



STADTQUARTIER 2050

Partner:

STUTTGART



Fraunhofer
IBP

STADTWERKE
STUTTGART



Universität Stuttgart

IREES
research for future.

überlingen

BGÜ
Baugenossenschaft Überlingen eG

Fraunhofer
FIT
Projektgruppe
Wirtschaftsinformatik

STADTWERK
AM SEE

energieagentur
Ravensburg

puren®

FW
München

Assoziierte Partner:

SAINT-GOBAIN

SWSG
Forschungsinstitut für
Wärmeschutz e.V.
München

Deliverable D2.2.1

Dokumentation des Planungs- und Umsetzungsprozesses

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Erstellt im Verbundvorhaben STADTQUARTIER
2050 im Rahmen der Förderinitiative „Solares Bauen/
Energieeffiziente Stadt“ aus dem 6. Energieforschungspro-
gramm

Autoren:

Dieter Ressel, Anneka Werner, Volker Eisenhuth (BGÜ)
Dr. Andreas Huther (puren GmbH)
Moritz Fakner (Stadtwerk am See)
Michael Maucher, Anna Söder (Energieagentur Ravens-
burg)
Michael Kamml (Forschungsinstitut für Wärmeschutz e.V.
München)

Überlingen, 28.02.2024

Inhalt

1	Einführung	3
2	Planungsprozess	4
2.1	Entwicklung des Gesamtenergiekonzepts für Bestand- und Neubauquartier	4
2.2	Planung der innovativen Maßnahmen im Gebäudebereich, der Energieversorgung und der Informations- und Kommunikationstechnik	6
2.3	Low-Tech-Ansätze im Neubauquartier	8
2.4	Entwicklungskonzept Bestandsgebäude Hildegardring.....	9
3	Umsetzung und Baudokumentation.....	9
3.1	Ausschreibung und Vergabe der innovativen Maßnahmen im Gebäudebereich und der Energieversorgung	9
3.2	Ausführung und Bauüberwachung der innovativen Anteile im Gebäudebereich und der Energieversorgung	13
3.3	Inbetriebnahme der innovativen Anteile im Gebäudebereich und der Energieversorgung	17
4	Wissenschaftliche Begleitung der Gebäudehülle	18
4.1	Thermische Analyse der Gebäudehülle	19
4.2	Ökobilanzielle Betrachtung der Gebäudehülle	38
4.3	Flächenbedarf.....	43
5	Literatur.....	46
6	Anhang	47

1 Einführung

Das Projekt „Stadtquartier 2050 – Herausforderungen gemeinsam lösen“ ist eines von sechs Leuchtturmprojekten, der in 2016 gestarteten Förderinitiative des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) und des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF).

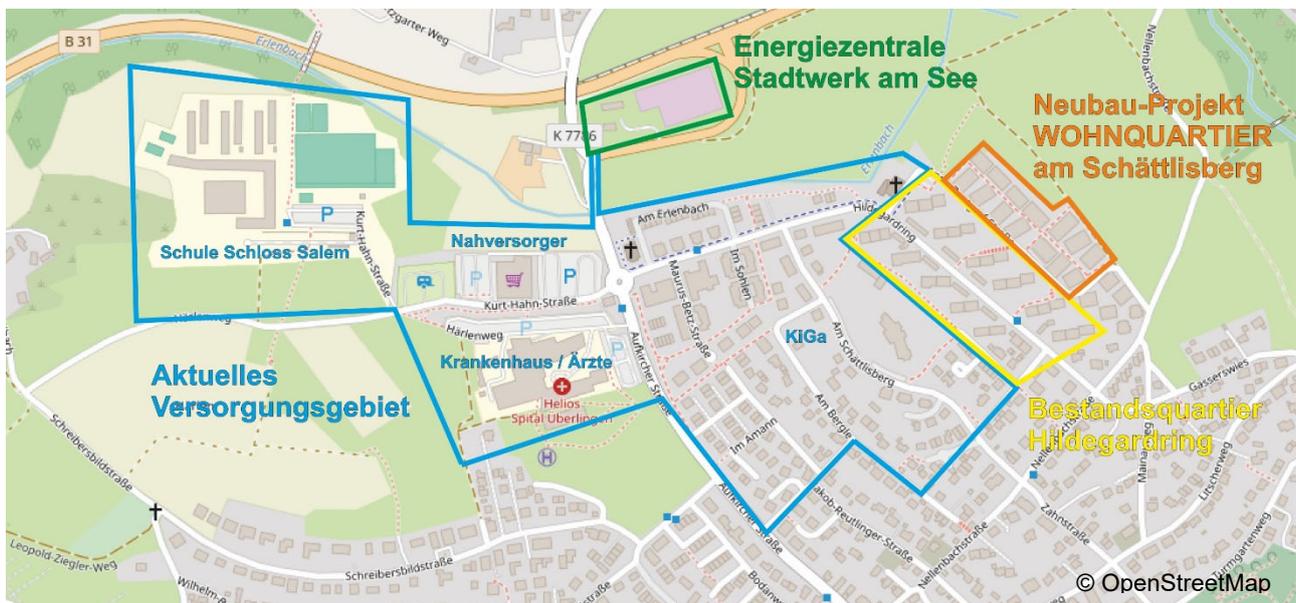
Im Verbund stellen sich die Landeshauptstadt Stuttgart und die Stadt Überlingen der Herausforderung ambitionierte Energiekonzepte umzusetzen, um beispielhaft für zwei Quartiere eine nahezu klimaneutrale Energieversorgung umzusetzen. Die Aufgabenstellung wird sowohl von technologischen als auch von sozialwissenschaftlichen Fragestellungen begleitet.

Die Stadt Überlingen verfügt über einen Klimaschutzmasterplan mit konkreten Quartiers- und Infrastrukturprojekten in der Region, zur Umsetzung der energie- und klimapolitischen Ziele. Ein wesentlicher Bestandteil des Umsetzungsplans sind die regionale und regenerative Energieerzeugung durch die Effizienzsteigerung eines Biomassekraftwerks sowie klimaneutrale Neubauquartiere.

Im Betrachtungsgebiet des Teilprojekts Überlingen liegt das Projektvorhaben „Hildegardring/Schättlisberg“ der Baugenossenschaft Überlingen eG, das als Demonstrationsquartier einen großen Baustein im Rahmen des Energie- und Klimaschutzkonzepts in Richtung klimaneutraler Gebäudebestand auf Quartiers-ebene darstellt. Gleichzeitig findet eine Entlastung im Bereich bezahlbarer Mietwohnraum in Überlingen statt.

Das Betrachtungsgebiet des Teilprojekts in Überlingen umfasst sowohl Neubauten als auch die energetische Ertüchtigung von Bestandsgebäuden.

Bild 1: Betrachtungsgebiet Teilprojekt Überlingen. Quelle: Map data from OpenStreetMap.



Im Bestandsquartier „Hildegardring“ stehen 12 Mehrfamilienhäuser mit insgesamt 240 Wohneinheiten zur energetischen Ertüchtigung an wovon je die Hälfte in genossenschaftlichen und privaten Eigentumsverhältnissen stehen.

Am Bestandsquartier angrenzend befindet sich das Neubaugebiet „Schättlisberg“ in dem die Baugenossenschaft Überlingen 14 Gebäude im genossenschaftlichen Kontext errichtet hat. Darüber hinaus wurden dort während der Projektlaufzeit vier weitere Gebäude von einem privaten Bauträger errichtet.

Mit dem Arbeitspaket 2.2 steht die Entwicklung eines beispielhaften klimaneutralen Energiekonzepts für ein Stadtquartier im Vordergrund. Das Gesamtenergiekonzept des Projekts umfasst neben der Umsetzung einer modernen, klimaneutralen Quartiersweiterung auch die Anregung der Gebäudeeigentümer im Bestand (Genossenschaften und private Wohnungseigentümergeinschaften) zur energetischen Sanierung auf KfW 55 Niveau, sodass Bestand und Neubau in Gesamtheit zu einem klimaneutralen Wohnquartier verbunden werden.

Als tragende Säule der klimaneutralen Wärmeversorgung wurde der Anschluss an die bereits bestehende Energiezentrale gewählt. Darüber hinaus ist die Stromerzeugung und Stromspeicherung im Quartier im Energiekonzept berücksichtigt.

Zur Realisierung der fortlaufenden Energieverbrauchsmessung umfasst der Planungs- und Umsetzungsprozess die Integration von Informations- und Kommunikationstechnik.

Neben der Wärmeversorgung steht auch die Entwicklung eines innovatives Wärmeschutzkonzepts für die Gebäudehülle Mehrfamilienhäusern im Fokus des Arbeitspakets. Dazu gehört vor allem die Betrachtung von innovativen Hochleistungs- und Konstruktionsdämmstoffen.

Im Zuge der Planung des Energiekonzepts wurden weitere Innovationen wie die quartiersbezogene Erzeugung von Wasserstoff durch überschüssigen PV-Strom (Power to Gas), der Einsatz von Brennstoffzellentechnologie und der Aufbau von größeren Quartier-Stromspeichern betrachtet.

2 Planungsprozess

2.1 Entwicklung des Gesamtenergiekonzepts für Bestand- und Neubauquartier

Auf Grundlage der im Projektantrag anvisierten Zielstellung wurde zum Jahresbeginn 2019 eine schematische Darstellung des Energiekonzepts erarbeitet und in einer ganzheitlichen Beschreibung erläutert. In der zweiten Jahreshälfte wurden das Energiekonzept weiter ausgearbeitet und vor allem die Anschlussmöglichkeiten an die Wärmeversorgung sowie das Mieterstromkonzept diskutiert. Darüber hinaus wurden Möglichkeiten zur Umsetzung der E-Ladestationen und des E-Car-Sharing identifiziert.

Zum Jahresbeginn 2020 war das Grundgerüst des Energiekonzepts festgelegt und im den Neubau betreffenden Teil bereits in der Umsetzung. In der zweiten Jahreshälfte 2020 wurden die Berechnungen zur Bilanzierung des Energiekonzepts entsprechend dem aktuellen Planungs- und Sachstand aufbereitet. Seitens der Eigentumswohnungen konnten allerdings zu diesem Zeitpunkt noch nicht alle Daten vollständig ermittelt werden. Diese wurden in Absprachen mit der Energieagentur Ravensburg und dem Stadtwerk am See zum Teil in der ersten Jahreshälfte 2021 ermittelt bzw. erhoben. Coronabedingt waren die Abstimmungen mit den Verwaltern und Beiräten der Bestandsgebäude nur eingeschränkt möglich.

Um für beide Projekte, Stuttgart und Überlingen, mit der gleichen Bilanzierungsmethode und den gleichen Ausgangsvoraussetzungen zu bewerten, fanden Detailabstimmungen zwischen den Projektbeteiligten statt.

Das Ergebnis des Energiekonzepts für den Projektteil Überlingen (Stand Februar 2023) ist in Bild 34 übersichtsmäßig dargestellt. Demnach ist zu erwarten, dass 80 % der im Projektgebiet benötigten thermischen Energie im Rahmen des Nahwärmenetzes über die erneuerbaren Energien Biomasse und Solarthermie bereitgestellt werden können. Über die Hälfte des benötigten Stroms kann lokal durch PV-Anlagen und das BHKW des Nahwärmenetzes erzeugt werden, der Rest wird im Rahmen eines Mieterstrommodells als Ökostrom zugekauft. Trotz aller Anstrengungen werden nach Ansetzen üblicher Emissionsfaktoren sowie kombinierter Faktoren von 58 kg CO₂ pro MWh für Wärme und 12 kg CO₂ pro MWh für Strom durch den Betrieb der Gebäude des Projektgebiets jährlich noch ca. 174 Tonnen Treibhausgase emittiert. Als eine Möglichkeit der Kompensation dieser Emissionen wird die Installation von PV-Anlagen auf den Bestandsgebäuden des Hildegardrings vorgeschlagen.

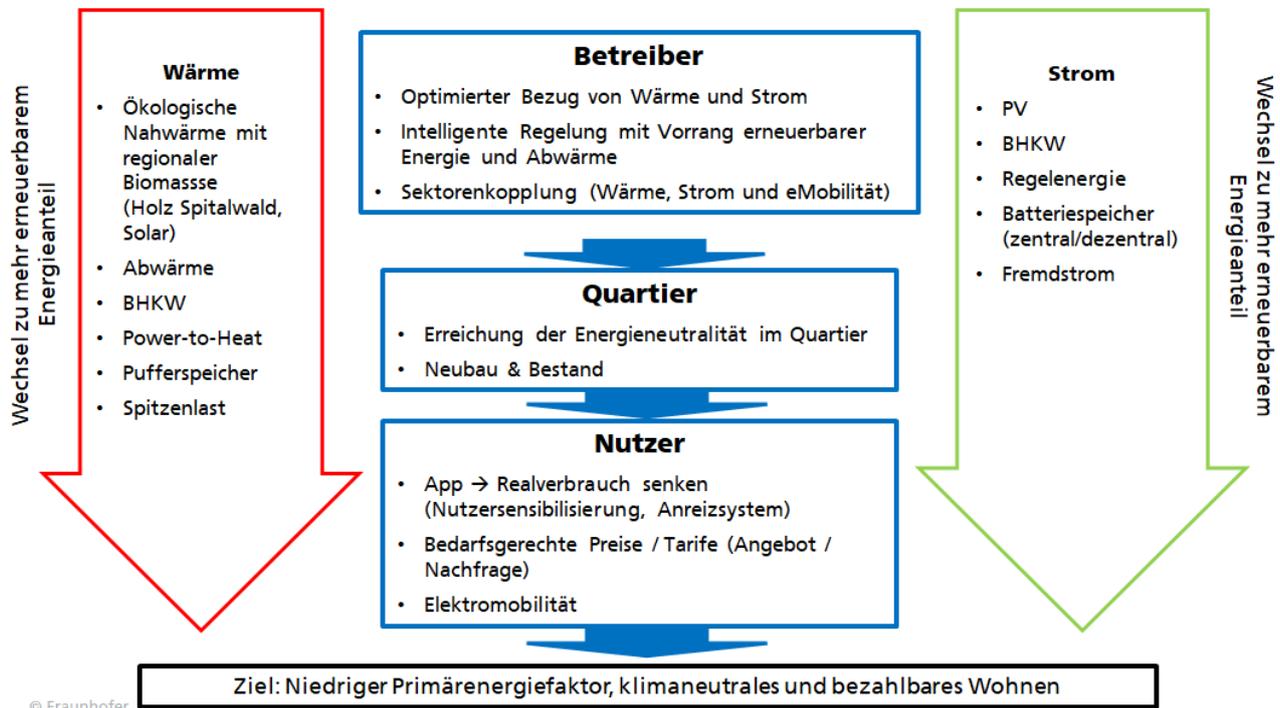
Bild 2: Energieflussschema des Projektgebiets in Überlingen



Legende:
Endenergie in MWh/a
 [THG-Emissionsfaktor] in kg/MWh
Emissionen in t CO₂/a

Das erarbeitete Gesamtenergiekonzept ist im Meilenstein M2.2.1. festgehalten.

Bild 3: Hildegarding und Schöttlisberg Überlingen – Innovatives energetisches Quartierskonzept.



2.2 Planung der innovativen Maßnahmen im Gebäudebereich, der Energieversorgung und der Informations- und Kommunikationstechnik

Die Gebäudeausführung des Neubauquartier „Schöttlisberg“ wurde im Effizienzhausstandard 40 plus geplant. Über diesen Standard hinaus wurden die Integration von Pufferspeichern, Wohnungsübergabestationen sowie die Nutzung von Batteriespeichern als Quartiersspeichern geprüft.

Pufferspeicher

Ein wesentliches Merkmal der innovativen Nahwärmeversorgung sowohl des Bestands- als auch des Neubauquartiers ist, dass das Neubauquartier aus dem Rücklauf des Bestandsquartiers versorgt werden soll. Dazu ist im Neubauquartier „Schöttlisberg“ je Wirtschaftseinheit ein Pufferspeicher sowie im Bestandsquartier „Hildegarding“ je Gebäude ein Pufferspeicher zu realisieren. Um energetische Synergien zwischen Bestandsquartier und Neubauquartier nutzen zu können, soll durch die damit erreichte Rücklaufauskühlung das Nahwärmenetz insgesamt optimiert werden. Es bestehen dabei erhebliche technische Risiken, z.B.: in der Abstimmung der Hydraulik der Wärmespeicherung sowie auch aus betriebswirtschaftlicher Sicht, z.B. in der Vertragsgestaltung mit dem Energieversorger.

Um die angedachte und konzipierte Wärmeversorgung über ein energetisch optimiertes Nahwärmenetz (3-Leiter-System) des Energieversorgers unter Einbezug des Bestandsquartiers realisieren zu können, wird im Neubauquartier die Warmwasserbereitung durch ein Trinkwasser-Speicherladesystem mit Pufferspeicher zum Netzausgleich notwendig. Durch das geplante System werden energetische

Effizienzgewinne des Gesamtsystems erwartet, da die Heizwasserrücklauftemperatur im Wärmenetz abgesenkt und die Pumpleistung zum Wärmetransport deutlich verringert werden kann.

Wohnungsübergabestationen mit dezentraler Wärmeverteilungssystem für direkte, individuelle Versorgung jeder einzelnen Wohneinheit

Entsprechend des geplanten Wärmekonzepts in Verbindung mit der Wärmeentnahme aus dem Rücklauf (Vorteil Rücklaufauskühlung) des Nahwärmenetzes sind zur Sicherstellung und zur Versorgung der Wohnungen im Neubauquartier mit der erforderlichen Heizwärme und Warmwasser gesonderte Wärmeübergabeeinheiten mit Frischwasserstationen pro Wohneinheiten erforderlich, welche ohne das innovative Energiekonzept nicht notwendig wären. Besondere Risiken sind hier in der grundsätzlichen Praxistauglichkeit und hinreichenden Energieeffizienz des Wärmeversorgungskonzepts aus der Rücklaufnutzung zu sehen.

Die angedachten und im Förderantrag beantragten Wohnungsübergabestationen wurden durch eine zentrale Warmwasserbereitungsanlage ersetzt.

Batteriespeicher als Quartierspeicher zur Optimierung der PV-Anlage bzw. des Eigenverbrauchsanteils im Quartier

Wohingegen in Einzelhaushalten Batteriespeicher zunehmend in Energieversorgungskonzepten berücksichtigt werden, gibt es auf aggregierter Nutzerebene (z.B. Gebäudeverbund im Sinne von Wirtschaftseinheiten) praktisch kaum Erfahrungen an erprobten Anlagen und Geschäftsmodellen, weshalb solche Konzepte gegenwärtig noch als besonders riskant einzustufen sind. Dies könnte daran liegen, dass bisher keine praktikablen Konzepte für eine gemeinschaftliche Nutzung auf Quartierebene vorliegen und auch im Hinblick auf Eigentümergemeinschaft und Netznutzung noch sehr viele Fragen offen sind. Ähnlich wie Carsharing hätte die gemeinschaftliche Nutzung von Quartierspeichern aber zahlreiche Vorteile, deren Realisierung durch die zunehmende Digitalisierung bei den Verbrauchern und im Energiesektor möglich und zur Senkung des gesamten Energieverbrauchs beitragen könnte. Die Vorteile ergeben sich zum einen durch Skaleneffekte, welche eine Nutzung mit geringeren Kosten pro kWh erlauben würden. Zum anderen könnte den Nutzern eine höhere effektive Kapazität zur Verfügung gestellt werden, da bei Abwesenheit die Kapazität anderer Beteiligter genutzt werden könnte. Es kann zudem angenommen werden, dass größere Gemeinschaftsspeicher leichter als eine Vielzahl kleiner Heimspeicher für die Teilnahme an Regelleistungsmärkten zu vereinigen wären.

Informations- und Kommunikationstechnik

Im Arbeitspaket 6 wurde ein Messkonzept für die Umsetzung eines Monitorings erarbeitet. Die vorgesehenen Messungen sollen durch integrierte Informations- und Kommunikationstechnik ermöglicht werden. Damit wird eine IT-technische Grundlage für eine fortlaufende Energieverbrauchsmessung und handlungsleitende, energiesparorientierte Anwendungssystemen (Quartiers-App) geschaffen.

2.3 Low-Tech-Ansätze im Neubauquartier

Innovative Hochleistungsdämmstoffe und Konstruktionsdämmstoffe

Zur Optimierung des Wärmeschutzes der gesamten Gebäudehülle (Dach, Wand, Tiefgaragen-/Decken) kommen innovative Neuentwicklungen aus Polyurethan-Hartschaum zum Einsatz. Die neuartigen Hochleistungsdämmstoffe und Konstruktionsdämmstoffe vereinen eine verbesserte Wärmeleitfähigkeit bei gleichzeitig konstruktiven Eigenschaften. Diese Kombination kann zu einer signifikant effektiveren Wohnflächenoptimierung führen. Gerade in der Kombination kann Dämmleistung und konstruktiven Merkmalen liegen Risiken, welche die dauerhafte Nutzung nach heutigem Kenntnisstand noch in Frage stellen.

