander vergleichen. Für beide Gebäude gibt es eine Energiebilanzberechnung nach PHPP, außerdem liegt ein Monitoring über zwei Jahre vor, welches mit den gemessenen Verbräuchen der beiden Gebäudeteile die berechneten Energiebedarfswerte im wesentlichen bestätigt [Peper/Feist 2009], Näheres dazu auch in dem Bericht zu den Messungen des tatsächlichen Luftwechsels im Projekt Hoheloogstraße im Rahmen von IEA Task 37 [Kah/Ebel/Feist 2010].

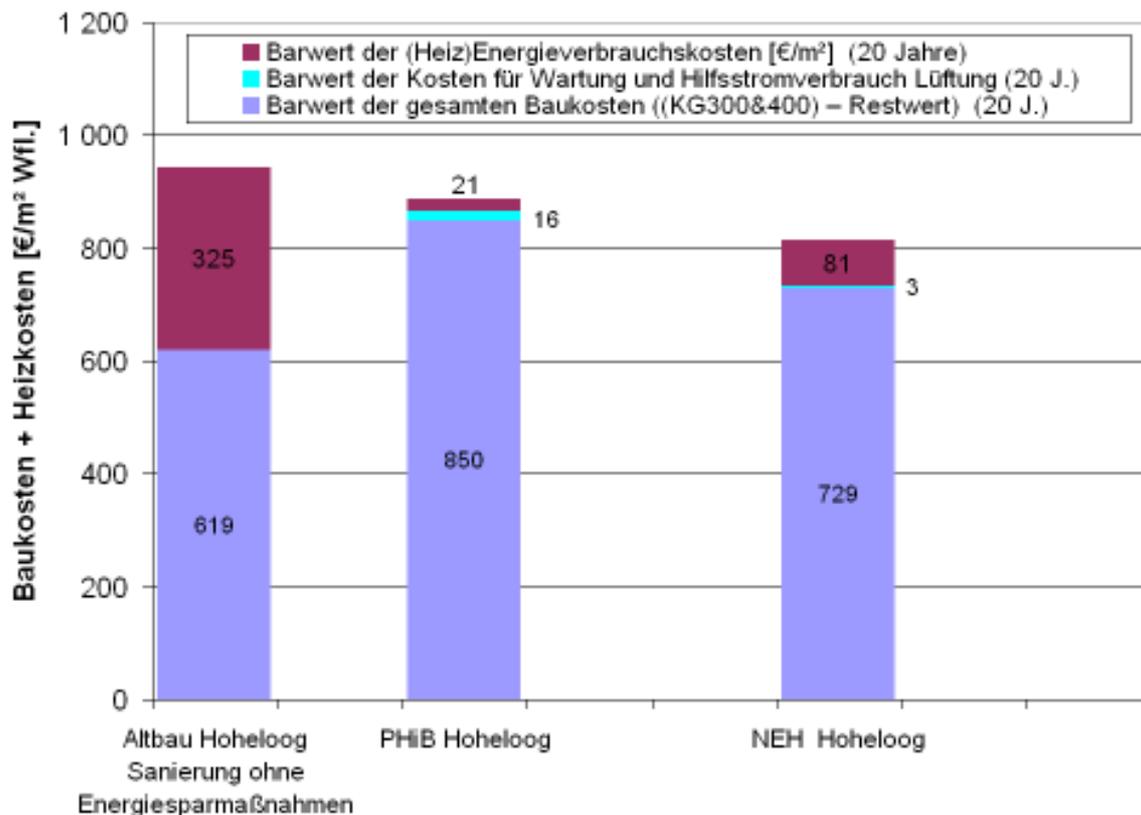


Abbildung 20: Zusammenfassung: Gesamte Sanierungskosten Hoheloogstraße. Vergleich der Varianten 'Sanierung ohne Energiesparmaßnahmen', 'PHiB' und 'NEH' beim Projekt Hoheloogstraße.

'Sanierung ohne Energiesparmaßnahmen' bedeutet, dass in diesem Betrag alle Kosten (Ohnehinkosten) einer konventionellen Sanierung eingeschlossen sind, d.h. die Kosten für den neuen Putz oder neue sanitäre Einrichtungen etc. Nicht aber die Kosten für die Wärmedämmung oder Lüftung mit WRG.