Lüftungsanlage – dezentral mit Wärmerückgewinnung

Die Definition Low-Tech versucht mit möglichst wenig Technik den Betrieb von Gebäuden zu ermöglichen. Ein gewisses Mindestmaß ist zur Funktion des Gebäudes jedoch erforderlich. Im Wohngebäude sind dies vor allem die zwei Themen Heizung und Lüftung. Bei der Lüftung soll im konkreten Fall auf dezentrale Lösungen zurückgegriffen werden. Um dem Ziel von möglichst günstigem Wohnraum nachzukommen sind neben den Investitionskosten auch die Verbrauchs-/Betriebskosten in die Betrachtung mit einzubeziehen. Bei zentralen Anlagen, wie sie typischerweise eingebaut werden, wird oft mit hohen Volumenströmen nach Norm gefahren, was neben hohem Luftaustausch mit entsprechenden Wärmeverlusten auch zu einem hohen Stromverbrauch (Betriebskosten) führt. Die dezentralen Anlagen können viel stärker auf den jeweiligen Bedarf eingehen (z.B. Feuchtigkeit) und dadurch den Luftaustausch (sowie en Betriebsstrom) auf das notwendige Maß reduzieren. Da genaue und gemessene Erfahrungen des tatsächlich erforderlichen Luftwechsels nicht vorhanden sind, wird zur Sicherheit in die Gebäude eine höhere Anzahl eingebaut, die auch mit weiteren Sensoren ausgestattet sind, wie z.B. Feuchtesensoren. Dies führt im Vergleich zu den Standardvarianten zu höheren Kosten, aber auch zu Umsetzungsrisiken insbesondere im Hinblick auf die Feuchtsensoren, weshalb wir für diese Komponenten eine Förderung im Rahmen des Forschungsprojektes beantragen. Ebenfalls soll damit auch eine mögliche Schimmelproblematik im Betrieb des Gebäudes schon vom Ansatz her ausgeschlossen werden.

Zur Optimierung des Betriebs der Anlage und zur Vermeidung des Rebound-Effekts hat die Baugenossenschaft Überlingen erstmals beschlossen, im Neubauvorhaben keine Kippfunktion der Fenster zu verbauen. In Bestandsgebäuden sind sowohl im Winter, als auch im Sommer sehr häufig dauergekippte Fenster zu sehen. Das wirkt sich nicht nur negativ auf den notwendigen Luftaustausch aus, sondern hat oftmals zu Schimmel am Fenstersturz und darüber hinaus zu Algenbildung an der Fassade oberhalb des gekippten Fensters geführt.

2.4 Entwicklungskonzept Bestandsgebäude Hildegardring

Ende 2018 wurden die Arbeiten zur Grundlagenermittlung für die Sanierung und energetische Ertüchtigung des Bestandsquartiers im Hildegardring aufgenommen. Zusätzlich wurde Anfang 2019 eine Vorstudie für das Entwicklungskonzept im Hildegardring durchgeführt, die im Laufe des Jahres hinsichtlich der unterschiedlichen Varianten der Sanierung und ggf. einer Nachverdichtung weiter ausgearbeitet wurde. Dazu wurden auch die damit einhergehenden Optionen der Wärmeversorgung geprüft. Die Vorstudie für das Entwicklungskonzept der Bestandshäuser im Hildegardring wurde Anfang 2020 weitestgehend abgeschlossen und bereits erste Vorgespräche zu den baurechtlichen Möglichkeiten mit dem Stadtplanungsamt geführt. Zudem wurden es im Rahmen einer Begehung mögliche Anschlusspunkte an das Nahwärmenetz ermittelt sowie die Planungsschnittstellen definiert, sodass die Bestandsgebäude an das Nahwärmenetz des Stadtwerks am See angeschlossen werden können. In der 2. Jahreshälfte 2021 wurden weiterführende Gespräche bezüglich des städtebaulichen Konzepts im Hildegardring zwischen der Stadt Überlingen und der BGÜ geführt. Im Anschluss wurde seitens der Stadt Überlingen eine Vermessung des Gebiets beauftragt auf deren Grundlage über das weitere Vorgehen entschieden werden soll.

3 Umsetzung und Baudokumentation

3.1 Ausschreibung und Vergabe der innovativen Maßnahmen im Gebäudebereich und der Energieversorgung

Wohnungsübergabestationen mit dezentraler Wärmeverteilungssystem für direkte, individuelle Versorgung jeder einzelnen Wohneinheit

Für die Umsetzung von Wohnungsübergabestationen wurde eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung beauftragt. Zusätzlich zu den hohen Investitionskosten, geht über die Projektlaufzeit hinaus ein erheblicher jährlicher Wartungsaufwand einher, der nicht über die Förderung aufgefangen werden kann. Daher hat sich die Bauherrschaft gegen die Umsetzung von Wohnungsübergabestationen entschieden.

Batteriespeicher als Quartierspeicher zur Optimierung der PV-Anlage bzw. des Eigenverbrauchsanteils im Quartier

Zur gesteigerten Eigennutzung von selbsterzeugtem Strom aus den PV-Anlagen des Quartiers wurde die Umsetzung eines Mieterstromkonzepts in die Planung integriert. Der selbst erzeugte Strom wird bevorzugt in das Hausnetz des Gebäudes eingespeist und deckt entweder direkt den aktuellen Energieverbrauch der Mieter oder wird in die Quartiers-Batteriespeicher geladen. Gibt es überschüssigen Strom, wird dieser in das öffentliche Netz gespeist. Ein eventuell kurzfristig höherer Bedarf wird aus dem öffentlichen Netz bezogen. Mittels der Quartiers-Batteriespeicher und der damit optimierten Nutzung der PV-Anlage wird der Eigenverbrauchsanteil im Quartier verbessert. Darüber hinaus wird den Bewohnern eine weitere Möglichkeit geschaffen, aktiv an der dezentralen Energieversorgung des Quartiers teilzunehmen.

Die Ausschreibung und Vergabe der PV-Anlage, die im Mieterstromkonzept integriert wurde, und den Quartiers-Batteriespeichern wurde in enger Abstimmung zwischen den Fachplanern sowie den Projektpartnern Energieagentur Ravensburg und der Baugenossenschaft Überlingen umgesetzt.

Informations- und Kommunikationstechnik

Auf Grundlage des im AP 6 eruierten Messkonzepts wurde gemeinsam mit den Fachplanern die zur Umsetzung notwendigen Zähler ermittelt und ausgeschrieben.

Das erarbeitete Messkonzept sieht für die Erfassung des Wärme- und Wasserverbrauchs eine Messung im 15-Minuten-Intervall vor. Für diese feingranulare Messung sind an das Stromnetz angebundene Zähler notwendig, da Funkzähler nach aktuellem Stand der Technik nicht die dafür notwendige Batterieleistung aufweisen. Die Umsetzung erfolgte daher mittels M-Bus-Technik. Da hierfür eine aufwendige Verkabelung notwendig ist, konnte die wohnungsweise Ausstattung mit M-Bus aufgrund der beschränkten Fördermittel nur in 6 der 14 Neubaugebäude verbaut werden. Für die Datenerfassung des Nahwärmenetzes fand eine enge Abstimmung zwischen den Projektpartnern Stadtwerk am See und dem Fraunhofer-Institut statt. Zur Erfassung der Stromdaten wurde das Messkonzept mit dem beauftragten Messdienstleister sowie dem Elektrofachplaner abgestimmt.

Darüber hinaus wurde für die Erfassung der Wetterdaten im Quartier eine Wetterstation installiert.

Die Schnittstelle aller zu erfassenden Daten bildet ein Datenkonzentrator der in Abstimmung mit dem Fraunhoferinstitut zur Programmierung an einen externen Dienstleister vergeben wurde. Die Server-Infrastruktur wurde im Demonstrationsquartier vor Ort installiert und die Schnittstellen für die Quartiersapp und das Monitoring geschaffen.

Innovative Hochleistungs-Dämmstoffe und Konstruktionsdämmstoffe

Bei der Dämmung der gesamten Gebäudehülle (Dach, Wand, Tiefgaragen-/Decken) wurde in Abstimmung mit den Fachplanern eine innovative Neuentwicklung aus Polyurethan-Hartschaum ausgeschrieben. Die neuartigen Hochleistungs-Dämmstoffe und Konstruktionsdämmstoffe vereinen eine verbesserte Wärmeleitfähigkeit bei gleichzeitig konstruktiven Eigenschaften und der 100%igen Recyclingfähigkeit. Diese Kombination ermöglicht mit den eingesetzten innovativen Dämm Lösungen besonders schlanke Dämmschichten. Damit können im Vergleich zur Bauweise mit klassischen Dämmstoffen deutlich schlankere Konstruktionen der Gebäudehülle erzielt werden. Somit lässt sich u.a. beispielsweise ein KfW-Effizienzhausstandard mit einem effizienten Umgang von Bauland und Bodenaushub vereinbaren. Diese innovative Kombination aus hohen Dämmstandards und gleichzeitig schlanker Bauweise, kann zu einer signifikant effektiveren Wohnflächenoptimierung (d.h. maximale Ausnutzung des Baufensters) führen. Eine effiziente Grundstücksausnutzung, ausgedrückt in einem günstigen Verhältnis von Wohn-/Nutzfläche zur Grundstücksfläche, ist die Voraussetzung für die Schaffung günstigen Wohnraumes. Ebenso wird durch die innovativen Dämm Lösungen mit schwer entflammaren Dämmstoffen dem Sicherheitsbedürfnis der

Bewohner in einer hoch verdichteten Bauweise durch erhöhten Brandschutz der gesamten Gebäudehülle Rechnung getragen.

Rein rechnerisch betrachtet, kann die positive Wirkung der Effizienzmaßnahmen beispielsweise anhand des U-Werts dargestellt werden. Die innovativen Hochleistungs-dämmstoffe und Konstruktionsdämmstoffe aus Polyurethan-Hartschaum verfügen über deren konstruktiven Vorteile (Stabilität, Druckbelastung, Brandschutz) hinaus auch über eine niedrigere Wärmeleitfähigkeit. Bei unveränderten Dämmstoffstärken gegenüber der Verwendung klassischer Dämmstoffe führt dies zu einer U-Wert Verbesserung im Bauteil. Die nachfolgende Tabelle stellt die U-Werte der innovativen Produkte dem der klassischen Bauweise gegenüber und zeigt somit bei gleicher Stärke des Bauteils den Effizienzgewinn anhand der U-Wert Verbesserung des Bauteils auf:

Bild 4: Dämmstoff-Vergleich mit Effizienzgewinn (Siehe Anlage)

Dämmstoff-Vergleich mit Effizienzgewinn:												
Tiefgaragendecke												
		Polyurethan: Dämmelement puren TG					Klassische Dämmweise: Tektalan bzw. Heraklith					U-Wert-Verbesserung
	m ²	Stärke mm	m ²	λ _g W/(m·K)	R _g m ² ·KW	U W/m ² ·K	Stärke [mm]	m ²	λ _g W/(m·K)	R _g m ² ·KW	U W/m ² ·K	W/(m ² ·K)
Summe	3.700	140	518	0,026	5,38	0,18	140	518	0,10 / 0,04	3,60	0,27	0,09
Fassade / WDVS												
		Polyurethan: purenotherm S					Klassische Dämmweise: Styropor-Fassadendämmplatte EPS-F					U-Wert-Verbesserung
	m ²	Stärke mm	m ²	λ _g W/(m·K)	R _g m ² ·KW	U W/m ² ·K	Stärke [mm]	m ²	λ _g W/(m·K)	R _g m ² ·KW	U W/m ² ·K	W/(m ² ·K)
Summe	10.580	180	1904	0,024	7,50	0,13	180	1904,4	0,031	5,80	0,17	0,04
Decke unten												
		Polyurethan: purenotherm S					Klassische Dämmweise: Styropor-Fassadendämmplatte EPS-F					U-Wert-Verbesserung
	m ²	Stärke mm	m ²	λ _g W/(m·K)	R _g m ² ·KW	U W/m ² ·K	Stärke [mm]	m ²	λ _g W/(m·K)	R _g m ² ·KW	U W/m ² ·K	W/(m ² ·K)
Summe	570	140	80	0,024	5,83	0,17	140	79,8	0,031	4,51	0,22	0,05
Flachdach (incl. Gefälle)												
		Polyurethan: puren Secure, puren Gefälle PIR Class C					Klassische Dämmweise: Styropor-Deckendämmplatte EPS 035					U-Wert-Verbesserung
	m ²	Stärke mm	m ²	λ _g W/(m·K)	R _g m ² ·KW	U W/m ² ·K	Stärke [mm]	m ²	λ _g W/(m·K)	R _g m ² ·KW	U W/m ² ·K	W/(m ² ·K)
Summe	4.770	240	1145	0,026	9,23	0,11	240	1144,8	0,035	6,85	0,14	0,04
Kellerdecke												
		Polyurethan: puren TG, puren PIR Class C					Klassische Dämmweise: Styropor-Deckendämmplatte EPS 035 DI					U-Wert-Verbesserung
	m ²	Stärke mm	m ²	λ _g W/(m·K)	R _g m ² ·KW	U W/m ² ·K	Stärke [mm]	m ²	λ _g W/(m·K)	R _g m ² ·KW	U W/m ² ·K	W/(m ² ·K)
Summe	2.470	140	346	0,026	5,38	0,18	140	345,8	0,035	4,00	0,24	0,06
Attika												
	lfm	Polyurethan: purenit Attikaelement C					Klassische Dämmweise: Attika in Beton-/Holzbauweise					Psi-Wert-Verbesserung
		Ψ W/m·K					Ψ W/m·K					W/(m·K)
Summe	1.120	-0,01					0,24					0,25

Lüftungsanlage – dezentral mit Wärmerückgewinnung

Die zum Einsatz kommenden innovativen Lüftungsanlagen haben einen besseren Wärmerückgewinnungsgrad und eine bessere Elektroeffizienz als Standardgeräte. Des Weiteren soll diese Lüftungsanlage eine bedarfsgeführte, kontrollierte Wohnraumlüftung ermöglichen. Zur Vorbereitung der Ausschreibung wurde ein Vergleich verschiedener Varianten bei den Fachplanern beauftragt.

Lüftungsanlagen, „bluMartin“ / z. B. Standard-Gerät „Lunos“:

- 1.) „bluMartin“ hat den besseren Wärmerückgewinnungsgrad 87%; „Lunos“ – 85% (siehe Anlage Datenblatt „bluMartin“).
- 2.) Die Elektroeffizienz ist von „bluMartin“ ist deutlich besser 0,26 Wh/m³; „Lunos“ – 0,28 (siehe Anlage Datenblatt „Lunos“).
- 3.) Die Lüftungsanlagen von „bluMartin“ realisieren eine bedarfsgeführte, kontrollierte Wohnraumlüftung. Sie basieren auf Gegenstrom-Wärmetauscher in Verbindung mit 8 Sensoren pro Gerät, die Temperaturen, die Luftfeuchtigkeit und den CO₂-Gehalt erfassen und den Zustrom an frischer Luft sowie die Abluft automatisch und exakt nach Bedarf regeln. D.h. die Lüftungsgeräte von „bluMartin“ sind konzipiert in der niedrigsten Stufe zu laufen. Bei „Lunos E²“-Geräten wird die Lüftungsstufe manuell eingestellt und in der Regel laufen die Geräte in dieser Stufe 24 h/Tag, was automatisch zu einem deutlich höheren Energieverbrauch führt.

4.) Durchdringung der thermischen Hülle: z. B. 2 Zimmer-Wohnung (60-70 m²) mit innenliegender Kochnische und Bad: „bluMartin“ – eine Durchdringung; „Lunos“ – vier Durchdringungen durch die Außenwand + zwei durch die Decke (für Entlüftung der Kochnische und des Bades). Mit dem geplanten innovativen Lüftungssystem wird die hocheffiziente thermische Gebäudehülle nur einmal durchdrungen und schwächt diese damit deutlich weniger als eine Standardanlage.

Energieversorgung - Nahwärmenetz

Zum Jahreswechsel 2018/2019 hat das Stadtwerk am See ein ganzheitliches Konzept der Wärmeversorgung des Neubau- und Bestandsgebiets ausgearbeitet und ist in die Ausführungsplanung eingestiegen. Zur Erhöhung der Nutzung lokaler erneuerbarer Energien sollen Solarwärme und städtische Biomasse als Wärmequelle für das Nahwärmenetz eingebunden werden. Neben dem Zusammenspiel zweier Grundlasterzeuger, Solarthermie-Anlage und Holzhackschnitzelheizkessel, ist der Kern des Forschungsprojekts die Einbindung der Anschlussnehmer über ein Drei-Leiter-Nahwärmenetz. Der Rücklauf der Bestandsgebäude wird dabei aufgrund des hohen noch vorhandenen Temperaturniveaus zum Vorlauf für die Flächenheizungen in den Neubauten. Um jederzeit die Versorgung der Neubauten zu gewährleisten, wird ein dritter, heißer Leiter, mitverlegt, der bei Bedarf das benötigte Temperaturniveau liefert. Anfängliche Überlegungen zur Umsetzung von Power-to-Heat wurden verworfen. Zudem wurde ein übergeordnetes Messkonzept des Nahwärmenetzes erstellt.

Bedingung für die Förderung der Nahwärmeversorgung (Netz, Hausübergabestationen und MSR-Technik) durch das Bundesministerium über den PtJ war, dass ein positiver Förderbescheid der KfW für die Solarthermie-Anlage vorliegt. Hierfür wurde die Solarthermie-Anlage ausgeschrieben, Bietergespräche geführt und Angebote eingeholt. Anschließend konnte der Förderantrag bei der KfW eingereicht werden. Dies mündete in einem positiven Bescheid der KfW im August 2020. Zudem hat der Gemeinderat der Stadt Überlingen in seiner Sitzung am 01.07.2020 den Aufstellungsbeschluss für das Bebauungsplanverfahren zur Schaffung von Bau und Planungsrecht für ein Sondergebiet „Solarthermie“ gefasst. Der Austausch des Holzhackschnitzelheizkessels und der Erdgasspitzenlastkessel ist nicht Teil des Förderprojektes und wird vom Stadtwerk am See eigenständig finanziert.

Durch die geschaffene Planungssicherheit von Stadt, Fördermittelgeber und Anschlussnehmer durch geschlossene Wärmelieferverträge auf der einen Seite und der Finanzierung der nicht geförderten Bestandteile durch das Stadtwerk am See auf der anderen Seite konnten die Ausschreibungen für die Arbeiten im Bereich Energiezentrale und Nahwärmenetz erstellt und versandt werden. Auf die unterschiedlichen Firmen, die beauftragt wurden, wird hier nicht eingegangen. Die Ergebnisse der Auswahl sind in Kapitel 3.2 zu den Ausführungen der Arbeiten zu finden.

3.2 Ausführung und Bauüberwachung der innovativen Anteile im Gebäudebereich und der Energieversorgung

Die Umsetzung des Neubauvorhabens erfolgt in drei Bauabschnitten. Aus diesem Grund erfolgt die Inbetriebnahme der einzelnen energetischen sowie gebäudetechnischen Anlagen jeweils mit Fertigstellung der einzelnen Wirtschaftseinheiten.

Im Juni 2018 wurde die Baugenehmigung für den 1. Bauabschnitt des Neubauquartiers (6 Wohnhäuser mit 81 Wohneinheiten) erteilt. Folglich wurde die Werk- und Detailplanung begonnen, inkl. der Planung der innovativen, hocheffizienten Gebäudehülle, sowie der Energie- und Haustechnik für die Wohnhäuser. Zur Optimierung der Details der hocheffizienten Gebäudehülle wurden Dach- und Fensteranschlüsse erarbeitet.

Am 06.09.2018 erfolgte im Rahmen einer medienwirksamen Veranstaltung mit Beteiligung von Abgeordneten aus dem Bundestag und Landtag von Baden-Württemberg der Spatenstich für den 1. Bauabschnitt. Mit den Rohbauarbeiten wurde im November 2018 begonnen. In der 1. Jahreshälfte 2019 erfolgte die Ausschreibung und die Vergabe der innovativen Maßnahmen im Gebäudebereich und der Energieversorgung, sodass Ende 2019 bereits ein großer Teil der innovativen Gebäudehülle des 1. Bauabschnitts angebracht werden konnte. Darüber hinaus wurden auch die ersten Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung verbaut (Rohbauarbeiten)

und der Hochleistungsdämmstoff der Häuser 9, 11 und 13 armiert und grundiert, so dass teilweise bereits das Farbkonzept des Architekten umgesetzt werden konnte. Im Inneren wurde bei 3 Häusern die Rohinstallation abgeschlossen und mit den Estricharbeiten begonnen. In der ersten Jahreshälfte 2020 wurde die hocheffiziente Gebäudehülle sowie die Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung vollständig im 1. Bauabschnitt angebracht bzw. verbaut.

Bild 5: Fassadendämmung mit besonders schlanker Ausführung. Stand 08/2020.



Bild 6: Tiefgaragendeckendämmung, die zur effizienten Verlegung direkt in die Schalung eingelegt werden kann. Stand 08/2020

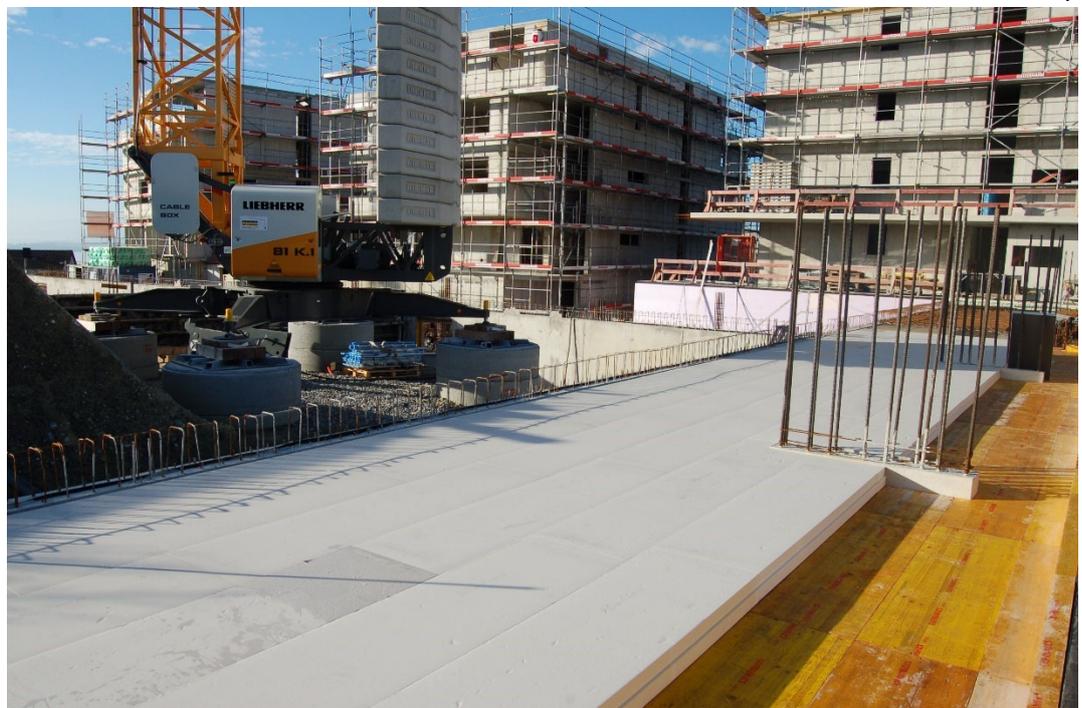


Bild 7: Innovative Attikaausprägung für einen wärmebrückenfreien Dachrandabschluss. Stand 08/2020.



Bild 8: Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung.



Die für das Messkonzept im Arbeitspaket 6 notwendigen Installationen in den einzelnen Wohnungen wurden im 1. Bauabschnitt vollständig umgesetzt. Darüber hinaus wurde der Server für die Verarbeitung der Messdaten vorbereitet.

Energieversorgung - Nahwärmenetz

In der ersten Jahreshälfte 2020 hat das Stadtwerk am See mit dem Bau des innovativen 3-Leiter-Nahwärmenetzes und der Umsetzung erster Arbeiten in der Energiezentrale begonnen. Im Herbst 2020 wurde der 1. Bauabschnitt der BGÜ-Neubauten erfolgreich an das 3-Leiter-Nahwärmenetz angeschlossen und wird seitdem zuverlässig mit Nahwärme versorgt. Darüber hinaus wurde die Anbindung des ersten Bestandsgebäudes (Im Hildegardring 36) an das Nahwärmenetz beauftragt und umgesetzt. WEG Haus 36 ist seit dem 20.01.2021 am Netz und wird mit Wärme versorgt. Für den Bauabschnitt II bei den Neubauten wurde der Hausanschluss hergestellt. Zudem wurde bereits der Hausanschluss für den BA III für die zukünftige Versorgung hergestellt. Parallel lief die Planung für den Anschluss der weiteren Bestandsgebäude. Für das Jahr 2022 war geplant, die Bestandsgebäude der BGÜ und weiterer WEG im Hildegardring und in der Christian-Lahusen-Straße sukzessive an das Drei-Leiter-Nahwärmenetz anzuschließen. Der Gestattungsvertrag für den Anschluss der weiteren Bestandsgebäude konnte jedoch erst im Juni 2022 final abgestimmt und unterschrieben werden. Zudem konnten die Pläne in Zusammenhang mit der Nachverdichtung weiter konkretisiert werden. Auf Basis dessen, erfolgte Ende Juni/Anfang Juli die Ausschreibung des Ringschlusses und der Anschlüsse der Bestandsgebäude, mit dem Ziel der Umsetzung noch im Jahr 2022. Im Ergebnis gab es nur ein Angebot eines Rohrleitungsbauers. Für den Tiefbau wurde kein Angebot abgegeben. Die Firmen sind für das Jahr 2022 bereits voll mit Aufträgen. Eine mögliche Lösung könnte sein, den Ausführungszeitraum zu öffnen, um so Angebote zu erhalten. In letzter Konsequenz bedeutet dies, dass die Hausanschlüsse für die Bestandsgebäude und der Ringschluss im Projektzeitraum bis 28.02.2023 nicht umgesetzt werden konnte. In Bezug auf die Anschlüsse weiterer Anschlussnehmer im Nahwärmenetz wurde im zweiten Halbjahr 2022 vor allem die Ausschreibung und Vergabe der Arbeiten für den Anschluss der Bestandsgebäude vorangetrieben und abgeschlossen, sodass nun im Frühjahr 2023 mit dem Bau begonnen werden kann. Im Neubau wird seit August 2022 Schendel Wohnbau versorgt (zunächst als Bauheizung; das Gebäude ist aber vollständig ans Netz angeschlossen). Zudem ist der 3. Bauabschnitt der BGÜ seit Juli 2022 am Netz. Dies entsprach jedoch nicht dem geplanten Baufortschritt. Konkret bedeutet dies, dass die geplanten Rückläufe aus dem Bestandsquartier Stand 28.02.2023 nicht zur Verfügung standen und der Beitrag des Drei-Leiter-Nahwärmenetzes demnach nicht messbar ist. Aufgrund des Forschungscharakters und den damit verbundenen erhöhten Investitionskosten war es wirtschaftlich für das Stadtwerk am See nicht darstellbar, die Leitung nach Ablauf des Projektzeitraums ohne Förderung zu bauen. Einem Verlängerungsantrag wurde stattgegeben, sodass die Arbeiten weiterlaufen konnten.

Parallel liefen im Jahr 2022 die Arbeiten an der Solarthermie-Anlage, sowie zum Austausch des Holzhackschnitzelheizkessels und der Erdgas-Spitzenlastkessel.

Durch die Verlängerung des Projektes um ein Jahr bis zum 29.02.2024 konnten die Arbeiten im Nahwärmenetz fortgeführt werden. Die Ergebnisse sind in Kapitel 3.3 dargestellt.

Energieversorgung - Stromversorgung

Die Batteriespeicher im 1. und 2. Bauabschnitt konnten nun Anfang des Jahres nach Lieferschwierigkeiten eingebaut und in Betrieb genommen werden. Auch

der Speicher für den 3. BA wurde Ende 2022 eingebaut und wird zum Jahresbeginn 2023 in Betrieb genommen. Mit der geplanten Fertigstellung der PV-Anlage kann dieser dann auch zeitgleich in Betrieb gehen. Anfang 2019 fanden erste Gespräche über Umsetzungsmöglichkeiten von Mieterstrom im Quartier statt. Nach erfolgreicher Verhandlung und Vorplanung wurden im März 2020 die Verträge zur Umsetzung des Mieterstrommodells unterzeichnet, sodass mit der Detailplanung bzw. Umsetzung im ersten Bauabschnitt begonnen werden konnte. Nach dem Einzug der ersten Mieter im Herbst wird das über den Projektantrag hinausgehende Mieterstrommodell sehr gut von den Bewohnern angenommen.

3.3 Inbetriebnahme der innovativen Anteile im Gebäudebereich und der Energieversorgung

Inbetriebnahme des Solarthermiefeld

Der Bau der Solarthermie-Anlage hatte sich auf Grund des Genehmigungsverfahrens, welches erst im Anschluss an den Versand der Zuwendungsbescheide im Januar 2020 gestartet werden konnte, verschoben. Dabei handelte es sich um einen förmlichen Prozess, welcher einzuhalten ist. Für die Solarthermie-Anlage lag seit 17.11.2021 die Baugenehmigung vor. Nach Verhandlungen mit den ausführenden Firmen erfolgte der Bau der Solarthermie-Anlage im Jahr 2022. Im März 2023 konnte, mit Beginn der frostfreien Zeit, der Probetrieb aufgenommen werden. Der erfolgreiche Start der Anlage wurde am 13.05.2023 mit einem Tag der offenen Tür gefeiert, zu dem Lokalpolitiker, Projektpartner und interessierte Bürger eingeladen waren. Nach dem ersten Betriebsjahr kann als Ergebnis festgehalten werden, dass die Solarthermie-Anlage bereits die prognostizierte Wärmemenge geliefert hat und das obwohl es nicht um ein vollständiges Betriebsjahr handelt. Es wird erwartet, dass die Anlage beim vollständigen Betrieb über ein Jahr die geplante Jahresmenge übertrifft. Konkret bedeutet dies, dass ca. 20 % der jährlich erzeugten Wärmemenge in der Energiezentrale aus der Sonne gewonnen wird, in den Monaten Juni, Juli und August sind es über 85 % Deckungsanteil.

Anschluss an das Nahwärmenetz

Die Hausanschlüsse zu den Bestandsgebäuden der Baugenossenschaft Überlingen wurden verlegt und mit Ausnahme eines Hauses alle Gebäude während der Projektlaufzeit angeschlossen. Der Anschluss des verbleibenden Gebäudes erfolgt befindet sich in der Umsetzungsphase. Bei den verbleibenden fünf Objekten wurde mit Ausnahme eines Hauses, bei allen mind. Hausanschlussstutzen verlegt, sodass ein späterer Anschluss vorbereitet wurde. Mit dem verbleibenden Objekt laufen die Gespräche weiter. Darüber hinaus konnten zwei zusätzliche Objekte bereits angeschlossen und versorgt werden. Begleitet wurde dies durch abschließende Arbeiten in Bezug auf das Messkonzept.

Die 14 Neubaugebäude der Baugenossenschaft Überlingen, sowie die daran angrenzenden weiteren 4 Neubauten des privaten Bauträgers wurden jeweils nach Baufortschritt angeschlossen.

Inbetriebnahme der technischen Anlagen

Die Lüftungsanlagen wurden Zug um Zug mit Fertigstellung der einzelnen Gebäude in Betrieb genommen. Zur Sicherstellung eines zuverlässigen Betriebs war nachträglich die Installation eines Softwareupdates in allen Wohnungen sowie einzelne manuelle Nachkonfigurationen notwendig. Eine Auswertung der Anlagendaten konnte daher während der Projektlaufzeit noch nicht stattfinden. Die Baugenossenschaft Überlingen hat im Neubauprojekt keine Kippfunktion in den Fenstern verbaut. Mit einer Auswertung der Anlagendaten in Verbindung mit den Energieverbrauchsdaten kann eine Bewertung dieser Maßnahme stattfinden, die bei positivem Ergebnis auch für weitere Projekte übertragen werden könnte.

Die verbaute M-Bus Messtechnik zur Erfassung der Wärmemengen und des Wasserverbrauchs wurde ebenfalls nach Baufortschritt in Betrieb genommen und die Verbindung zum Datenserver wurde hergestellt. Zur Sicherstellung einer zuverlässigen Kommunikation der Gateways für die Erfassung sämtlicher Zählerdaten ist eine erneute Konfiguration der Gateways notwendig, da sich im laufenden Betrieb eine Wechselwirkung der Geräte herausgestellt hat, die eine unvollständige Datenerfassung verursacht. Die vollständige Einbindung der Stromzähler konnte aufgrund der Abhängigkeit von Subunternehmen des Messstellenbetreibers nicht während der Projektlaufzeit nicht umgesetzt werden, wird aber zur Ermöglichung eines nachträglichen Monitorings weiterverfolgt. Die im Herzen des Quartiers installierte Wetterstation wurde zum Jahresbeginn 2023 in Betrieb genommen. Im Juli 2023 konnte die Kommunikation der Wetterstation mit dem Datenserver hergestellt werden. Aufgrund eines anschließenden Defekts ist für Anfang 2024 eine Reparatur und gegebenenfalls eine Verbesserung der Standortbedingungen zur Sicherstellung eines zuverlässigen Betriebs notwendig.

Der Start des Mieterstromkonzepts erfolgte ebenfalls entsprechend der Fertigstellung der Bauabschnitte mit Inbetriebnahme der Photovoltaikanlagen. Die Batteriespeicher des ersten und zweiten Bauabschnitts standen aufgrund von Liefer-schwierigkeiten erst im Frühjahr 2022 zur Verfügung, der Speicher des dritten Bauabschnitts konnte planmäßig zum Jahresbeginn 2023 in Betrieb genommen werden.

4 Wissenschaftliche Begleitung der Gebäudehülle

Die wissenschaftliche Begleitung der Gebäudehülle umfasste die folgenden zwei Aspekte. Im ersten Abschnitt werden vier konstruktive Details hinsichtlich ihrer Wärmebrückenwirkung betrachtet. Vom Istzustand ausgehend wurden dann jeweils zwei Variationen der Konstruktion simuliert und bewertet, um zukünftig für das Bausystem aus PU-Hartschaum noch weiter optimierte Konstruktionsdetails auszuarbeiten. Im zweiten Teil wurde einerseits ein Vergleich des verbauten Dämmstoffs und die damit einhergehenden Außenwandstärken mit anderen handelsüblichen Dämmstoffen verglichen. Hier wurden die Wohn- und Nutzflächen betrachtet, welche bei Einsatz unterschiedlicher Dämmstärken variieren. Andererseits wurde die Konstruktion auf ein typisches Mehrfamilienhaus übertragen und eine vergleichende Ökobilanz erstellt. Hier wurden zur ausgeführten Schichtenfolge ebenfalls zwei zusätzliche Varianten gerechnet, die andere handelsübliche Dämmstoffe als Dämmschicht verwenden. Die Ökobilanz ermöglicht damit einen Vergleich der Dämmstoffe auf Basis des Treibhauspotenzials und eine Einordnung im Bezug zum Gesamtgebäude. In diesem Zuge wurden auch die

Wohn- und Nutzflächen betrachtet, welche bei Einsatz unterschiedlicher Dämmstärken variieren.

4.1 Thermische Analyse der Gebäudehülle

Die Gebäudehülle besteht aus einem mehrschichtigen Aufbau. Jede Lage ist für einzelne Funktionen optimiert. Während die Wandfarbe überwiegend für die optische Gestaltung eingesetzt wird, übernimmt der Innenputz neben der Oberflächengestaltung auch die Aufgabe der luftdichten Schicht. Der Stahlbeton bildet das Tragwerk und der Dämmstoff sorgt für eine Erhöhung des Wärmedurchgangswiderstands. Damit stellt dieser die thermische Trennung zwischen Innenraum und Außenraum dar. Der außenliegende WDVS-Putz schützt den Dämmstoff vor Nässe und Solarstrahlung sowie mechanischer Beschädigung und trägt zur Gestaltung des äußeren Erscheinungsbilds bei. In diesem Kapitel werden die thermischen Eigenschaften einzelner Hüllkonstruktionen genauer betrachtet. Untersucht werden dabei die aufwändigeren Details wie Anschlüsse, Übergänge und Durchdringungen. Diese sind konstruktiv bedingte Schwachstellen in der thermischen Trennschicht der Gebäudehülle und wirken damit als Wärmebrücken. Neben dem erhöhten Wärmeverlust entstehen im Bereich von Wärmebrücken oftmals auch Bauschäden, bspw. Feuchteschäden aufgrund von Tauwasseranfall oder Kapillarkondensation, die zu Schimmelpilzwachstum führen können. Ursächlich ist dafür der erhöhte Abfluss von Wärme an der Wärmebrücke, der zu einer Verringerung der Oberflächentemperatur führt. Infolgedessen kann es zu lokal erhöhter Luftfeuchte oder bei Erreichen der Sättigung zur Kondensatbildung kommen, was dann als Tauwasser bezeichnet wird. Dabei tritt in oberflächennahen Kapillaren mineralischer Baustoffe oft schon Kondensatbildung auf, ohne dass der Taupunkt an der Oberfläche unterschritten wird. Folge von hoher Luftfeuchte oder Tauwasser kann Schimmelwachstum sein. Der Schimmel führt zu hygienischen und optischen Beeinträchtigungen.

Bei der Berechnung der energetischen Qualität des Gebäudes sind die Energieverluste über Wärmebrücken nicht zu vernachlässigen. Diese können sowohl Punkt als auch linienförmig auftreten. Punktförmige Wärmebrücken können in der Regel vernachlässigt werden. Es sei denn, diese treten regelmäßig auf z. B. Dübel im WDVS. Hier werden sie über die Zulassung gegebenenfalls im U-Wert des Dämmsystems berücksichtigt. Linienförmige

Wärmebrücken sind im GEG-Nachweis auszuweisen und in die Gesamtbilanz einzubeziehen. Die linearen Wärmedurchgangskoeffizienten (PSI-Werte) werden hier für Konstruktionsausschnitte über Simulation bestimmt oder aus Wärmebrückenkatalogen abgelesen.

Für dieses Projekt werden vier Details genauer betrachtet und je zwei zusätzliche Varianten untersucht. Die Wärmebrücken der folgenden Details werden simuliert:

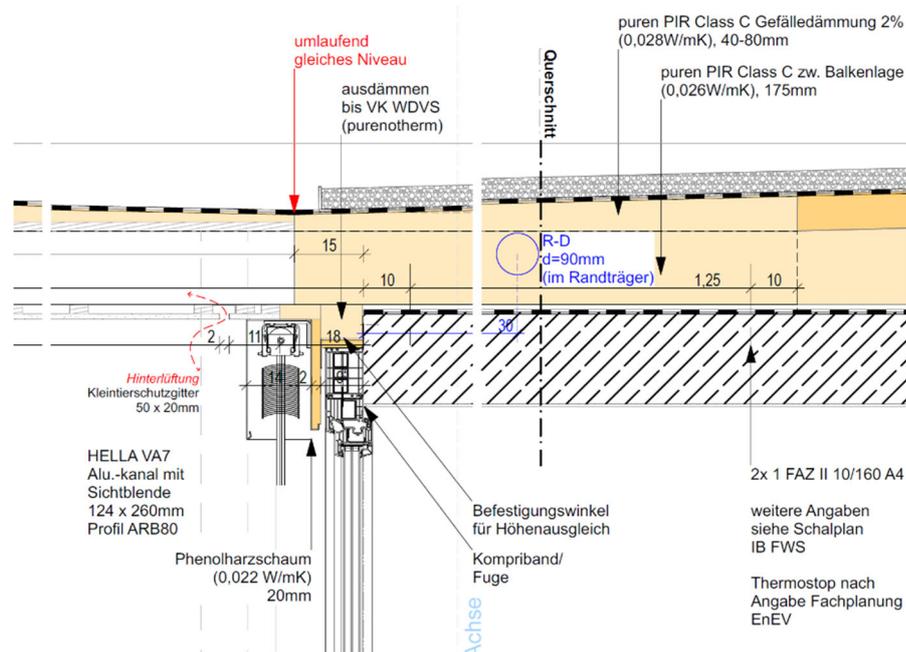
- Stützen- und Wandanschlüsse der Tiefgaragendecke (mit Unterzügen)
- Fensteranschlüsse mit Rahmenverbreiterung an die Tragkonstruktion aus Stahlbeton
- Ausbildung des Dachrands (bzw. der Attika) mit verschiedenen Dämmstoffen
- Kreuzpunkt im Übergang von Tiefgarage/Keller/Wohnraum und Außenraum

Die zweilagige Gefälledämmung des Flachdachs wird ebenfalls untersucht und hinsichtlich ihres Wärmedurchgangs bewertet, obwohl sie im klassischen Sinne keine Wärmebrücke darstellt. Die Bewertung ist aber wichtig, um die daran anschließenden Bauteilanschlüsse (z. B. Dachkante oder Fenstersturz) richtig bewerten zu können.