Dargestellte Kosten = Gesamte Investitionskosten (abzüglich Restwert)
 + Wartungs- und Stromkosten Lüftung (20 Jahre)
 + kapitalisierte Energiekosten über 20 Jahre

Mit den hier ausgewerteten Daten lassen sich die Wirtschaftlichkeiten der beiden Projekte direkt miteinander vergleichen, indem die Lebenszykluskosten der Sanierungsvarianten über einen Betrachtungszeitraum von 20 Jahren einander gegenübergestellt werden. Es zeigt sich, dass sowohl das PHiB als auch das NEH einen

deutlichen finanziellen Vorteil gegenüber dem ursprünglichen nicht sanierten Gebäude haben: die Energiekosten sinken so stark, dass die Lebenszykluskosten aus den verbleibenden Energieverbrauchskosten und den zusätzlichen Baukosten (abzüglich der Ohnehinkosten) für die Energiesparmaßnahmen geringer sind als die Energieverbrauchskosten des unsanierten Gebäudes im gleichen Zeitraum.

Die direkt der Energiesparmaßnahme zuzuordnenden Bauteilkosten in Abbildung 19 ergeben sich dabei aus den abgerechneten Baukosten abzüglich der Ohnehinkosten und abzüglich des Restwertes nach 20 Jahren. Diese Bauteilkosten sind für das PHiB höher als für das NEH, werden aber weitgehend kompensiert durch die während der Lebensdauer eingesparten Energiekosten. Der noch erhöhte Investitionsaufwand ist jedoch vor allem dem Pilotcharakter und der ehrgeizigen Zielsetzung des Projektes für den Bauherrn, GAG Ludwigshafen, geschuldet. Das Projekt Hoheloogstraße war eines der ersten dieser Art.

Es sei jedoch betont, dass die gesamten Sanierungskosten (Komplettisanierung) für die beiden Gebäudeteile mit 1227 €/m² Wfl. (brutto, PHiB Hoheloog) bzw. 1053 €/m² Wfl. (brutto, NEH-Hoheloog) ihresgleichen suchen. Derartige Komplettisanierungen werden in der Regel zu deutlich höheren Kosten realisiert. Vergleicht man die Lebenszykluskosten der Komplettisanierung beim Pilotvorhaben Hoheloogstraße, Abbildung 20, dann erkennt man, dass die beiden Varianten (PHiB und NEH) um weniger als 8 % auseinanderliegen und außerdem beide Varianten deutlich günstiger sind, als wenn das Gebäude nur 'einfach saniert' worden wäre, d.h. ohne jegliche Energiesparmaßnahme.

Die Kosten der einzelnen Maßnahmen waren der Anlass, das Folgeprojekt der GAG, das Bauvorhaben PHiB-Schlesierstraße in Ludwigshafen noch detaillierter auszuwerten. In Abbildung 21 sind in den ersten beiden Spalten die Lebenszykluskosten der direkt den Energiesparmaßnahmen zuzuordnenden Kosten aus dem Projekt PHiB-Schlesierstraße 'wie gebaut' als zusammengefasst. Wieder gibt es einen deutlichen Vorteil gegenüber dem ursprünglichen unsanierten Zustand des Gebäudes. Außerdem erkennt man klar, dass hier die Summe der direkt den Maßnahmen zuzuordnenden Bauteilkosten gegenüber dem Projekt PHiB-Hoheloog deutlich gesenkt werden konnten, siehe dazu auch die Erläuterung zu Abbildung 5 bzw. Tabelle 2 und Tabelle 4.

Darüber hinaus wurden zwei weitere Sanierungs-Szenarien mit Annahmen zu den Kosten durchgespielt, welche eine weitere Kostenoptimierung erkennen lassen, Abbildung 21 rechts. Die kostenoptimierte Sanierung mit Passivhauskomponenten zeigt, dass es möglich sein sollte, die Bauteilkosten auch bei Altbausanierungen noch einmal zu senken, ohne die Bauqualität bedeutend zu vermindern. Derartige kostenoptimierte Altbausanierungen werden inzwischen unter dem Kürzel 'EnerPHit' vom Passivhaus Institut auch zertifiziert [Bastian 2010].

Vergleicht man die Spalte 2 und Spalte 5 in Abbildung 21 so zeigt sich, dass sich PHiB-Schlesier und das Szenario NEH hier nur noch geringfügig (+ 2 %) voneinander unterscheiden. Die kostenoptimierte Variante 'EnerPHit' ist sogar deutlich günstiger in den energierelevanten Lebenszykluskosten (-29 %) als die NEH-Sanierung, da deren Energieverbrauchskosten über den Betrachtungszeitraum sehr hoch bleiben.

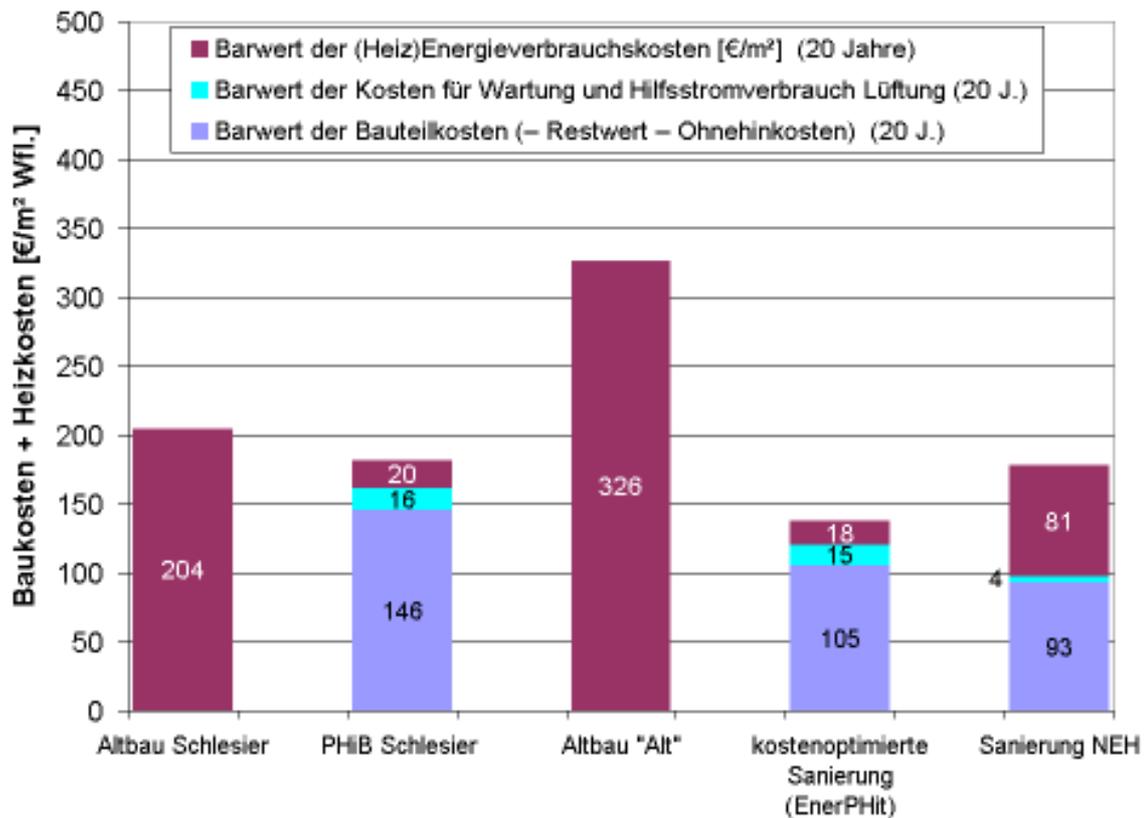


Abbildung 21: Zusammenfassung: Lebenszykluskostenanalyse
Vergleich der Sanierungsvarianten beim Projekt Schlesierstraße:
PHiB 'wie realisiert' und PHiB 'optimiert' und NEH

Dargestellte Kosten = **Energierelevante Investitionskosten (abzüglich Restwert)**
 + **Wartungs- und Stromkosten Lüftung (20 Jahre)**
 + **kapitalisierte Energiekosten (20 Jahre)**

Die Kostenoptimierung wie sie mit Abbildung 14 beschrieben wurde, ist schon in naher Zukunft als realistisch zu sehen; das wird auch von den Projektbeteiligten so beurteilt. Denn inzwischen werden kostenoptimierte Fenster in 'annähernder' Passivhausqualität zu Preisen angeboten, die vor drei bis vier Jahren noch für Standardfenster mit 3-Kammer-Profilen und U_w -Werten von mehr als $1,6 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ bezahlt wurden. Und auch bei der 3fach Wärmeschutzverglasung hat sich inzwischen durch vorhandene Fertigungsstraßen eine bedeutende Kostenreduktion ergeben. Für Lüftungsgeräte ist mit der stärkeren Marktdurchdringung und optimierter Serienfertigung ebenfalls in nächster Zukunft eine weitere Kostensenkung zu erwarten.