Für die Untersuchung wurden diese vier Details in „COMSOL Multiphysics“ [COMSOL 2023] bzw. mit „WINISO“ [Sommer Informatik] mit der Finite-Elemente-Methode (FEM) modelliert. Die Berechnungen enthalten den U-Wert der Bauteile sowie den längenbezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten (ψ -Wert) und die Temperaturverteilungen/Isothermen. Neben den ausgeführten Details sind auch weitere Varianten des Ausgangszustands betrachtet worden.

Dachrand mit Auskragung und Fensteranschluss

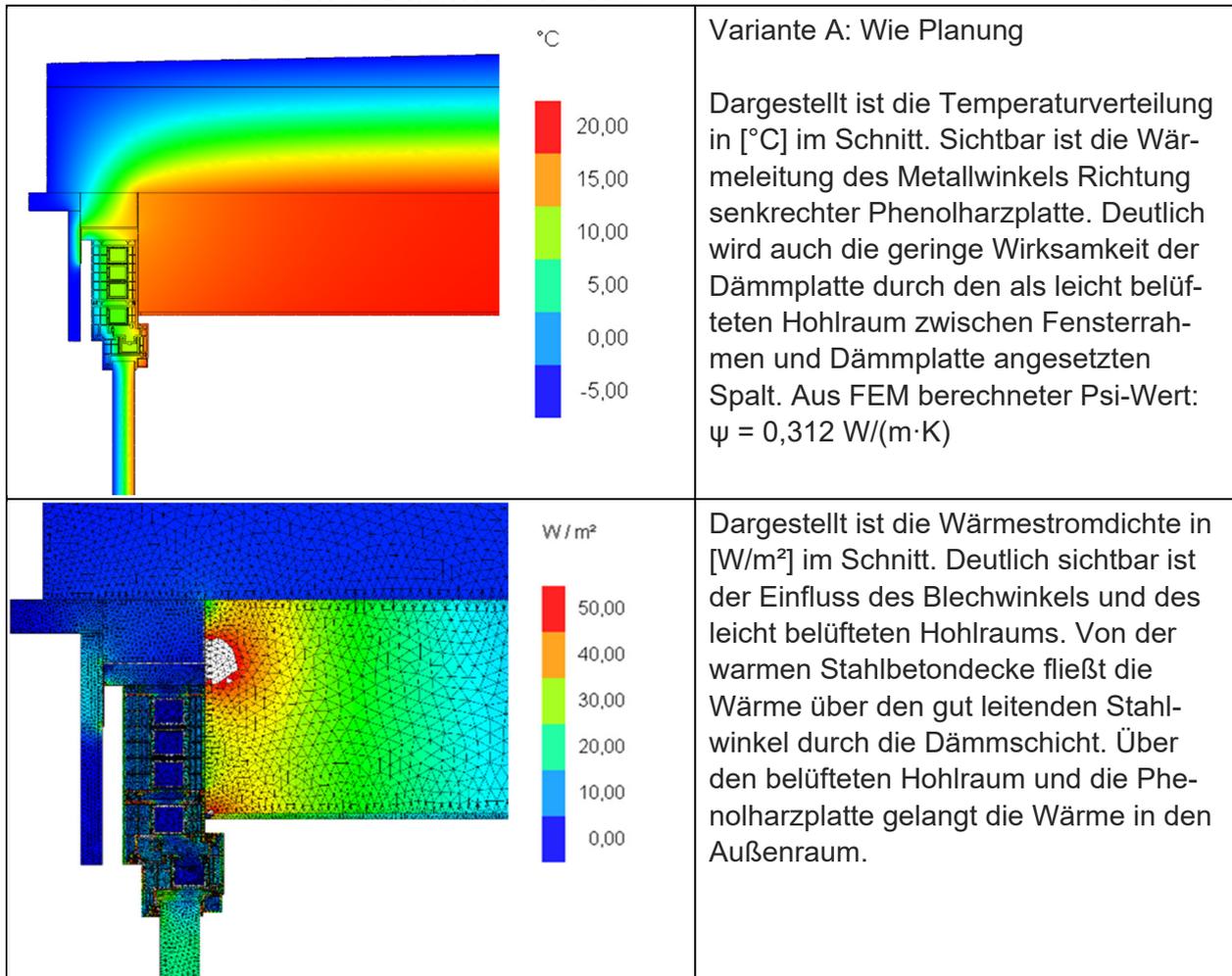
Bild 9: Detailzeichnung [m67 Schlüter Metzger Architekten] des auskragenden Sonnenschutzes am Dachrand mit Fensteranschluss an die Stahlbetondecke und vorgehängtem Raffstorekasten.



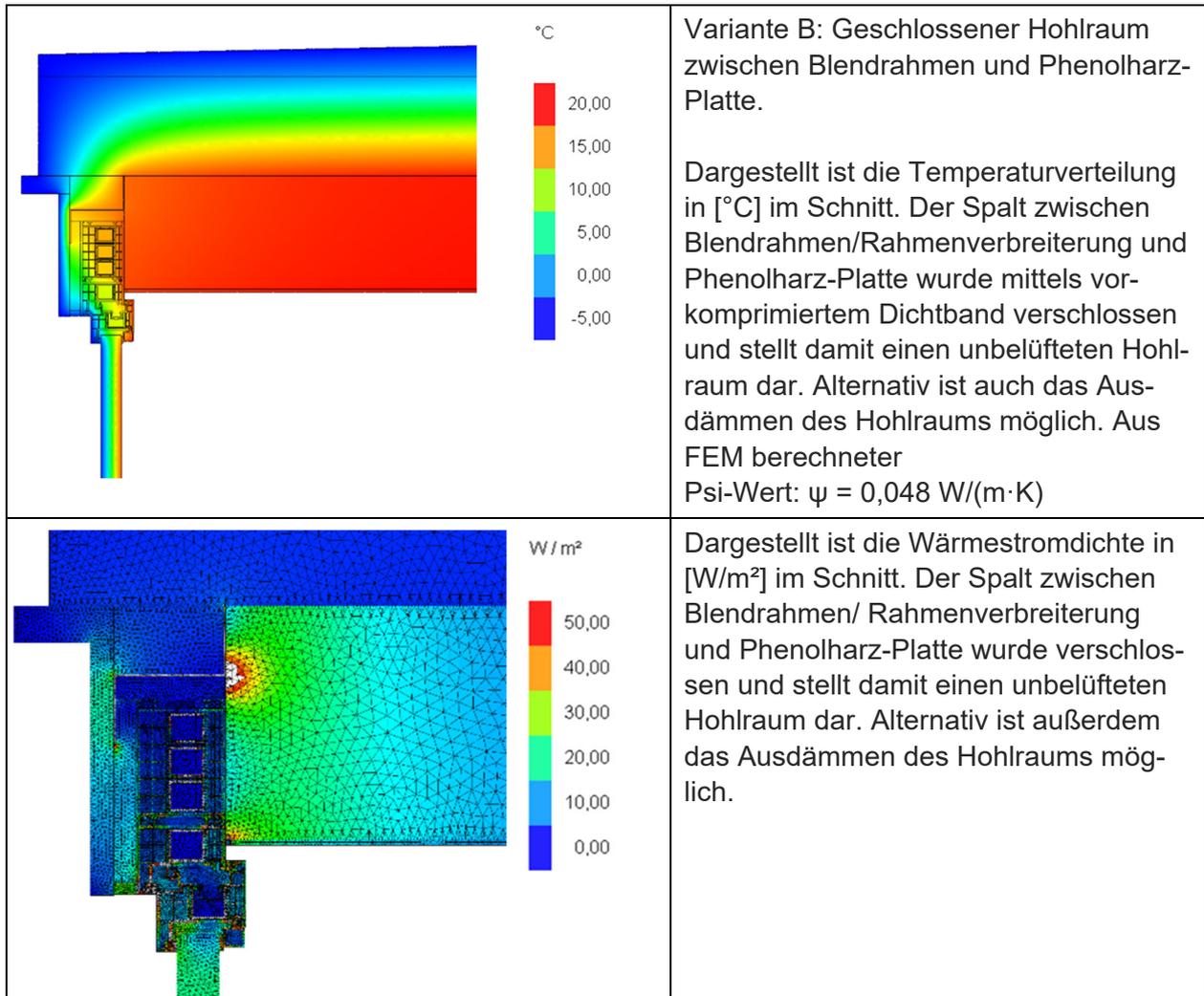
<p>Deckenaufbau mit Stahlbetondecke und zweilagiger Dämmung puren PIR zwischen den Sparren welche den auskragenden Sonnenschutz tragen und einer darüberliegenden Gefälledämmung mit 2 %. Schnitt im Gefach.</p> <p>Mithilfe von FEM bis zum Wechsel der Gefälledämmung (ca. 1,35 m von der Gebäudekante).</p>	<p>U-Wert Fenster mit Rahmenverbreiterung (für den 2D-Schnitt) aus Planung. Fensterprofil mit Rahmenverbreiterung mit einem aus der FE-Methode berechneten U-Wert für das Fenster von: $U_w = 0,91 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$. Die Rahmenverbreiterung liegt außerhalb der Rohbauöffnung und müsste nicht im U_w-Wert berücksichtigt werden. Der U_w-Wert wäre dann $U_w = 0,88 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$. Vermutlich enthält die von der Einbausituation losgelöste U-Wert-Berechnung für das Fenster aber die Rahmenverbreiterung. Deshalb wird hier der U-Wert mit Rahmenverbreiterung angesetzt: $U_w = 0,91 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$.</p>

Für die Beurteilung der Ergebnisse aus den Wärmebrücken Berechnungen sind folgende Randbedingungen zu berücksichtigen. Der U-Wert für das Flachdach mit Gefälledämmung wird für die Modellbreite bestimmt und ist vermutlich etwas größer als der U-Wert für den ganzen Dachabschnitt, weil nur der äußere Rand der Gefälledämmung betrachtet wird. D. h. die Dachdämmung wird zum einen nach innen noch dicker und zum anderen wechselt die Gefälledämmung nach unten und für die obere Lage wechselt das Material auf puren secure, welches eine minimal geringere Wärmeleitfähigkeit hat als die obere Lage im Randbereich aus puren PIR C. Als Gebäudeaußenkante wird die Außenseite der Phenolharzschaum-Platte festgelegt. Für die Fenstermodellierung wird das Referenz-Fenster aus DIN 4108 Beiblatt 2 [DIN 4108] angesetzt. Das reale Fenster wird nicht mit seiner tatsächlichen Breite angesetzt. Der Spalt zwischen Blendrahmen/ Rahmenverbreiterung und Phenolharzschaum-Platte wird als leicht belüfteter Hohlraum angenommen. Die genaue Höhe der Überlappung, Rahmenverbreiterung und Deckenstirnseite ist nicht bekannt.

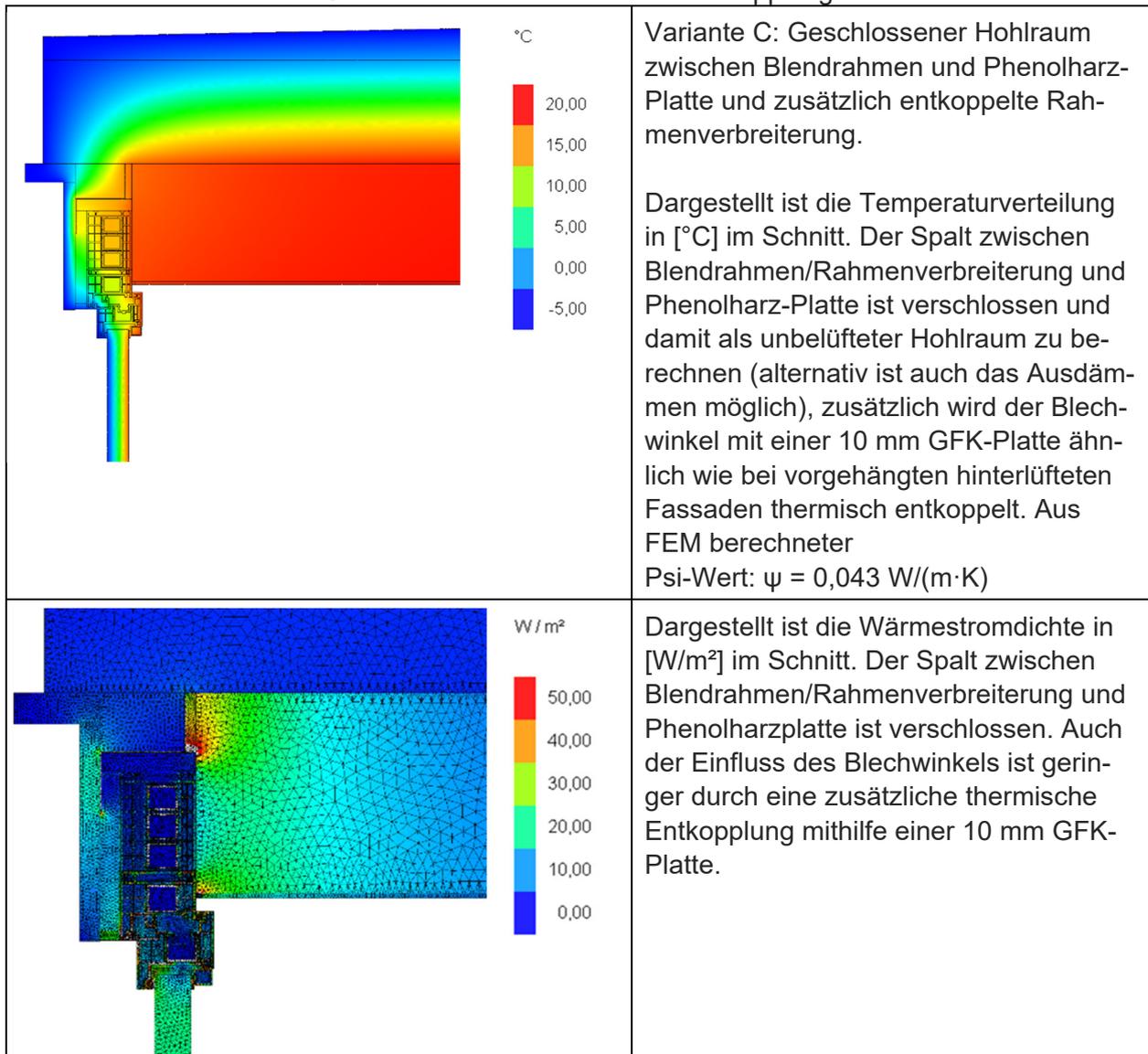
Variante A: Belüfteter Hohlraum



Variante B: Unbelüfteter Hohlraum



Variante C: unbelüfteter Hohlraum und Entkopplung

Fazit:

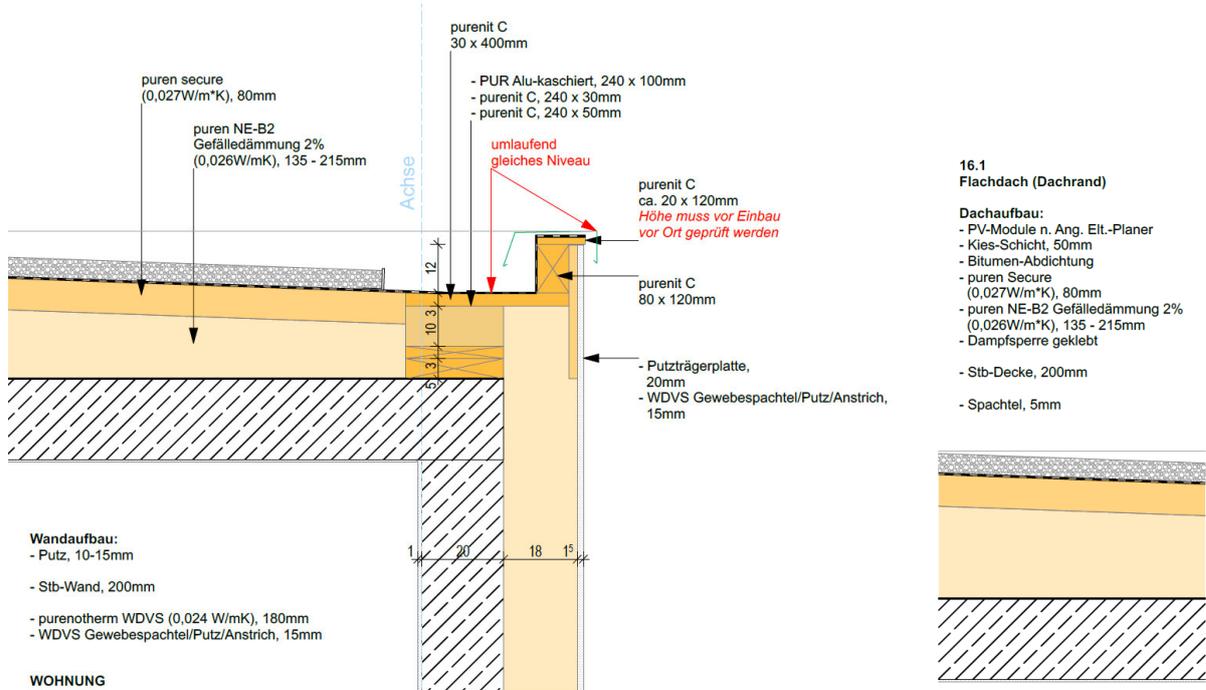
Das Dachdetail weist aufgrund der zweilagigen Dämmung aus reinen PIR im Ausgangszustand bereits U-Werte auf von $0,11 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$. An die darunterliegende Stahlbetondecke ist der Fensterrahmen angeschlossen. Zur Reduzierung der Wärmebrücke wird der Fensterrahmen mit einer Phenolharzplatte überdämmt. Aus der Zeichnung zeigt sich, dass zwischen Phenolharzplatte und Fensterrahmen ein Luftspalt besteht. Erwartet werden Spaltbreiten von mehr als 2 mm jedoch kleiner als 10 mm deshalb wurde nach DIN EN ISO 10077-2:2018-01 [DIN EN ISO 10077-2] ein leicht belüfteter Hohlraum für die Berechnungen angesetzt. Die berechneten Varianten für die ψ -Werte zeigen, dass je nach baulicher Situation der Abstand zwischen Phenolharzplatte und Blendrahmen einen deutlichen Einfluss auf den Psi-Wert des Anschlussdetails hat. So ist im Ausgangszustand ein Psi-Wert von $\psi = 0,312 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ zu erwarten. Durch das Ausdämmen oder Verschließen des Hohlraums kann eine Reduzierung auf $\psi = 0,048 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ erzielt werden. Die zusätzliche Entkopplung des Befestigungswinkels beispielsweise mit GFK oder Purenit bringt eine weitere kleine Verbesserung auf

$\psi = 0,043 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$. Das Einbringen einer dickeren Phenolharzplatte ist aufgrund des vorgehängten Rollladenkastens/ Raffstore nicht möglich. Ausnahme stellen seilgeführte Raffstore dar. Diese können im Gegensatz zu den schienengeführten Varianten weiter nach außen versetzt werden.

Dachanschluss Regeldetail

Für den U-Wert des Daches wird der U-Wert aus der FEM-Berechnung verwendet, hier über den gesamten Dickenbereich der Gefälledämmung und entsprechend breitem Dachausschnitt. Der Dachaufbau unterscheidet sich vom oberen Detail bei der Gefälledämmung. Dort wurde der betrachtete Randbereich abweichend mit puren PIR Class C mit $\lambda=0,028 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ als Gefälledämmung und puren PIR Class C mit $\lambda=0,026 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ als untere Lage gedämmt, nach innen wechselt die Gefälledämmung in die untere Lage und die obere Dämmlage besteht aus puren secure. Purenit C wurde mit einer Wärmeleitfähigkeit von $\lambda=0,099 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ angesetzt. Hier geht die untere Lage als Gefälledämmung (puren NE-B2) durch und die obere Lage bildet das Material puren secure. Aufgrund der unterschiedlichen Ausführungen ergeben sich unterschiedliche U-Werte der Dächer für die losgelöste Wärmebrückenberechnung. In der Energiebilanz für das Gesamtgebäude gibt es diese Unterscheidung vermutlich nicht und der U-Wert des Daches ist nach DIN EN ISO 6946 [DIN EN ISO 6946:2018] gerechnet. In diesem Fall müsste die Wärmebrückenberechnung noch an die Energiebilanz angeglichen werden.

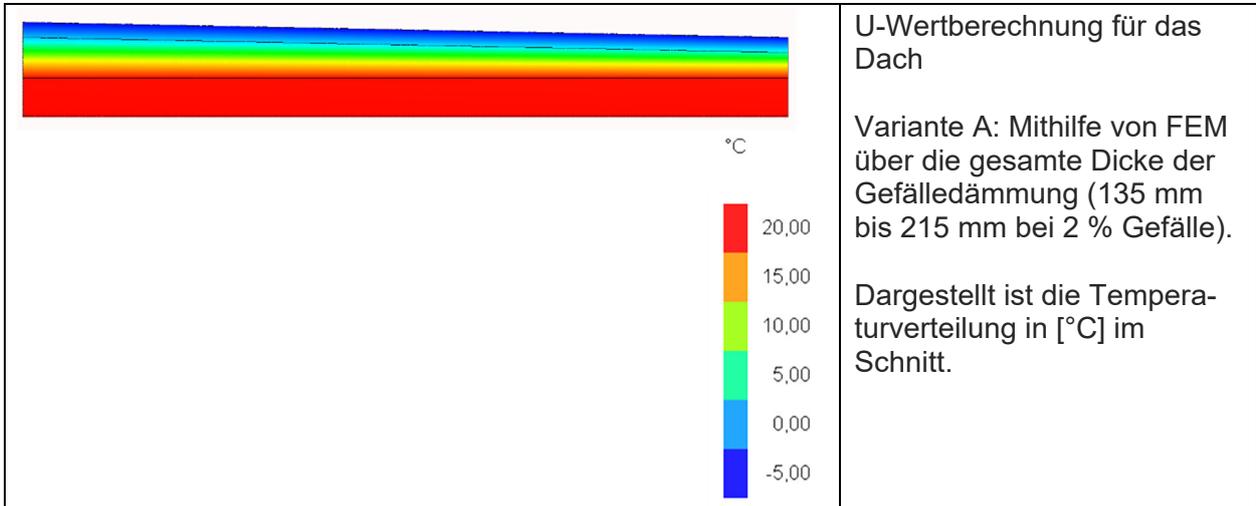
Bild 10: Detailzeichnung (D16.1) [m67 Schlüter Metzger Architekten] des Dachrands mit Attika



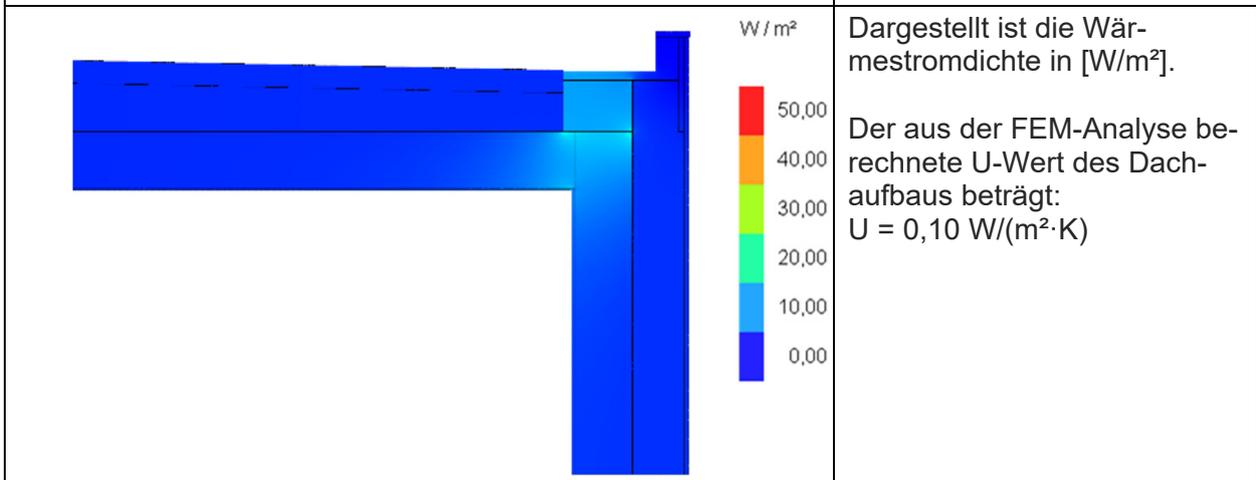
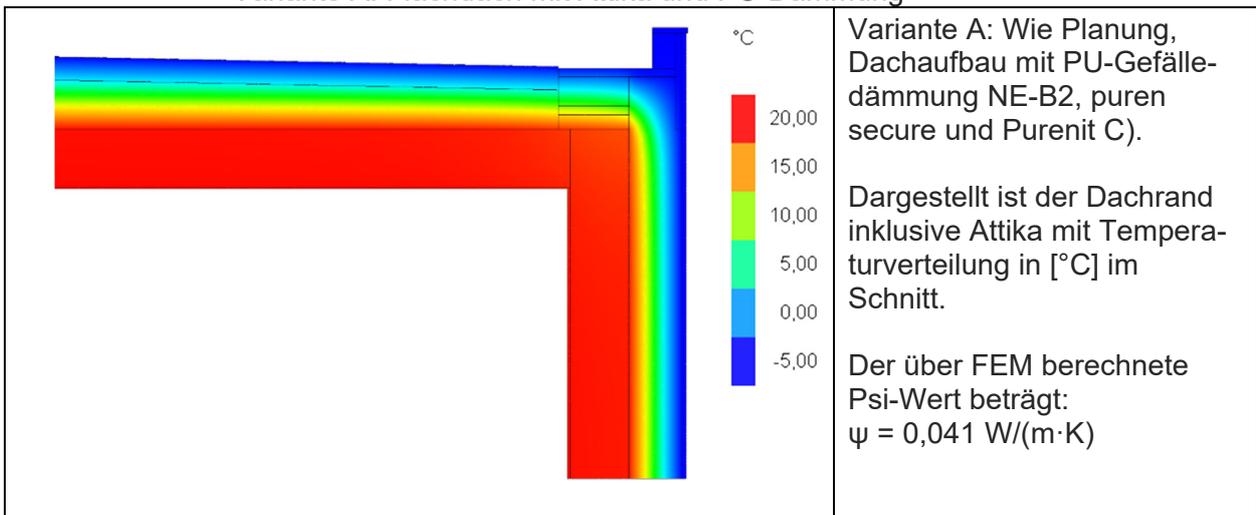
Wand- und Deckenkonstruktion sind aus Stahlbeton. Wärmedämmung mit Polyurethan Hartschaum. Einsatz von puren Secure als schwerentflammbare Deck-

schicht des Dämmstoffs unterhalb der als Aufdachsystem installierten Fotovoltaikanlage. Der U-Wert der Außenwand mit WDVS wurde analytisch über die Schichtenfolge berechnet.

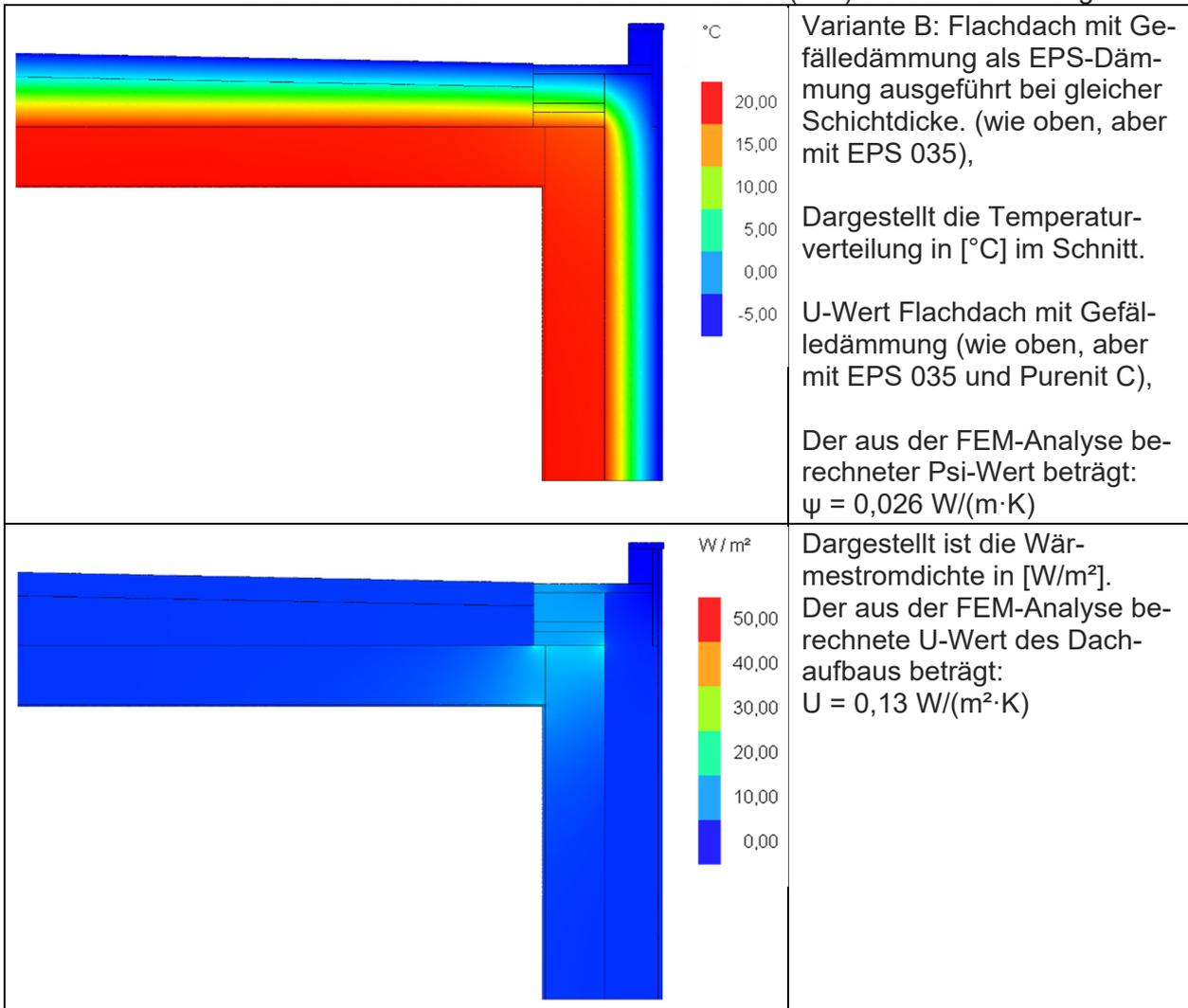
$$U_{AW} = \frac{1}{(0,13 + \frac{0,01}{0,7} + \frac{0,2}{2,3} + \frac{0,18}{0,024} + \frac{0,015}{0,7} + 0,04)} = 0,128 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$



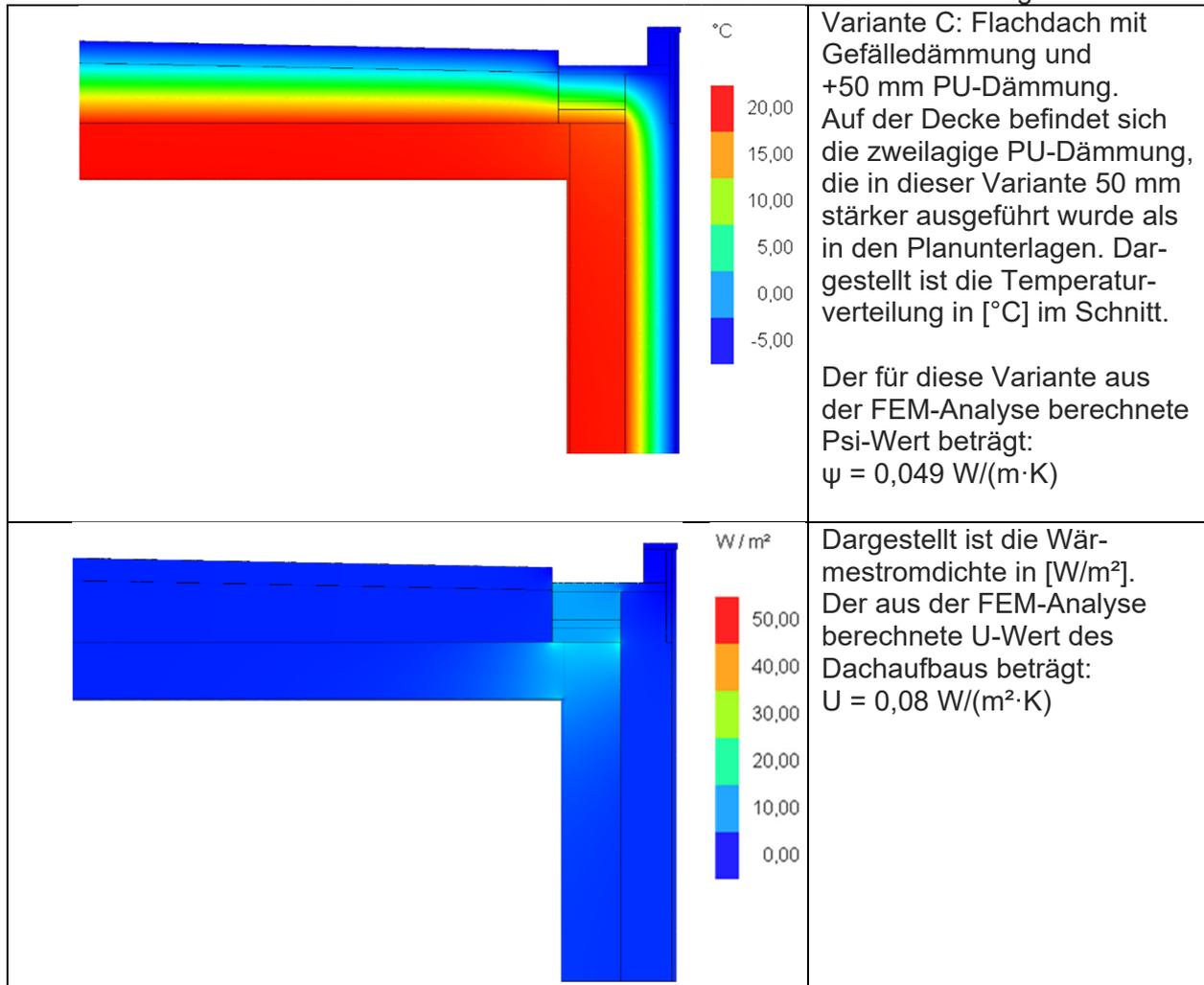
Variante A: Flachdach mit Attika und PU-Dämmung



Variante B: Flachdach mit Attika und mit EPS (035) als Dachdämmung



Variante C Flachdach mit Attika und dickerer PU-Dachdämmung +50 mm

Fazit:

Ausgangsfall ist die gebaute Konstruktion Variante A. Das Dach weist einen U-Wert von $0,10 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ auf und einen Psi-Wert von $\psi = 0,041 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$. Als Vergleich dazu steht die Variante B mit einer Gefälledämmung aus EPS. Ohne die Erhöhung der Dämmstärke steigt der U-Wert um rund 30 %, bezogen auf den Ausgangsfall. Die Variante C ist mit einer 50 mm stärkeren PU-Dämmung gerechnet. Der U-Wert wird hier um 20 % niedriger und sinkt damit auf $0,085 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$.

Die Veränderungen des Psi-Werts erklären sich durch die Veränderungen des U-Werts in der Dachkonstruktion. Für die Berechnung des längenbezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten ist sowohl der U-Wert der Dachkonstruktion als auch der Wärmedurchgang durch die Außenwand relevant. Im Ausgangsfall ist der Wärmebrückenwert mit $\psi = 0,041 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ bereits sehr niedrig. In der Variante B $\psi = 0,026 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ist der Wert kleiner als in der Ausgangsvariante. Hier ist die Verringerung des Koeffizienten durch die deutliche Vergrößerung des Wärmedurchgangs durch die Dachkonstruktion bedingt. Die Variante C mit verschlechtert sich mit einem Psi-Wert von $\psi = 0,049 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ geringfügig. Die leichte Erhöhung des Koeffizienten ist ebenfalls auf den veränderten Dachaufbau zurückzuführen.

Anschluss von Wohnraum an Keller, Tiefgarage und Außenraum

Bild 11: Darstellung des betrachteten Details in den Planunterlagen Ausschnitt Detail aus Plan Q5_AR_SC_H9_AB_c [m67 Schlüter Metzger Architekten]

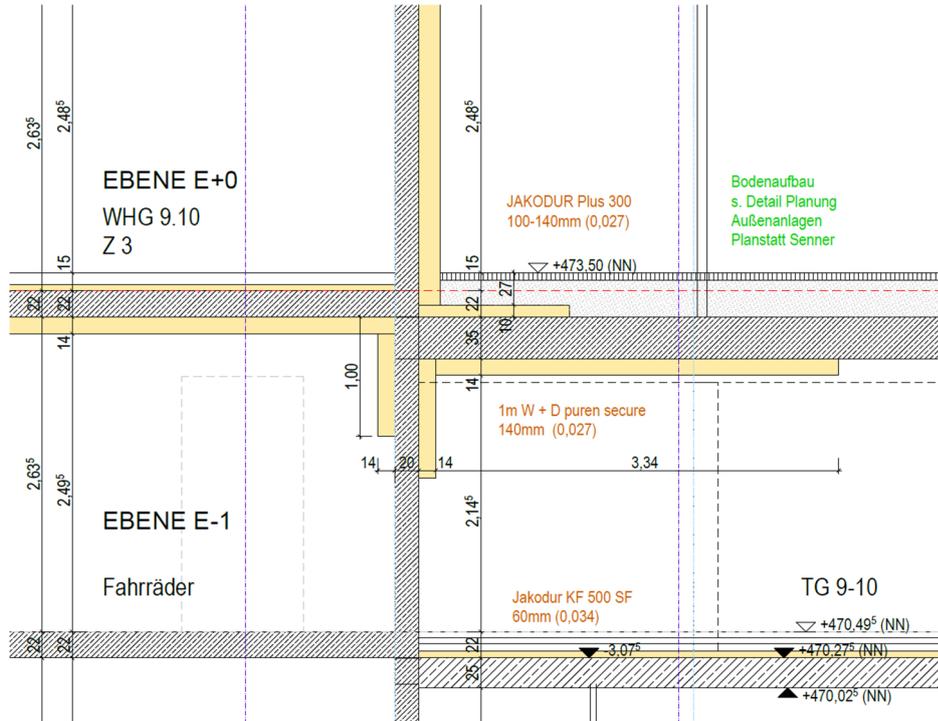
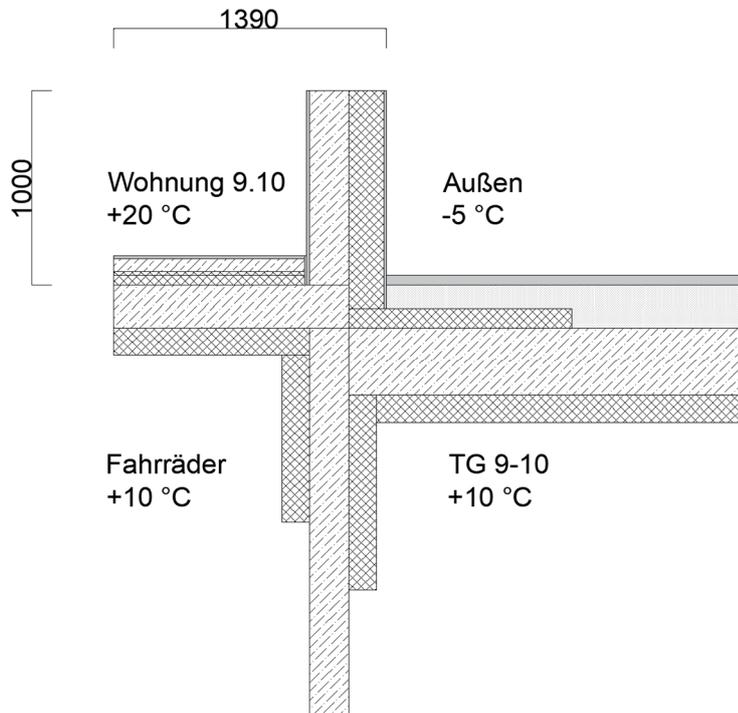