Andererseits muss deutlich gemacht werden, dass die Baukosten wie sie hier dokumentiert sind, nur für 'preisgünstige' Produkte und Komponenten gelten. Das heißt, dass z.B. Holz- oder gar Holz-Alu-Fenster für derartige Projekte nicht verbaut werden konnten, weil dafür kein Budget vorhanden war. Dies war jedoch die dezidierte Absicht des Bauherrn, GAG-Ludwigshafen, bei diesen Projekten: es sollten kostengünstige, aber dennoch hochwertige, langlebige und komfortable Wohnungen entstehen.

Genau dies macht diese Projekte für eine Studie zum 'kostengünstigen Passivhaus' aber so wertvoll: es konnte gezeigt werden, dass eine Grundausstattung mit Passivhauskomponenten auch für jede Altbausanierung zu erschwinglichen Kosten zu realisieren ist. Wer darüber hinaus edlere Oberflächen und weitere architektonische Ansprüche wünscht, kann auch dies realisieren. Die daraus resultierenden Mehrkosten sollten dann jedoch nicht auf das Budget 'energetische Sanierung' geschrieben werden.

Mit den hier beschriebenen Projekten und Projektkosten wurde eine Basiskonfiguration für kostengünstige Altbausanierungen beschrieben, die als Maßstab für die nächsten Jahre gelten könnte. Eine derartige Konfiguration sollte sich jede Wohnbaugesellschaft leisten können. Die Mieter werden es schätzen lernen.

Literatur

- [AKKP 11] Feist, W. Die Ökonomie des energiesparenden Bauens. In: Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser, Protokollband Nr. 11, 2. Passivhaus Institut, Darmstadt, 1998
- [AKKP 16] Feist, W. (Hrsg.), Wärmebrückenfreies Konstruieren, Passivhaus Institut, Darmstadt, Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser, Protokollband Nr. 16, 2. Auflage 2001
- [AKKP 24] Feist, W. (Hrsg.), Einsatz von Passivhauskomponenten für die Altbausanierung, Passivhaus Institut, Darmstadt, Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser, Protokollband Nr. 24, 1. Auflage 2004
- [AKKP29] Feist, W. (Hrsg.), Hochwärmedämmte Dachkonstruktionen, Passivhaus Institut, Darmstadt, Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser, Protokollband Nr. 29, 1. Auflage 2005
- [AKKP 30] Feist, W. (Hrsg.), Lüftung bei Bestandssanierung, Passivhaus Institut, Darmstadt, Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser, Protokollband Nr. 30, 1. Auflage 2005
- [AKKP 37] Feist, W. (Hrsg.), Optimierungsstrategien für Fensterbauart und Solarapertur [...], Protokollband Nr. 37, Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser Phase IV, Darmstadt, 1. Auflage 2009.
- [Bastian 2010] Bastian, Z., Die EnerPHit-Zertifizierung für die Altbaumodernisierung mit Passivhaus-Komponenten – Erste Erfahrungen, Abstract (2010) zur Passivhaustagung 2011. Wird erscheinen im Tagungsband zur Passivhaustagung 2011, Darmstadt, Innsbruck.
- [DIN4108] Wärmeschutz und Energieeinsparung in Gebäuden. DIN V 4108 Teil 7, Luftdichtheit von Gebäuden, Anforderungen, Planungs- und Ausführungsempfehlungen sowie -beispiele, Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin 2001
- [Ebel/Eicke/Feist/Groscurth 2000] Ebel, W; W. Eicke-Hennig; W. Feist; H.-M. Groscurth: Energieeinsparung bei Alt- und Neubauten. C.F. Müller Verlag, Heidelberg 2000
- [EnEV 2009] Verordnung zur Änderung der Energieeinsparverordnung – EnEV, verkündet am 29. April 2009 im Bundesgesetzblatt Jahrgang 2009. In Kraft getreten am 1. Oktober 2009
- [Feist 2001] Feist, W., Baffia, E., Sariri, V., Wirtschaftlichkeit ausgewählter Energiesparmaßnahmen im Gebäudebestand, Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft, Abschlussbericht 1998, Passivhaus Institut, 3. Auflage, 2001
- [Feist 2005] Feist, W., Zur Wirtschaftlichkeit der Wärmedämmung bei Dächern, in [AKKP29]
- [Kah/Feist 2008] Kah, Oliver; Feist, Dr. Wolfgang; Pfluger, Dr. Rainer; Schnieders, Jürgen; Kaufmann, Dr. Berthold, Schulz, Tanja; Bastian, Zeno: Bewertung energetischer Anforderungen im Lichte steigender Energiepreise für die EnEV und die KfW-Förderung, Hg. von BMVBS / BBR, BBR-Online-Publikation 18/2008. urn:nbn:de:0093-ON1808R222
- [Peper/Feist 1999] Peper, S., Feist, W., Sariri, V, Luftdichte Projektierung von Passivhäusern, Eine Planungshilfe, CEPHEUS Projektinformation Nr. 7, Fachinformation PHI-1999/6, Passivhaus Institut, Darmstadt, 1999.
- [Peper/Feist 2009] Peper, Dipl.-Ing. Søren; Feist, Wolfgang: Gebäudesanierung "Passivhaus im Bestand" in Ludwigshafen / Mundenheim, Messung und Beurteilung der energetischen Sanierungserfolge, Darmstadt, 2009. Im Auftrag der GAG Ludwigshafen, Download unter: www.passiv.de
- [HMWi 2009] Feist, Kaufmann, Pfluger, Peper, Grove-Smith, Sanierungsprojekt Frankfurt Tevesstraße, Darmstadt 2009. Der vollständige Projektbericht steht zum download bereit unter www.passiv.de