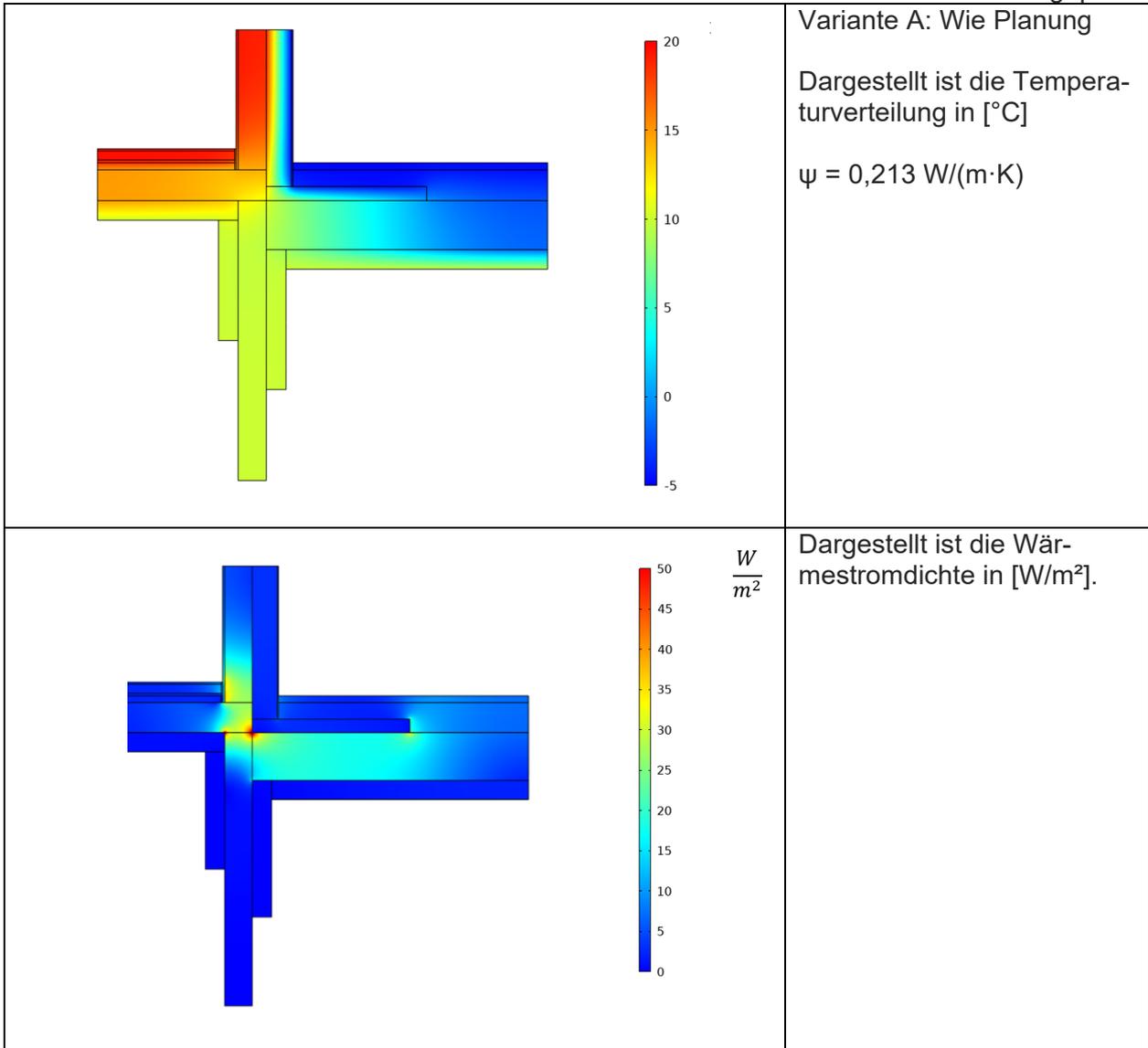
Bild 12: Zugrundeliegende Randbedingungen für die Berechnung der Wärmebrücke [FIW 2023]



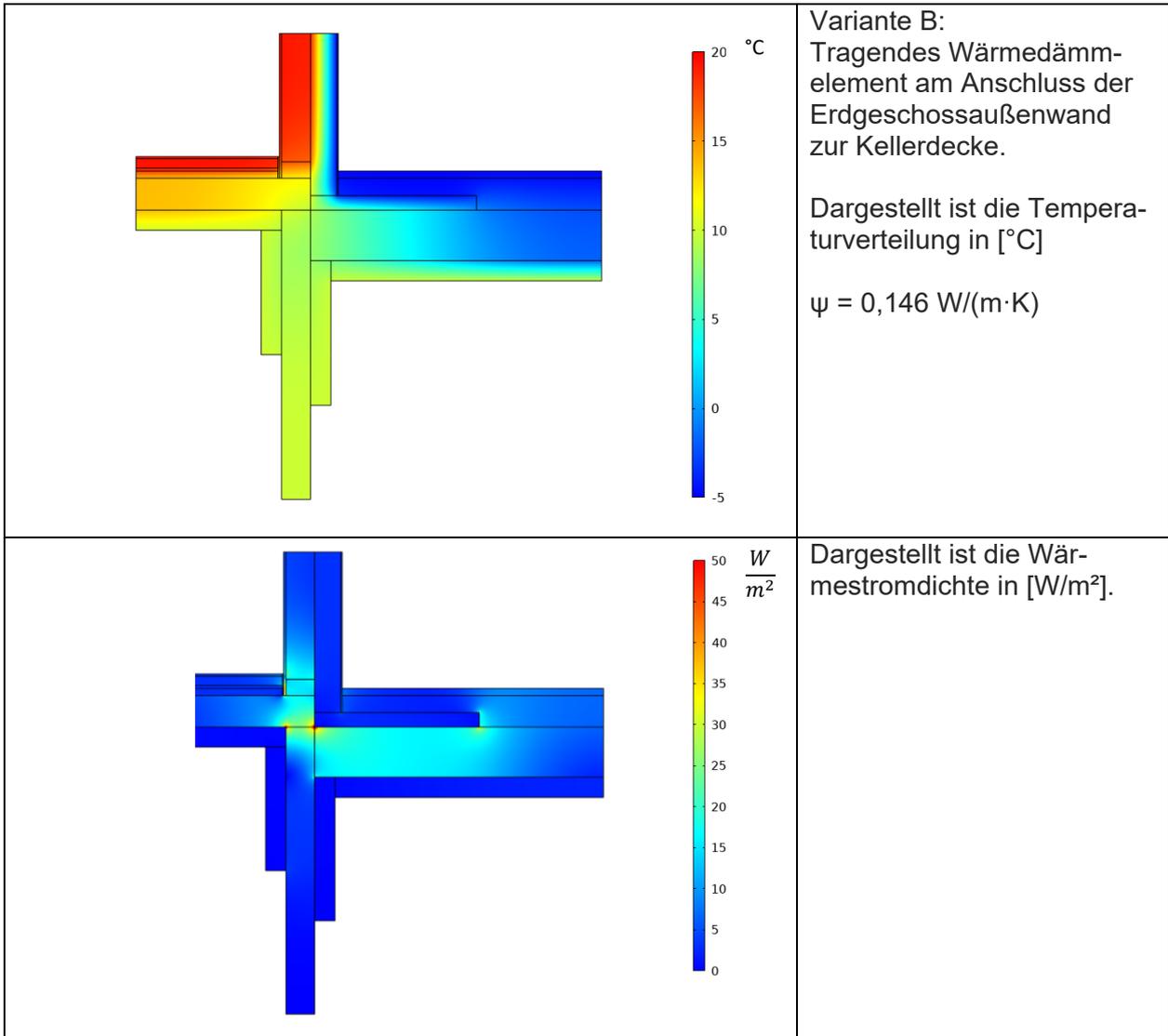
Die Psi-Werte des folgenden Details sind für den Vergleich der drei Ausführungsvarianten berechnet worden (Berechnung nach GEG mit Temperaturfaktor

$F_x=0,6$ für unbeheizte Keller/Erdreich). Der F_x -Faktor muss für die energetische Bilanzierung gegebenenfalls angepasst werden.

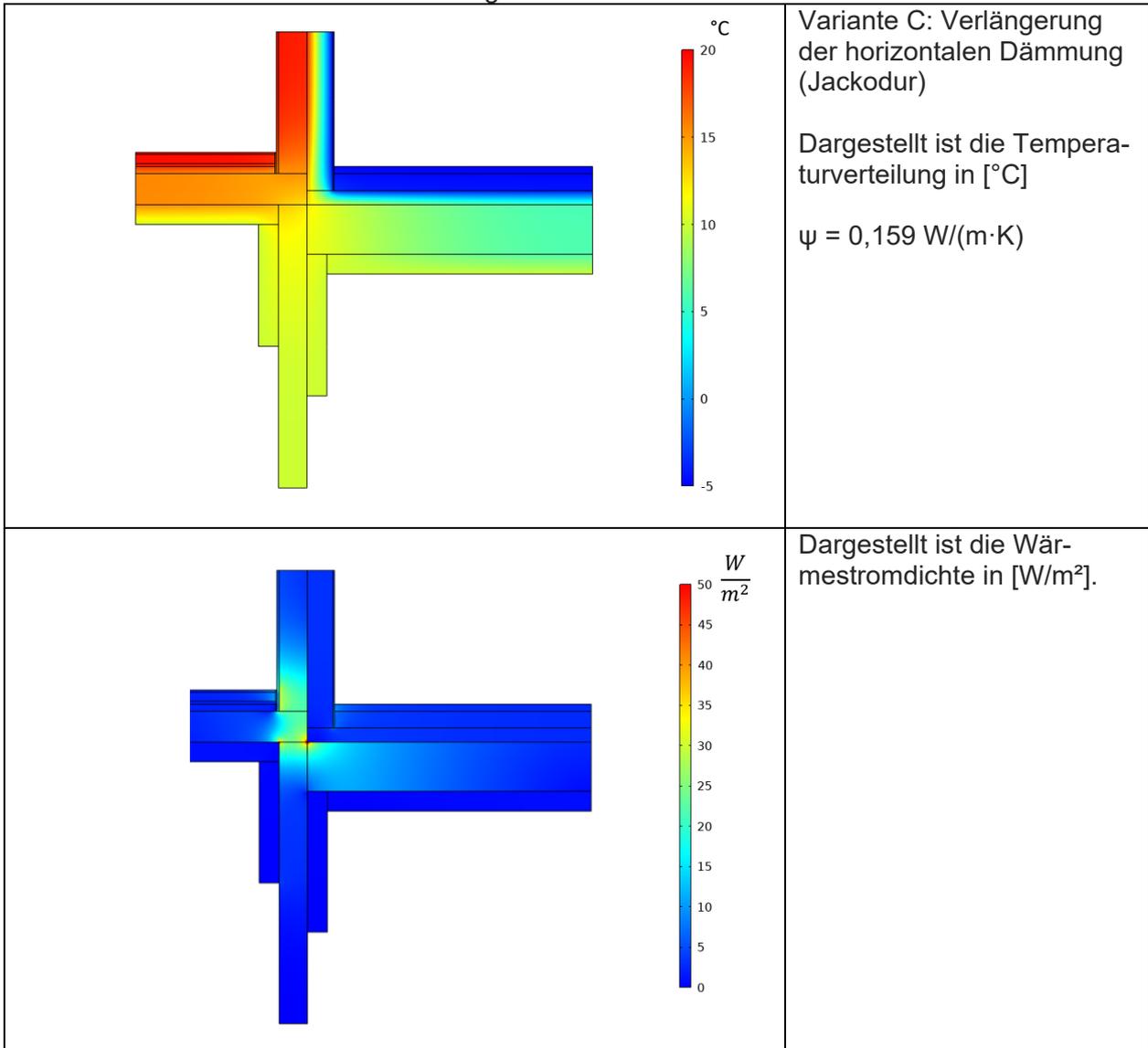
Variante A: Anschluss des Wohnraums an Keller und Außenraum wie geplant.



Variante B: Anschluss des Wohnraums an Keller und Außenraum mit tragendem Wärmedämmelement.



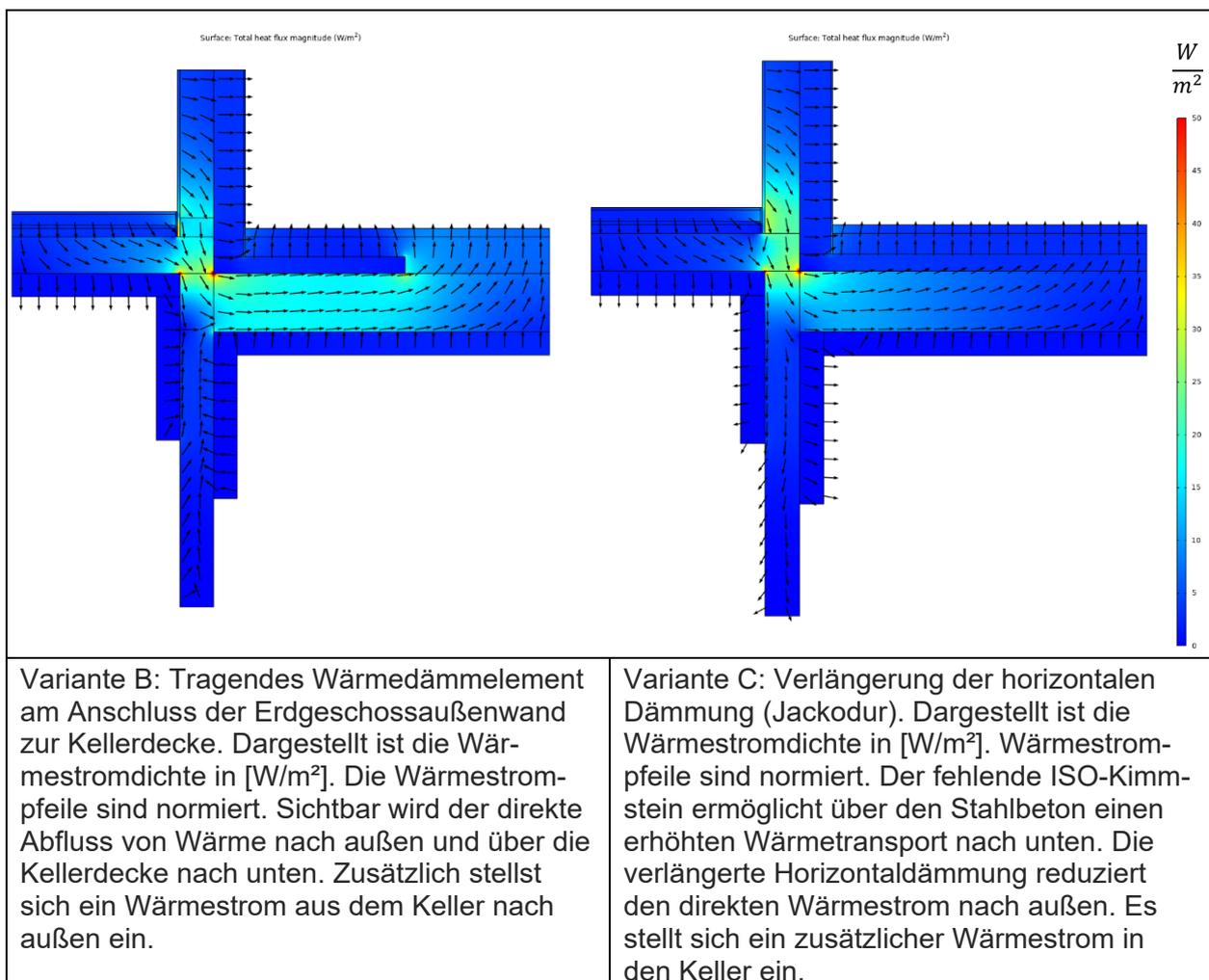
Variante C: Anschluss des Wohnraums an Keller und Außenraum mit verlängerter horizontal Dämmung



Fazit:

Für die Ausführung mit einer druckfesten Dämmung, wie in Variante B gezeigt, sind in der Praxis der KS-Iso-Kimmstein® oder das Wärmedämmelement für Stahlbetonwände von Schöck Sconnex® Typ W etablierte Produkte. Ausgehend von der gebauten Variante mit einem linearen Wärmebrückenkoeffizient (Psi-Wert) von $\psi = 0,213 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ werden in der Variante B mit einem tragenden Wärmedämmelement Werte von $\psi = 0,146 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ erreicht. Mit Verlängerung der druckfesten Dämmung wird ein Psi-Wert von $\psi = 0,159 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ erreicht. In der nachfolgenden Abbildung ist deutlich zu erkennen, dass in beiden Varianten die Wärmestromdichten reduziert werden können. Die Variante C zeigt geringe Wärmestromdichten aufgrund der verlängerten horizontalen Dämmung.

Auffällig ist, dass der ψ -Wert in Variante C geringfügig schlechter ist als in Variante B, obwohl die Temperaturverteilung in Variante C günstiger ist. Das geht einher mit einem geänderten Wärmefluss. Um dies zu verdeutlichen, wurden für die beiden nachfolgenden Bilder die Wärmestrompfeile auf die gleiche Länge normiert, unabhängig von der Höhe des Wärmestroms. Hier wird ersichtlich, dass sich bei Variante C ein Wärmestrom nach außen und in Richtung Keller einstellt. Wohingegen bei Variante B ein Abfluss der Wärme direkt nach außen erfolgt. Zusätzlich stellt sich ein Wärmestrom aus dem Keller nach außen ein.



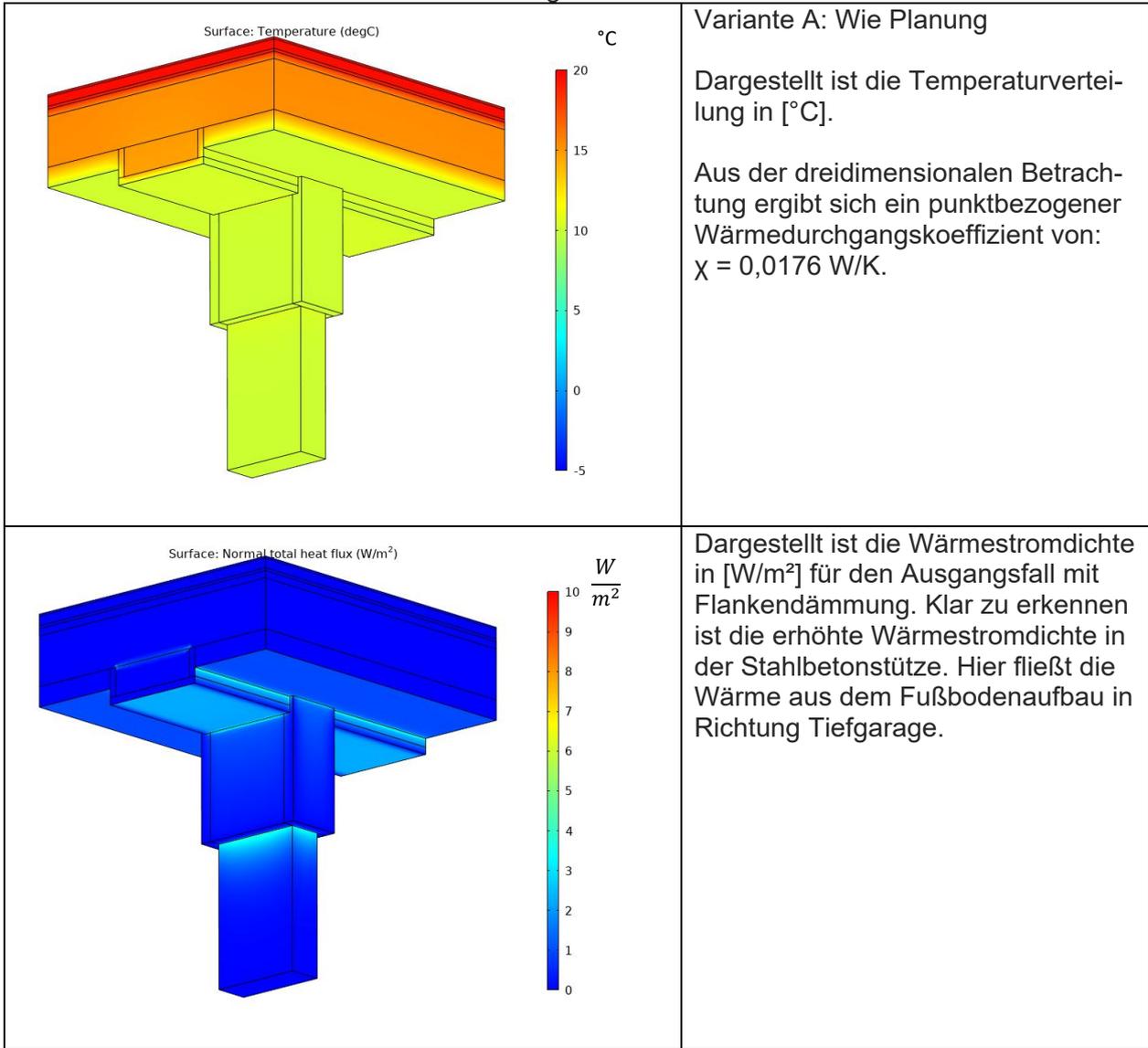
Stützendämmung in der Tiefgarage

Dargestellt ist die Detailzeichnung im Schnitt einer Stütze mit Anschluss an den Unterzug und die Tiefgaragen Stahlbetondecke. Die Flankendämmung aus puren secure wird an der Stütze 1 m heruntergezogen. Die Berechnung erfolgt hier dreidimensional. Die quasi punktförmigen Anschlüsse sind als Chi-Wert, dem punktbezogener Wärmedurchgangskoeffizient berechnet.

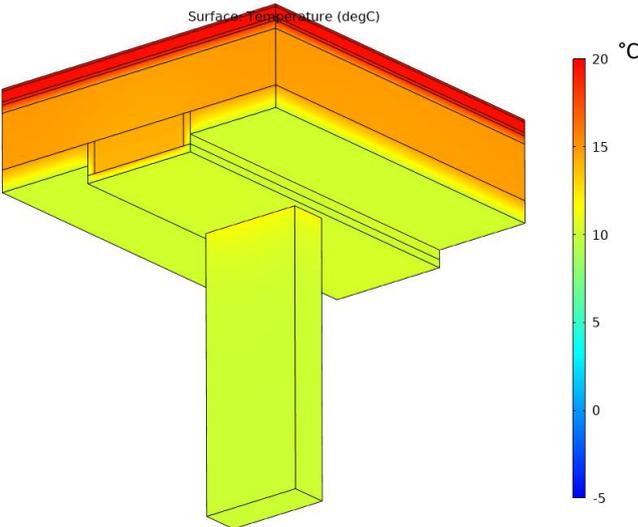
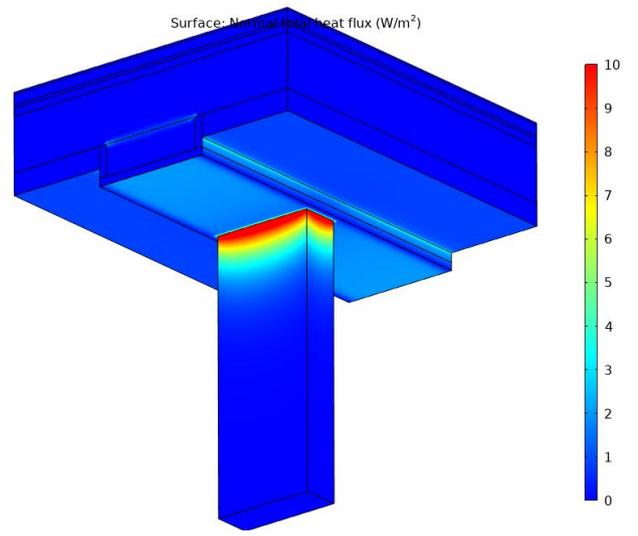
	15 mm	Keramischer Belag	1,3 W/(m·K)
	65 mm	Zementestrich	1,4 W/(m·K)
	20 mm	Tackerplatte	0,042 W/(m·K)
	50 mm	Dämmung	0,029 W/(m·K)
	350 mm	Stahlbeton	2,3 W/(m·K)
	200 mm	Unterzug	2,3 W/(m·K)
	140 mm	TG-Deckendämmung	0,026 W/(m·K)
	240 mm	Stahlbetonstütze/ Wand	2,3 W/(m·K)

Die TG-Decke mit Unterzug wurde in einer separaten FEM-Berechnung als "Null-Lösung" ohne Stütze berechnet. Zur Ermittlung der Chi-Werte (χ) wurden die Modelle mit Stütze dagegen gerechnet.

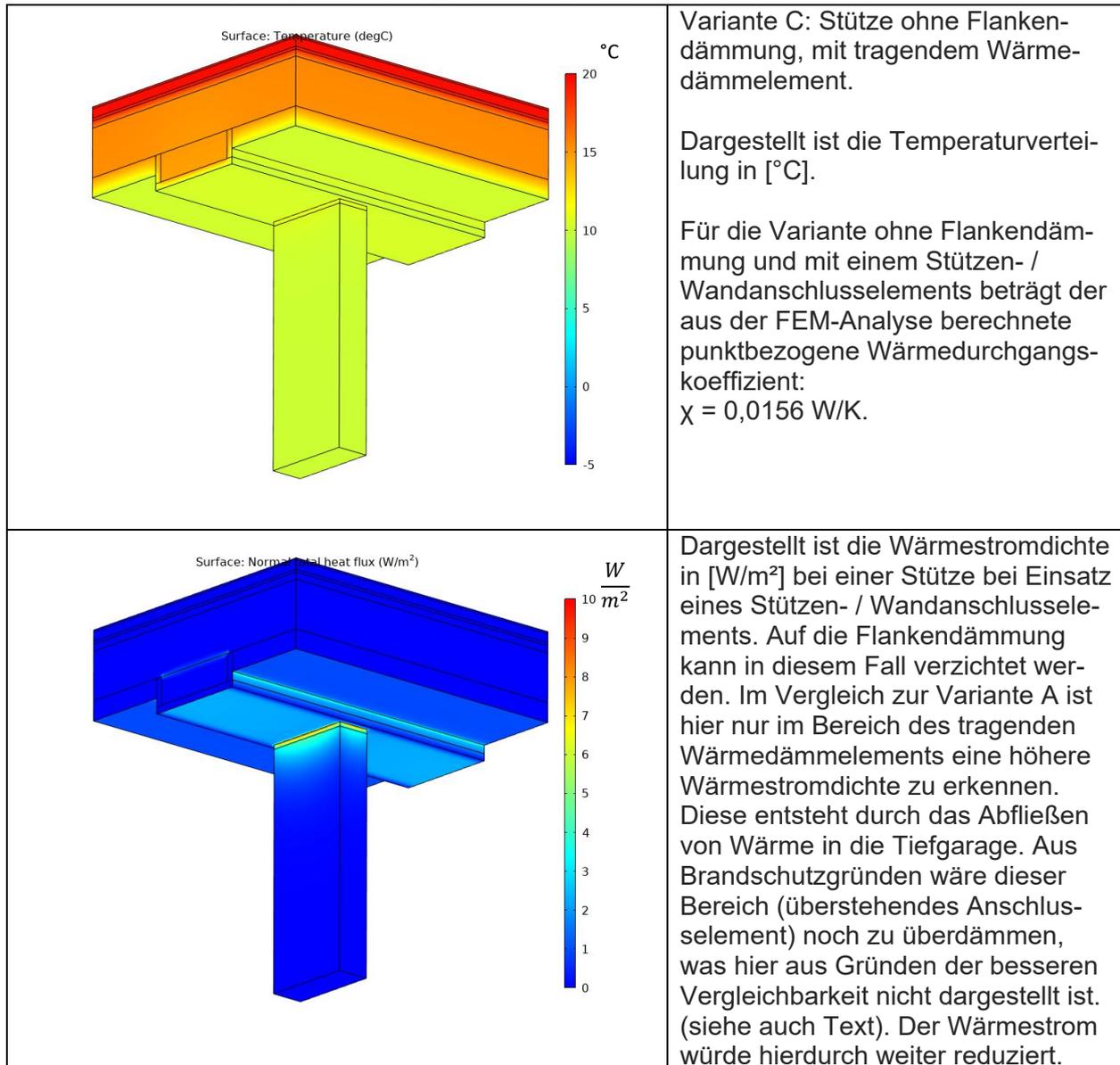
Variante A Flankendämmung



Variante B ohne Flankendämmung

 <p>Surface: Temperature (degC)</p> <p>20 °C</p> <p>15</p> <p>10</p> <p>5</p> <p>0</p> <p>-5</p>	<p>Variante B: Stütze ohne Flankendämmung</p> <p>Dargestellt ist die Temperaturverteilung in [°C].</p> <p>Für die Variante ohne Flankendämmung beträgt der aus der FEM-Analyse berechnete, punktbezogene Wärmedurchgangskoeffizient:</p> $\chi = 0,0422 \text{ W/K.}$
 <p>Surface: Normal heat flux (W/m²)</p> <p>10</p> <p>9</p> <p>8</p> <p>7</p> <p>6</p> <p>5</p> <p>4</p> <p>3</p> <p>2</p> <p>1</p> <p>0</p>	<p>Dargestellt ist die Wärmestromdichte in $\frac{W}{m^2}$ bei einer Stütze ohne Flankendämmung.</p> <p>Durch den geringen Wärmedurchlasswiderstand kann über die Stütze deutlich mehr Wärme abfließen als bei Verwendung einer Flankendämmung oder eines tragenden Wärmedämmelements. Siehe dazu im Vergleich die Wärmestromdichte der Variante C.</p>

Variante C: mit Stützen- / Wandanschlusselement:

Fazit:

Alle drei Varianten sind bauphysikalisch unproblematisch. Die ausgeführte Variante mit der Flankendämmung ist mit einem punktbezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten von $\chi = 0,0176 \text{ W/K}$ deutlich besser als die Variante ohne Flankendämmung ($\chi = 0,0422 \text{ W/K}$). Der hohe Aufwand einer Flankendämmung lässt sich bei Einsatz eines Stützen- / Wandanschlusselements vermeiden. Dabei können auch reduzierte Chi-Werte von $\chi = 0,0156 \text{ W/K}$ erreicht werden. Für Stützenanschlüsse bietet der Markt tragende Wärmedämmelemente, diese sind speziell für die Reduzierung von Wärmebrücken im Bereich der Bauteilanschlüsse ausgelegt.

Bei der Variante C wird davon ausgegangen, dass im Falle der 0,65 m breiten Stütze zwei tragende Wärmedämmelemente mit einer äquivalenten Wärmeleitfähigkeit von $0,254 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ und dazwischen 0,05 m Zwischendämmung Typ W

Part Z mit einer äquivalenten Wärmeleitfähigkeit von $0,031 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ eingesetzt werden. Die mittlere äquivalente Wärmeleitfähigkeit beträgt dann $0,237 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$.

Eine in der Praxis übliche Ausführung wäre hier z. B. mit dem Produkt Sconnex P für Stützenanschlüsse, Sconnex W für Wandanschlüsse möglich. Im zweiten Fall beträgt die Elementlänge des Sconnex W 0,3 m. Zwischen den Sconnex W werden – je nach statischer Erfordernis Zwischendämmungen Typ W Part Z eingesetzt. Die Elementlänge beträgt hier 1,0 m (kürzbar). Zur Ermittlung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit für die Elemente werden diese über ihre jeweilige äquivalente Wärmeleitfähigkeit und ihrem Anteil gemittelt. Die Elementdicke beträgt 0,08 m.

Anstatt der üblichen Flankendämmung wird die Stütze oder Wand selbst thermisch entkoppelt. Das führt zu einem reduzierten Installationsaufwand bei der Dämmung und etwas geringerem Materialbedarf. Des Weiteren wird mehr Platz um die Stütze gewonnen und auch die schadensanfälligen Ecken der Stützendämmung entfällt.

4.2 Ökobilanzielle Betrachtung der Gebäudehülle

Die in Überlingen gebauten Gebäude im Stadtquartier 2050 Projekt sind hochgedämmt und bieten den Nutzern einen hohen Wohnkomfort, niedrige Energieverbräuche und damit niedrige Betriebskosten. Als Dämmstoff wurde Polyurethan (PU) Hartschaum eingesetzt. Dabei beträgt die Dämmstärke an den Außenwänden 180 mm, was ursächlich für das sehr hohe Dämmniveau ist. Allerdings bringen die hohen Dämmstärken auch einen erhöhten Materialbedarf mit sich. Abgesehen von der Energieeffizienz, dem Komfortgewinn sowie dem Schutz der Baustoffe müssen die mit dem Materialeinsatz verbundenen Umweltwirkungen betrachtet werden.

Als Bewertungsmethodik hat sich dafür die ökobilanzielle Betrachtung etabliert. Dabei werden die Umweltwirkungen in verschiedenen Bereichen auf Basis von Umweltproduktdeklaration (Environmental Product Declaration - EPD) berechnet. Einer der am meisten genutzten Umweltfaktoren ist das Treibhaus- bzw. Erderwärmungspotenzial (Global Warming Potential - GWP), welches daher auch als zentrale Größe dieser Betrachtung verwendet wird. Weitere für vollständige Ökobilanzen wichtige Umweltindikatoren, wie Versauerungspotenzial, Ozon-Abbaupotenzial, Eutrophierungspotenzial etc., werden hier nicht betrachtet, da für das Projekt vor allem das GWP bei Herstellung und im Betrieb hinsichtlich der Klimawirksamkeit bewertet werden müssen.

Das genaue Vorgehen zur Erstellung einer Ökobilanz ist in der DIN EN ISO 14040 und 14044 geregelt. [DIN EN ISO 14040; DIN EN ISO 14044]. Datengrundlage für diese Berechnung bildet die Datenbank ÖKOBAUDAT_2021_II aus der Ökobaudat [BBSR]. Die exakten Energiebedarfe für Raumwärme und Trinkwarmwasser wurden über das Berechnungsverfahren nach DIN V 18599 ermittelt. Berechnet werden die Ergebnisse auf eine Lebensdauer des Gebäudes von 50 Jahren. Die Bilanzierung umfasst dabei die Module

A1-A3 (Herstellungsphase), B4 (Austausch), B6 (Energieverbrauch im Betrieb), C3 (Abfallbehandlung), C4 (Entsorgung).

Die Konstruktion der Gebäude in Überlingen wurde auf ein Standard-Mehrfamilienhaus mit 12 Wohneinheiten übertragen, um eine leichter zu verallgemeinernde Aussage für ein typisches MFH-Gebäude zu erhalten. Hintergrund ist, dass die Gebäude in Überlingen durch die Hanglage und die verbindende Tiefgarage konstruktiv aufwändig sind und eine Zuordnung der Keller- und Tiefgaragenanteile zur Ökobilanz eines einzelnen Gebäudeblocks schwierig ist. Um trotzdem eine Bewertung des GWP der in Überlingen eingesetzten innovativen Dämmsysteme mit PU im Vergleich zu anderen etablierten Dämmstoffen realisieren zu können, wurden die ausgeführten Konstruktionen auf ein einfacheres Mehrfamilien-Gebäude übertragen.

Verwendet wird für den Vergleich eines der Typengebäude der ARGE e. V. [Walberg et al. 2015]. Das freistehende Mehrfamilienhaus setzt sich aus fünf oberirdischen Vollgeschossen und einem unbeheizten Kellergeschoss zusammen. Das Kellergeschoss des Typengebäudes erstreckt sich über rund 60 % des Gebäudes, in dieser Berechnung wird der Keller als Vollgeschoss berechnet. Von den 1.162 m² Nutzfläche sind 873 m² beheizt, die sich auf insgesamt 12 Wohneinheiten verteilen. Die Kunststoffenster sind mit einer Dreischeibenverglasung ausgeführt. Das Flachdach aus Stahlbeton ist als Warmdach ausgeführt. Die Dämmung wird durch eine Abdichtung mit Bitumenbahnen geschützt. Rund 50 % der Dachfläche sind mit der 100 m² großen PV-Anlage belegt. Es sind keine PV-Stromspeicher verbaut und die Anlage ist Richtung Süden ausgerichtet und in einem 30°-Winkel auf dem Dach aufgeständert. Das Gebäude wird mit einer Wasser/Wasser-Wärmepumpe über eine Fußbodenheizung mit Wärme versorgt. Des Weiteren ist das Gebäude mit einem zentralen Abluftsystem mit Wärmerückgewinnung ausgestattet.

Für dieses einfachere MFH wurden die ausgeführten Wärmedurchlasswiderstände (R-Werte) des Quartiers in Überlingen sowohl für das Flachdach als auch für die Außenwand übernommen. Auf das Typengebäude wurde dafür die Dämmdicke der PU-Konstruktion übertragen. Auch die Stärke der anderen Dämmstoffe wurde für einen fairen Vergleich millimetergenau berechnet und für die Bilanz verwendet, auch wenn dadurch Dämmdicken zustande kommen, die baupraktisch nicht umgesetzt werden. Hier ging der Zweck des Vergleichs über baupraktische Belange. Nur so lassen sich für alle Varianten die gleichen Wärmedurchlasswiderstände wie bei der PU-Konstruktion einstellen. Dabei ist zu beachten, dass die zusätzliche Dämmstärke nur die äußeren Abmessungen des betrachteten Gebäudes ändert. Die Innenraumabmessungen ändern sich nicht, um zumindest die Wohnfläche konstant zu halten. Bei der Nutzfläche ergäben sich durch unterschiedliche Dämmdicken bei Außenwand und Flachdach auch jeweils leicht unterschiedliche Abmessungen des Gebäudes für die Bestimmung des Volumens und damit für die Ableitung der Nutzfläche bei den drei betrachteten Ausführungen mit den verschiedenen Dämmstoffen. Im Abschnitt „Flächenbedarf“ wurde der Flächengewinn durch die geringeren Dämmstärken der PU-Hartschaumdämmung im Vergleich zu Dämmstoffen der WLS 035 und WLS 040 berechnet. Beim unteren Gebäudeabschluss wird die Dämmung nicht für die Bestimmung der Abmessungen berücksichtigt. Die Dämmung zum unbeheizten Kel-

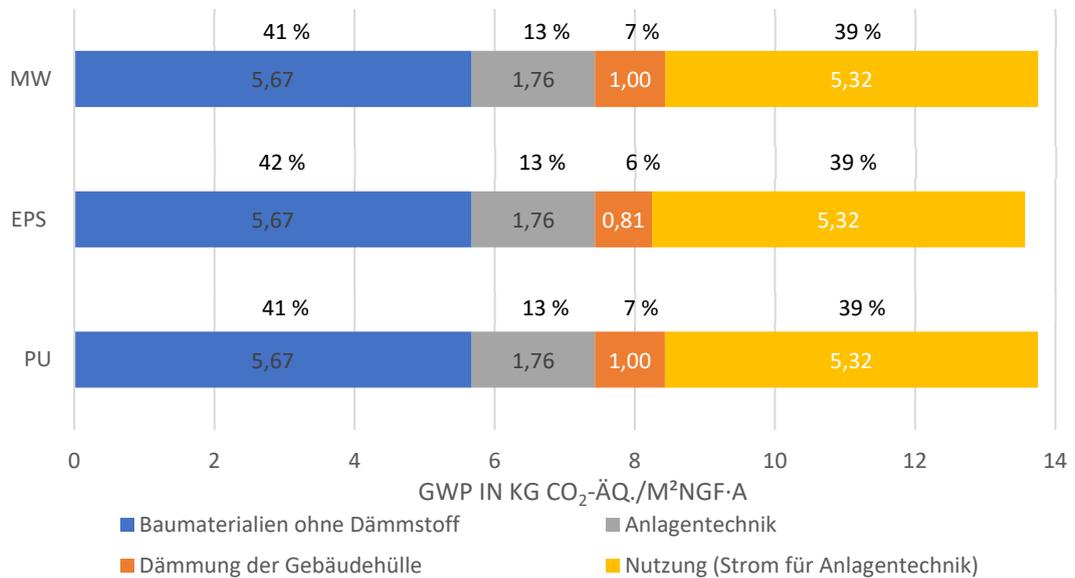
lergeschoss ist bei allen drei Varianten mit dem identischen Dämmstoff und gleichem Wärmedurchlasswiderstand angenommen. Verglichen werden die handelsüblichen Dämmstoffe Polyurethan (PU), expandiertes Polystyrol (EPS) und Mineralwolle (MW). Die Außenwände des Typengebäudes wurden von Ziegel auf 200 mm Stahlbeton mit 1 % Bewehrung angepasst. Die Dämmstoffe PU, EPS und MW sind in der nachfolgenden Tabelle mit den Eigenschaften und Stärken aufgeführt.

Tabelle 1: Eigenschaften der zur Berechnung verwendeten Dämmstoffe an den jeweiligen Bauteilen.