[Kah/Ebel/Peper/Feist 2010] Kah, O., Ebel, W., Peper, S., Feist, W., Untersuchung zum Außenluftwechsel und zur Luftqualität in sanierten Wohnungen mit konventioneller Fensterlüftung und mit kontrollierter Lüftung, Passivhaus Institut, Darmstadt, 2010, Forschungsbericht im Rahmen des IEA Task 37, gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie.

[Kaufmann/Feist 2003] Kaufmann, B., Feist, W., Pfluger, R., Technische Innovationstrends und Potenziale der Effizienzverbesserung im Bereich Raumwärme, Studie im Auftrag des Institut für Ökologische Wirtschaftsforschung (IÖW), Berlin, April 2003

[Kaufmann 2005] Kaufmann, B., Das Passivhaus – der Entwicklungsstand ökonomisch betrachtet, Proceedings of the International Passive House Conference 2005 in Ludwigshafen/Rhein.

[Kaufmann/Ebel 2010]: Kaufmann, B., W. Ebel, Economics of high thermal performance old house renovation projects, Beitrag zum englischsprachigen Handbuch "Advances in Housing Renovation" im Rahmen von IEA Task 37, gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie BMWi. Passivhaus Institut, Darmstadt, 2010

[Kaufmann/Peper/Pfluger/Feist 2009] Kaufmann, B., Peper, S., Pfluger, R., Feist, W., Sanierung mit Passivhauskomponenten, Planungsbegleitende Beratung und Qualitätssicherung Tevesstraße Frankfurt a.M., Im Auftrag des Hessischen Ministeriums für Wirtschaft, Verkehr und Landesentwicklung, Wiesbaden, Darmstadt Februar 2009

[Steinmüller 2005] Steinmüller, B., Passivhaustechnologie im Bestand – von der Vision in die breite Umsetzung, Proceedings of the International Passive House Conference 2005 in Ludwigshafen/Rhein.

[Schöberl/Hutter 2003] Schöberl, H., Hutter, S., et al., Anwendung der Passivhaustechnologie im sozialen Wohnbau, Projektbericht im Rahmen der Programmlinie 'Haus der Zukunft', Bundesministerium für Verkehr, Innovation, Technologie, Wien 2003