Dämmstoff	Bauteil	Wärmeleitfähigkeit	Rohdichte	Dämmdicke
PU	Wand	0,024 W/(m·K)	33 kg/m ³	180 mm
EPS	Wand	0,032 W/(m·K)	15 kg/m ³	228 mm
MW	Wand	0,035 W/(m·K)	105 kg/m ³	242 mm
PU	Dach	0,026 W/(m·K)	32 kg/m ³	235 mm
EPS	Dach	0,035 W/(m·K)	30 kg/m ³	316 mm
MW	Dach	0,038 W/(m·K)	155 kg/m ³	343 mm

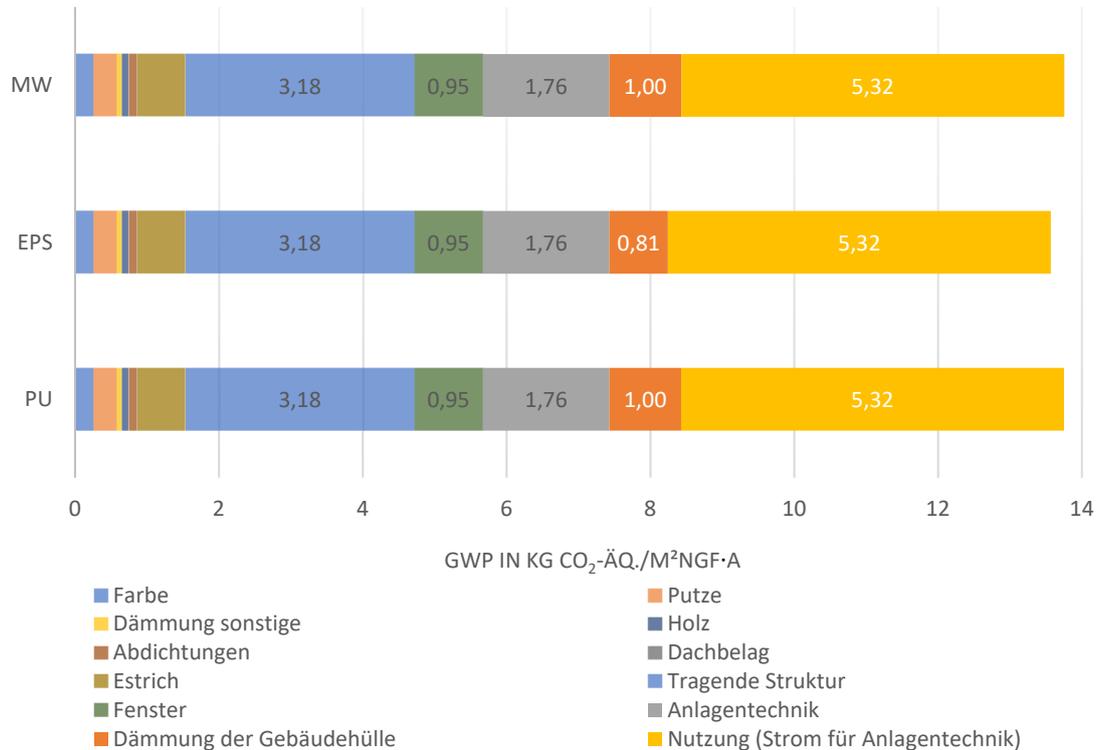
Unter diesen Randbedingungen wird für das MFH-Gebäude eine stark vereinfachte, vergleichende Berechnung für das GWP der drei Dämmstoffe im Gebäudekontext erstellt. Für die Betrachtung wird aus der Vielzahl der ökobilanziell zu berücksichtigenden Faktoren hier nur das Treibhauspotenzial (GWP) ausgewählt. Das Gebäude erhält bei allen drei Ausführungsvarianten eine PV-Anlage und es wird der selbst erzeugte PV-Strom zu maximal 30 % angerechnet. Die Bauteillebensdauern entsprechen den Vorgaben aus der Publikation „Nutzungsdauern von Bauteilen für Lebenszyklusanalysen im Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen“ [BBSR 2017]. Die entsprechenden Austauschzyklen und damit einhergehenden Umweltwirkungen sind berücksichtigt. In dem nachfolgenden Balkendiagramm sind die Ergebnisse dargestellt.

Bild 13: Das Balkendiagramm zeigt das Treibhauspotential (GWP) der Konstruktion in kg CO₂-Äquivalente pro Quadratmeter Netto-Grundfläche und Jahr. Die Balken sind nach Dämmstoff aufgeteilt und zeigen die berechneten Werte des GWP für PU, EPS und MW. Die Balken sind in die vier Abschnitte Baumaterial, Dämmung, Anlagentechnik und Nutzung gegliedert.



Da die Konstruktion für die Variantenberechnung mit den drei Dämmstoffen nicht verändert wurde, auch wenn dadurch eine Ungenauigkeit bei der Nutzfläche entsteht, bleibt auch das GWP für die „Baumaterialien ohne Dämmung“ in obiger Darstellung gleich. Dasselbe gilt für das GWP, welches der Anlagentechnik zugeordnet wird. Da Hülle und Anlagentechnik gleich bleiben, verändert sich auch das GWP des Betriebs in der oben dargestellten jährlichen Betrachtung nicht. Die Unterschiede in der Gesamtsumme resultieren daher ausschließlich aus den Unterschieden bei den drei betrachteten Dämmstoffen. Auf das ganze Gebäude bezogen, unterscheiden sich die Dämmstoffe auch nur wenig. Die GWP-Werte liegen zwischen 0,81 kg CO₂-Äq./((m²NGF·a) für EPS und 1,00 kg CO₂-Äq./((m²NGF·a) für PU. An der jährlichen Betrachtung haben die Dämmstoffe somit einen Anteil von 6-7 %. Die Dämmstoffe liegen damit etwa bei der Hälfte des GWP der Anlagentechnik und etwa bei einem Achtel der restlichen Baustoffe.

Bild 14: Das Balkendiagramm zeigt das GWP der Konstruktion in kg CO₂-Äquivalente pro Quadratmeter Netto-Grundfläche und Jahr. Dargestellt ist je ein Balken für PU, EPS und MW. Die verwendeten Baumaterialien sind detailliert aufgeschlüsselt und die fünf größten Positionen sind mit Werten versehen.



In diesem Balkendiagramm sind die Beiträge der einzelnen Baumaterialien weiter aufgeschlüsselt. Neben der tragenden Struktur ist der Anteil der Fenster am Gesamt-GWP deutlich sichtbar. Die Fenster werden im Lebenszyklus des Gebäudes einmal getauscht und machen 7 % des Gesamt-GWPs aus. Der Wärmedurchlasswiderstand der Fenster ist um 80 % geringer als der der Außenwand. Die höheren Wärmeverluste durch die Fenster beeinflussen damit auch den Energiebedarf der Anlagentechnik. Große Fensterflächen erhöhen einerseits das GWP des Gebäudelebenszyklus und andererseits sind diese für erhöhte Wärmeverluste verantwortlich. Auch die Problematik der sommerlichen Überhitzung des Gebäudes erhöht sich mit steigendem Fensteranteil, was erhöhte Anforderungen an die Anlagentechnik zur Folge haben kann. Daraus lässt sich ableiten, dass der Anteil an Fensterflächen am Gebäude sorgfältig geplant und ausgewählt werden muss.

Auffallend ist, dass bedingt durch das sehr hohe Dämmniveau des Gebäudes, der Anteil des Betriebs an der jährlichen Betrachtung kleiner ist als der Anteil der Bauteile und Anlagentechnik in der Errichtung, Erneuerung und Entsorgung. Bei Gebäuden mit einem schlechteren Effizienzniveau ist der Anteil des Betriebs üblicherweise deutlich größer. Andererseits wird durch die Reduzierung des Betriebsanteils auch die Wahl der Materialien hinsichtlich der Minimierung der Gesamtemissionen über den Betrachtungszeitraum interessant. Eine Optimierung sollte dabei aber zuerst bei den Baustoffen und bei der Anlagentechnik ansetzen, da diese am GWP den deutlich größeren Anteil haben und somit auch mehr Potenzial für eine Optimierung bieten. Demgegenüber sind die Unterschiede, die aus der Wahl des Dämmstoffs resultieren, in der Gesamtbetrachtung gering. Das

trifft umso mehr zu, da beim Betrachtungszeitraum von 50 Jahren die Dämmstoffe mit ihrer nach o.g. Richtlinie festgelegten Lebenserwartung von 40 Jahren sogar bereits einmal einen Austausch erfahren haben, der in den oben gezeigten Daten berücksichtigt ist.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Dämmstoffe zwischen 6 und 7 % des gesamten GWPs verursachen, aber für über 95 % des Wärmedurchlasswiderstands und damit auch für den Großteil der Energieeinsparung der opaken Bauteile verantwortlich sind. Bei Erweiterung des Betrachtungszeitraums auf die in der Praxis übliche Nutzungsdauer von Wohngebäuden von 80 Jahren wären die Anteile der Dämmstoffe zum Gesamt-GWP noch geringer, da ein vollständiger Ersatz des Dämmstoffs nach 40 Jahren bereits in der aktuellen Bilanz berücksichtigt ist.

4.3 Flächenbedarf

Dämmstoffe mit einer niedrigen Wärmeleitfähigkeit können bei gleichem Wärmedurchlasswiderstand dünner ausgelegt werden. Bei festgelegten Baugrenzen bzw. Baulinien ist ein Außenmaßbezug gegeben. Daraus folgt, dass geringe Wandstärken einen kleineren Anteil an Konstruktionsgrundfläche (KGF) und deshalb ein größerer Teil an Netto-Raumfläche (NRF) bleibt. Für das Gebäude entsteht daraus ein Flächengewinn an vermietbarer/verkaufbarer Fläche. Um diesen Umstand zu verdeutlichen, werden für das Gebäude 9 beispielhaft zwei Varianten mit Dämmstoffen unterschiedlicher Wärmeleitstufen (WLS 035 & WLS 040) gerechnet und in Bezug zum gebauten System mit PU-Dämmstoff gesetzt. Für eine Abschätzung zum Mehrbedarf an Konstruktionsfläche werden die Dämmstoffstärken auf den Gebäudeumfang in Überlingen übertragen.

$$R \left[\frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}} \right] = \frac{d \text{ [m]}}{\lambda \left[\frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \right]}$$

Bild 15: Zeichnung der drei Wandaufbauten mit unterschiedlichen Dämmstoffen (WLS024, WLS035, WLS040) und gleichem U-Wert [FIW 2023].

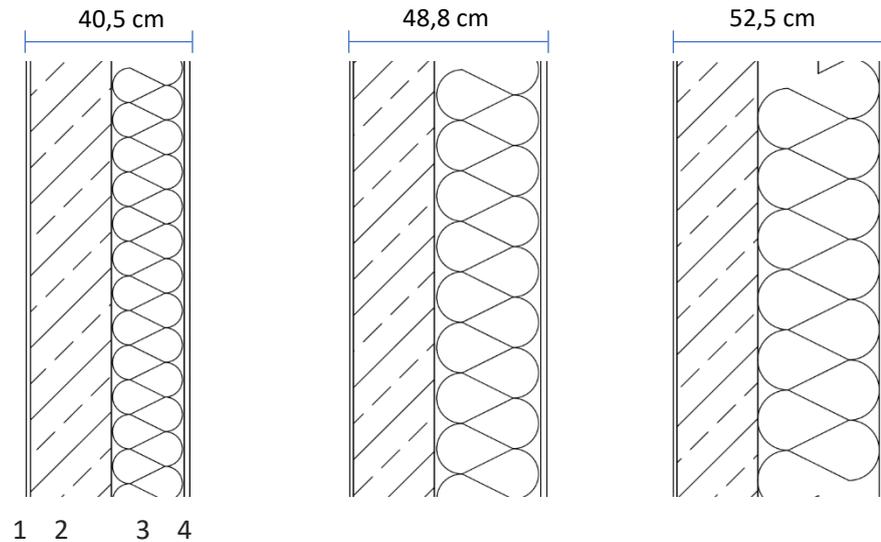


Tabelle 2: Schichtaufbauten der Außenwandkonstruktion mit Variation des Dämmstoffs.

	Dämmstoff mit einer Wärmeleitstufe WLS 024	Dämmstoff mit einer Wärmeleitstufe WLS 035	Dämmstoff mit einer Wärmeleitstufe WLS 040
Material 1	Putz innen	Putz innen	Putz innen
Schichtdicke	0,010 m	0,010 m	0,010 m
Wärmeleitfähigkeit	0,7 W/(m·K)	0,7 W/(m·K)	0,7 W/(m·K)
Material 2	Stahlbeton	Stahlbeton	Stahlbeton
Schichtdicke	0,200 m	0,200 m	0,200 m
Wärmeleitfähigkeit	2,3 W/(m·K)	2,3 W/(m·K)	2,3 W/(m·K)
Material 3	Dämmstoff	Dämmstoff	Dämmstoff
Schichtdicke	0,180 m	0,263 m	0,300 m
Wärmeleitfähigkeit	0,024 W/(m·K)	0,035 W/(m·K)	0,040 W/(m·K)
Material 4	WDVS-Putz	WDVS-Putz	WDVS-Putz
Schichtdicke	0,015 m	0,015 m	0,015 m
Wärmeleitfähigkeit	1,0 W/(m·K)	1,0 W/(m·K)	1,0 W/(m·K)
Wärmedurchlasswiderstand R	$7,789 \frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}}$	$7,789 \frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}}$	$7,789 \frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}}$
Differenz der Wanddicke zur Ausgangsvariante	Ausgangsvariante	+ 0,083 m	+ 0,12 m
Länge der gesamten thermischen Hülle für alle fünf Stockwerke von Haus 9	c. a. 420 m	c. a. 420 m	c. a. 420 m
Mehrbedarf für KGF	Ausgangsvariante	~ 33 m ²	~ 48 m ²

Aus der Gegenüberstellung wird deutlich, dass eine höhere Wärmeleitfähigkeit des Dämmstoffs zu einem Mehrbedarf an Konstruktionsgrundfläche führt. Konkret bedeutet das, dass für einen Dämmstoff mit der WLS 035 rund 33 m² mehr Fläche pro Gebäude für die Dämmung benötigt wird. Im Falle eines Dämmstoffs mit WLS 040 sind es ca. 48 m² pro Gebäude. Diese großen Unterschiede ergeben sich aus der Hyperbelfunktion des U-Werts. Mit sinkendem U-Wert steigt die benötigte Dämmstoffstärke überproportional an. Dieser Effekt ist auch von der Kubatur des Gebäudes abhängig. Bei sehr kompakten Gebäuden ist die Hüllfläche im Verhältnis zum Volumen gering. Hat das Gebäude Vorsprünge, Aussparungen oder andersartige Kubaturen, die einen erhöhten Dämmstoffbedarf erfordern, wirkt sich das konsequenterweise auch stärker auf den Konstruktionsflächenbedarf aus. Daraus lässt sich ableiten, dass bei kompakter Kubatur des Gebäudes und Einsatz von Dämmstoffen mit geringer Wärmeleitfähigkeit die Verkaufsfläche bzw. vermietbare Fläche maximiert werden kann. Die hohe Dämmleistung von 0,024 W/(m·K) des Polyurethandämmstoffs in Kombination mit dem hohen Dämmstandard führen bei diesen Gebäuden im Vergleich zu einem nennenswerten Flächengewinn.

5 Literatur

- BBSR BBSR: ÖKOBAUDAT. Hg. v. Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen. Online verfügbar unter <https://www.oekobaudat.de/>.
- BBSR 2017 BBSR (Hg.) (2017): Nutzungsdauern von Bauteilen für Lebenszyklusanalysen nach Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB). Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung. Online verfügbar unter https://www.nachhaltiges-bauen.de/fileadmin/pdf/Nutzungsdauer_Bauteile/BNB_Nutzungsdauern_von_Bauteilen_2017-02-24.pdf, zuletzt aktualisiert am 24.02.2017.
- BMZ 2019 Der Weg zur Agenda. Die Nachhaltigkeitsagenda und die Rio-Konferenzen. Hg. v. Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung. Online verfügbar unter http://www.bmz.de/de/ministerium/ziele/2030_agenda/historie/rio_plus20/index.html, zuletzt geprüft am 05.01.2019.
- COMSOL 2023 COMSOL Multiphysics®. Simulationssoftware (2023). Version 6.1. Stockholm, Sweden: Comsol Multiphysics GmbH. Online verfügbar unter <https://www.comsol.de/>.
- DIN 4108 DIN 4108 Beiblatt 2, 2019-06: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden; Beiblatt 2: Wärmebrücken - Planungs- und Ausführungsbeispiele, mit CD-ROM.
- DIN EN ISO 10077-2 DIN EN ISO 10077-2, 2018: Wärmetechnisches Verhalten von Fenstern, Türen und Abschlüssen - Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten - Teil 2: Numerisches Verfahren für Rahmen.
- DIN EN ISO 14040 DIN EN ISO 14040:2021-02, 2021: Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework (ISO 14040:2006 + A1:2020).
- DIN EN ISO 14044 DIN EN ISO 14044:2021-02, 2021: Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines (ISO 14044:2006 + Amd 1:2017 + Amd 2:2020).
- DIN EN ISO 6946 2018-03: Bauteile - Wärmedurchlasswiderstand und Wärmedurchgangskoeffizient - Berechnungsverfahren (ISO 6946:2017).
- FIW 2023 Forschungsinstitut für Wärmeschutz e.V. München, eigene Darstellungen, eigene Berechnungen
- m67 Schlüter Metzger Architekten m67 Schlüter Metzger Architekten GmbH: Q5 - Wohnquartier am Schättlisberg. Unter Mitarbeit von Gerhard Metzger Freier Architekt (FH). 88662 Überlingen. Online verfügbar unter www.m67-architekten.de.
- Sommer Informatik Sommer, Robert; Sommer, Alexander: WINISO®. Version 2.8.1. DE 83026 Rosenheim: Sommer Informatik GmbH. Online verfügbar unter <https://www.sommer-informatik.com/winiso/>.
- Walberg et al. 2015 Walberg, Dietmar; Brosius, Oliver; Schulze, Thorsten; Cramer, Antje (2015): Massiv- und Holzbau bei Wohngebäuden. Vergleich von massiven Bauweisen mit Holzfertigbauten aus kostenseitiger, bautechnischer und nachhaltiger Sicht. Hg. v. Arbeitsgemeinschaft für zeitgemäßes Bauen e.V. (ARGE eV). Kiel.

6 Anhang

Bild 15: Dämmstoff-Vergleich mit Effizienzgewinn

Dämmstoff-Vergleich mit Effizienzgewinn:										
Polyurethan : Dämmelement puren TG										
Tiefgaragedecke	m ²	Stärke mm	m ³	λ _B W/(m·K)	R _B m ² ·K/W	U W/m ² ·K	Klassische Dämmweise: Teklan bzw. Heraklith			U-Wert-Verbesserung
Summe	3.700	140	518	0,026	5,38	0,18	m ³	λ _B W/(m·K)	R _B m ² ·K/W	U W/m ² ·K
							518	0,10 / 0,04	3,60	0,27
										0,09
Polyurethan : purenotherm S										
Fassade / WDVS	m ²	Stärke mm	m ³	λ _B W/(m·K)	R _B m ² ·K/W	U W/m ² ·K	Klassische Dämmweise: Styropor-Fassadendämmplatte EPS-F			U-Wert-Verbesserung
Summe	10.580	180	1904	0,024	7,50	0,13	m ³	λ _B W/(m·K)	R _B m ² ·K/W	U W/m ² ·K
							1904,4	0,031	5,80	0,17
										0,04
Polyurethan : purenotherm S										
Decke unten	m ²	Stärke mm	m ³	λ _B W/(m·K)	R _B m ² ·K/W	U W/m ² ·K	Klassische Dämmweise: Styropor-Fassadendämmplatte EPS-F			U-Wert-Verbesserung
Summe	570	140	80	0,024	5,83	0,17	m ³	λ _B W/(m·K)	R _B m ² ·K/W	U W/m ² ·K
							79,8	0,031	4,51	0,22
										0,05
Polyurethan : puren Secure, puren Gefälle PIR Class C										
Flachdach (incl. Gefälle)	m ²	Stärke mm	m ³	λ _B W/(m·K)	R _B m ² ·K/W	U W/m ² ·K	Klassische Dämmweise: Styropor-Deckendämmplatte EPS 035			U-Wert-Verbesserung
Summe	4.770	240	1145	0,026	9,23	0,11	m ³	λ _B W/(m·K)	R _B m ² ·K/W	U W/m ² ·K
							1144,8	0,035	6,85	0,14
										0,04
Polyurethan : puren TG, puren PIR Class C										
Kellerdecke	m ²	Stärke mm	m ³	λ _B W/(m·K)	R _B m ² ·K/W	U W/m ² ·K	Klassische Dämmweise: Styropor-Deckendämmplatte EPS 035 DI			U-Wert-Verbesserung
Summe	2.470	140	346	0,026	5,38	0,18	m ³	λ _B W/(m·K)	R _B m ² ·K/W	U W/m ² ·K
							345,8	0,035	4,00	0,24
										0,06
Polyurethan : purenit Attikaelement C										
Attika	lfm					ψ W/m·K	Klassische Dämmweise: Attika in Beton-/Holzbauweise			Psi-Wert-Verbesserung
Summe	1.120					-0,01				ψ W/m·K
										0,24
										0,25